

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.396.9

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-64-74

МОДУЛЬ СБОРА ДАННЫХ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА СУПЕР с-т ФАБРИКИ*

А.А. ГЛУШАК

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры электрофизических установок и ускорителей.

630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 11, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, старший лаборант сектора 3-12. E-mail: nastya.glushak.97@mail.ru

Супер с-т фабрика – строящийся в Институте ядерной физики (ИЯФ СО РАН) новый ускорительно-накопительный комплекс большой светимости для всестороннего изучения физики с-кварка и т-лептона. Проектная светимость установки – $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что позволяет в десятки раз увеличить объем экспериментальной информации. Но в то же время такая светимость накладывает жесткие требования к детектору частиц, в задачу которого входят регистрация рождаемых частиц и вычисление их основных характеристик – энергий и импульса. Одной из главных подсистем детектора является электромагнитный калориметр, в котором для идентификации частиц и измерения энергии γ -квантов используются сцинтилляционные счетчики. В качестве сцинтиллятора в проекте Супер с-т фабрики будут использоваться кристаллы чистого йодистого цезия (CsI) с временем высвечивания 30 нс.

Основными задачами считывающей электроники являются формирование сигналов с зарядочувствительных предусилителей для минимизации уровня электронного шума, оцифровка сигнала с анализом формы для вычисления основных характеристик – амплитуды, времени появления и качества аппроксимации, формирование пакетов для передачи в общую систему сбора данных. Данные задачи предполагается решить с помощью специальной 16-канальной платы усилителей-формирователей и АЦП. На данный момент разрабатывается ее четырехканальный прототип, на котором необходимо отладить работу модуля и проверить передачу данных по волоконно-оптической линии связи.

Данная статья посвящена разработке прототипа модуля сбора регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с-т фабрики. В работе рассмотрена общая система сбора данных калориметра, приведены принципиальная схема формирующего усилителя и дизайн печатной платы, описана структура проекта цифровой обра-

* Статья получена 16 октября 2019 г.

ботки сигнала и промежуточные результаты разработки алгоритма вычисления основных характеристик сигнала.

Ключевые слова: электромагнитный калориметр, сцинтилляционные счетчики, формирующий усилитель, цифровая обработка сигналов, минимизация функции χ^2

ВВЕДЕНИЕ

Структура системы сбора данных электромагнитного калориметра Супер с-т фабрики представлена на рис. 1 [1, 2]. Световые импульсы с кристаллов калориметра с помощью фотоприемников преобразуются в пропорциональные по величине электрические сигналы, которые усиливаются в зарядочувствительном предусилителе (ЗЧУ). В модуле сбора данных формируются сигналы для улучшения соотношения сигнал / шум. С помощью платы формировщика-оцифровщика-анализатора (ФОА) сигналы оцифровываются, по оцифрованным значениям восстанавливается форма сигнала и вычисляются его амплитуда и время появления относительно сигнала триггерной системы. Затем данные отправляются в коллектор, где они формируются в пакеты и передаются по волоконно-оптической линии (ВОЛС) в общую систему сбора данных.

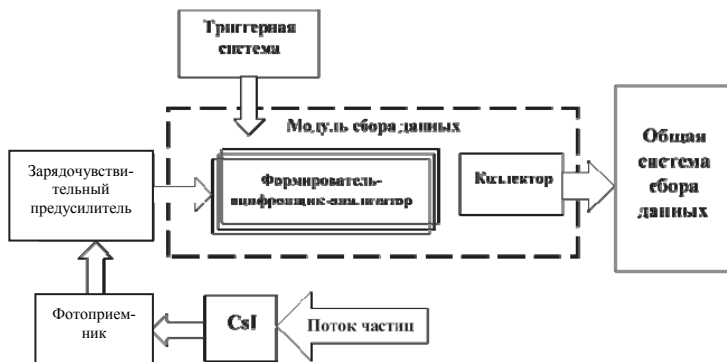


Рис. 1. Структура сбора данных калориметра

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В задачу разработки платы ФОА входит разработка принципиальных схем и дизайна печатной платы, написание интерфейса работы на языке описания аппаратуры VHDL.

Целью работы является разработка четырехканального прототипа платы модуля сбора данных регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с-т фабрики. Для достижения поставленной цели были обозначены задачи разработки принципиальных схем и топологии печатной платы, моделирования сигналов формирующего усилителя, а также разработка алгоритма вычисления полезных характеристик сигнала.

2. ФОРМИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Основной частью платы ФОА является формирующий усилитель. В его задачу входит формирование импульса симметричной формы для дальнейшей оцифровки с разными коэффициентами передачи для расширения динамического диапазона. По шумовым характеристикам усилитель считается хорошим, уровень его собственных шумов много меньше уровня шума в системе предусилитель – другой усилитель. В источниках [3–7] приведен подробный расчет параметров каскадов усилителей и шумовых характеристик. На рис. 2 приведена принципиальная схема формирующего усилителя. Согласно требованиям, предъявляемым в источнике [8], она состоит из входного каскада, дифференциального каскада, каскадов интегрирования и выходного каскада.

