

МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ

А. А. Морсин¹, Ш. Р. Сингатулин, А. А. Крылов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлен многофункциональный модуль FADC, разработанный в Институте ядерной физики СО РАН для контроля и измерения параметров импульсных источников питания. Данный модуль содержит следующие функциональные узлы: 16-битный аналого-цифровой преобразователь, генератор импульсов, регистры логических сигналов, синхронизацию, интерфейсы связи CAN и Ethernet. Кратко описана схемотехника, приведены основные характеристики модуля.

A multifunctional module FADC for monitoring and measuring the parameters of a pulsed power source is introduced. This module was developed at the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and contains the following functional units: 16-bit analog-digital converter, pulse generator, logical signal registers, synchronization, CAN and Ethernet communication interfaces. The circuitry and the main characteristics are briefly described.

PACS: 07.05.Kf; 07.05.Hd

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире не останавливается процесс разработки новых физических установок и модернизации уже существующих. Количество используемых компонентов постоянно растет, но остается необходимость точного и быстрого измерения того или иного параметра установки: тока, напряжения, магнитного поля и др.

Многие физические установки работают в импульсном режиме, а управление практически всеми устройствами осуществляется либо в автоматическом режиме, либо с помощью программы управления на ПК или сервере из пультовой комнаты. В таком случае за время импульса величина исследуемого параметра меняется на несколько порядков, но при этом точность измерения значения должна быть не хуже десятых или сотых долей процента. В зависимости от типа используемых датчиков выходное значение измеряемой величины физической установки преобразуется в электрический сигнал, который либо прямо пропорционален искомой величине, либо является сложной функцией от него.

Есть несколько способов измерения импульсных параметров. Один из них — непосредственное измерение исследуемой величины или ее производной с высокой частотой дискретизации для вычисления характерных значений максимума, длительности, профиля импульса. При сохранении профиля появляется возможность восстановления исходного сигнала для последующего анализа работы установки.

¹E-mail: AlexanderMorsin@gmail.com

В данной работе рассмотрена практическая реализация модуля FADC, который является комплексным программируемым устройством для измерения импульсных сигналов.

МОДУЛЬ FADC

Модуль FADC имеет следующие функциональные узлы: аналого-цифровой преобразователь, генератор импульсов, регистры логических сигналов, синхронизацию, интерфейсы связи CAN и Ethernet.

Узел аналого-цифрового преобразователя (АЦП) состоит из четырех независимых измерительных каналов. Схема измерительного канала представлена на рис. 1. Каждый канал содержит фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка с частотой среза ~ 1 МГц, дифференциальный усилитель для подавления синфазной составляющей входного сигнала, 16-битный АЦП последовательного приближения.



Рис. 1. Схема измерительного канала

Узел генерации импульсов состоит из четырех независимых каналов и используется для локальной синхронизации внешних модулей, связанных с FADC. Данные каналы могут работать в двух режимах, таких как генерация одиночных запускающих импульсов с привязкой к импульсам от узла синхронизации и автономная генерация импульсов с настраиваемым периодом. Последний режим актуален для проведения отладочных работ независимо от текущего состояния установки.

Узел регистров логических сигналов состоит из четырех входных и четырех выходных регистров. Выходные регистры предназначены для выдачи разрешения или запрета на работу внешним устройствам. Входные регистры предназначены для считывания текущего логического состояния внешних устройств.

Узел синхронизации принимает запускающие импульсы в два независимых входных канала, гальванически изолированных при помощи оптронов, и обеспечивает синхронизацию работы с внешним устройством. Дополнительно приходящие внешние импульсы можно имитировать с помощью подачи команды запуска из внешней программы управления.

Узел связи состоит из двух интерфейсов CAN и Ethernet и используется для информационного обмена с удаленным сервером. Каждый из интерфейсов имеет свой протокол информационного обмена. Одновременно может использоваться только один интерфейс. Для Ethernet используется протокол TCP Modbus, для CAN — протокол, разработанный в Институте ядерной физики СО РАН. В стандартный набор модуля входят следующие команды: передача амплитуды тока, передача времени достижения максимума тока, передача профиля тока, программный запуск измерений, запрос состояния входных логических регистров, установка состояния выходных логических регистров.

Конверсия сигналов всех четырех измерительных каналов происходит параллельно с запрограммированной частотой не более 1 МГц. За один цикл измерений в буфере памяти сохраняется 2048 выборок АЦП на каждый канал. Буфер обновляется после каждого последующего цикла измерений. В результате по сохраненным данным можно получить информацию о форме исследуемого сигнала. Накопление и обработка полученных данных производятся непосредственно в микроконтроллере. В случае необходимости они проходят процедуру обработки в «логике» микроконтроллера: вычисляются интегралы, длительности и амплитуды сигналов. Затем обработанные данные передаются на сервер по интерфейсу связи. Передача обработанных данных на сервер позволяет существенно сократить объем транслируемого массива данных, что является важным моментом при использовании только CAN-интерфейса.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем результаты измерений некоторых основных характеристик модуля. На рис. 2 представлены данные измерений собственных шумов и смещения нуля при короткозамкнутом входе модуля. Как видно, собственные шумы модуля составляют $\pm 1,5$ мВ, а смещение нуля — около -1 мВ. На рис. 3 представлены данные относительного дрейфа среднего значения смещения нуля за 10 ч с частотой измерений 0,25 Гц. Дрейф смещения нуля является суммой дрейфов всех элементов измерительного канала: АЦП, источника опорного напряжения, операционных усилителей и пассивных элементов (резисторов и т. п.). Как видно из рис. 3, после того как модуль достигает теплового баланса, относительный дрейф смещения нуля составляет $\pm 3 \cdot 10^{-5}$. В ходе работы модуля в течение 10 ч увеличения амплитуды собственных шумов зарегистрировано не было.

На рис. 4 представлен график измерений ступенчатого сигнала при подаче на вход. Время нарастания сигнала составляет порядка 1 мкс, что соответствует схеме измерительного канала. Более подробно влияние входных фильтров на точность измерения производных исследуемых сигналов рассмотрено в [1].

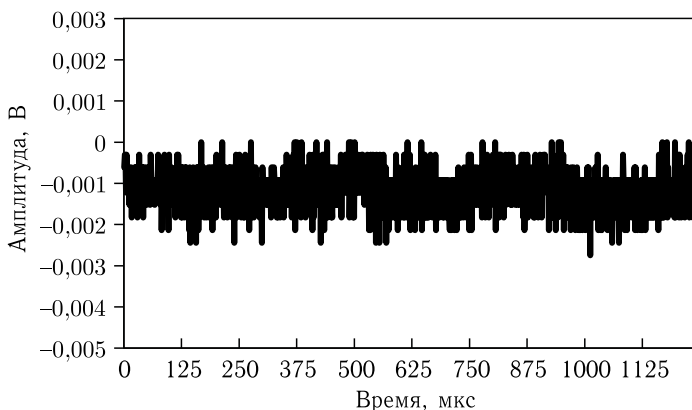


Рис. 2. Измерение смещения нуля и собственных шумов

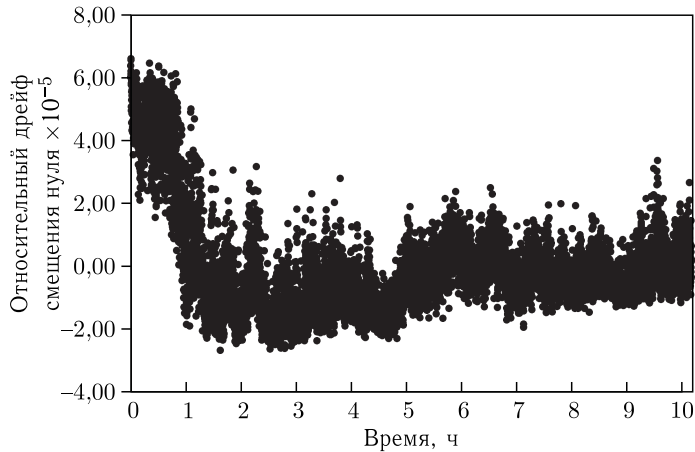


Рис. 3. Относительный дрейф среднего значения смещения нуля

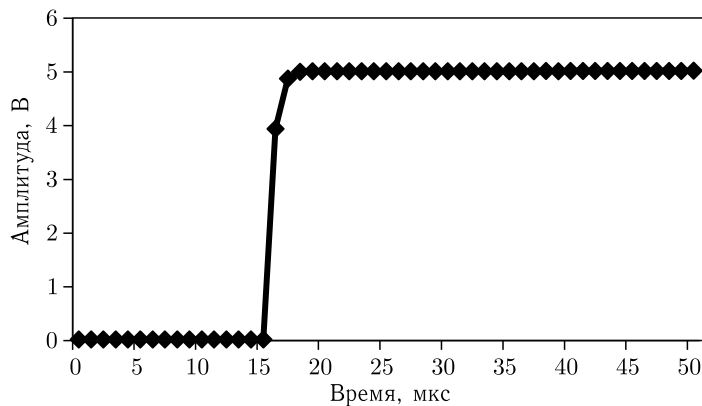


Рис. 4. Измерение ступенчатого сигнала

В настоящее время данный модуль используется в составе секций импульсного питания квадрупольных магнитов и корректоров пучка транспортного канала перевода пучков из бустера в нуклотрон ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Коллайдер NICA — один из крупномасштабных ускорительных проектов, реализуемых на базе Объединенного института ядерных исследований в Дубне [2]. Планируется использование ~ 11 каналов питания с током нагрузки не более 0,6 кА.

Для тестирования была собрана секция импульсного источника питания, которая представляет собой два этажа субблоков EurorasPRO высотой 3U (132,5 мм) каждый. Первый субблок обеспечивает управление секцией, связь с сервером, питание источника. Основными компонентами являются модули CEAC124 [3], CGVI8 [4], FADC, а также их источники питания от сети 230 В с напряжениями 24 и 5 В. Второй субблок состоит из трех силовых генераторов GID160 и обеспечивает питание

индуктивной нагрузки. GID160 (в предыдущей версии ГИД-25 [5]) — двуполярный генератор импульсов со следующими параметрами: емкостный накопитель 300 мкФ, выходное напряжение от 50 В до 1 кВ, точность установки $5 \cdot 10^{-4}$, выходной ток до 500 А в зависимости от нагрузки. Установка параметров работы и управление секцией осуществляются удаленно с помощью программы по CAN-интерфейсу.

На данной секции проводились измерения стабильности тока в индуктивной нагрузке — фокусирующих линзах. Режим работы секции — импульсный с частотой 0,1 Гц. При этом ток в нагрузке возбуждался с помощью релаксационного разряда емкостного накопителя генератора GID160.

Изначально измерялся сигнал, поступающий от датчика тока, реализованного на поясе Роговского и подключенного внутри генератора GID160 непосредственно в нагрузочную цепь. Данный сигнал представляет собой напряжение, пропорциональное производной тока в линзе (рис. 5). Затем по измеренным данным вычислялся инте-

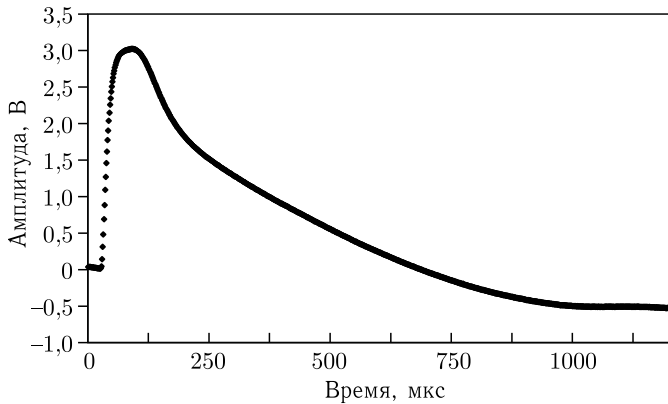


Рис. 5. Оцифрованный сигнал производной тока

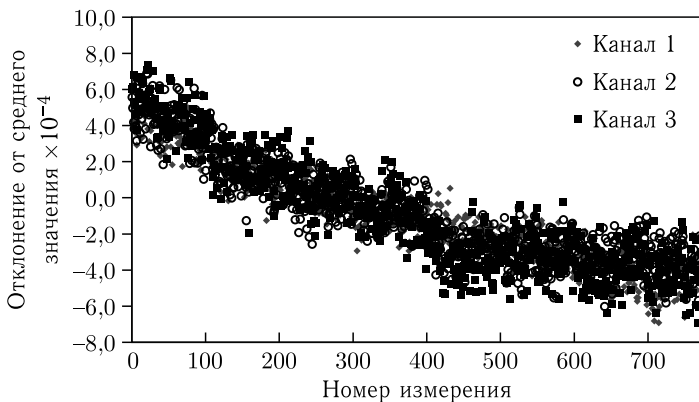


Рис. 6. Отклонение измеренных интегралов от среднего значения

грал для определения тока. На рис. 6 представлена величина отклонения измеренных интегралов тока от среднего значения в зависимости от номера в последовательности импульсов.

Как видно из рис. 6, после того как все компоненты секции и индуктивной нагрузки достигают теплового баланса, отклонение измерений интегралов тока от среднего значения составляет $\pm 3 \cdot 10^{-4}$. Конечная величина отклонения измерений является суммой дрейфов и погрешностей всей секции, при этом относительная точность измерений модуля составляет 10^{-4} .

В таблице представлены измеренные параметры модуля FADC.

Основные параметры модуля FADC

Параметр	Данные измерений
Напряжение питания, В	+5, +24
Ток потребления, мА	110 (+5 В), 10 (+24 В)
Интерфейсы связи	CAN, Ethernet
Разрядность измерений АЦП, бит	16
Относительная точность измерений	10^{-4}
Частота измерений, МГц	До 1
Количество каналов измерений	4
Тип каналов измерений	Дифференциальный
Входной импеданс канала измерения, кОм	24,6
Диапазон изменения напряжения входного дифференциального сигнала, В	От -10 до +10
Диапазон изменения напряжения входного синфазного сигнала, В	От -10 до +10
Коэффициент подавления входного синфазного сигнала, дБ	90
Запуск измерений	По внешнему сигналу или по команде канала связи
Размеры модуля: высота, мм глубина, мм ширина, мм	Конструктив «Евромеханика»: 133,35 (3U) 160 20,16

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и испытан модуль измерения импульсных сигналов длительностью от микросекунд, способный проводить их последующую обработку, что существенно уменьшает объем передаваемых данных по коммуникационной шине CAN или Ethernet. Данный модуль может быть использован для решения широкого спектра задач, требующих измерения импульсных параметров и их цифровой обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батраков А. М., Ильин И. В., Павленко А. В.* Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией // *Автометрия*. 2015. Т. 51, № 1. С. 62–69.
2. *Калашиников А.* НИКА: Вселенная в лаборатории // *Воздушно-космическая сфера*. 2017. № 4(93). С. 84–91.
3. *Беликов О. В., Веремеенко В. Ф., Козак В. Р., Медведко А. С., Купер Э. А.* Семейство контроллеров СЕАС для управления источниками питания ускорительно-накопительных комплексов // *Вестн. НГУ. Сер. «Физика»*. 2012. Т. 7, № 4. С. 43–48.
4. *Быков Е. В., Козак В. Р., Тарарышкин С. В.* Генератор временных интервалов CGVI-8ME. Препринт ИЯФ СО РАН 2014-5. Новосибирск, 2014. 18 с.
5. *Ращенко В. В.* Двуполярный импульсный генератор ГИД-25 для питания элементов канала транспортировки пучка К500 // *ПТЭ*. 2012. № 1. С. 56–63.

Получено 27 марта 2019 г.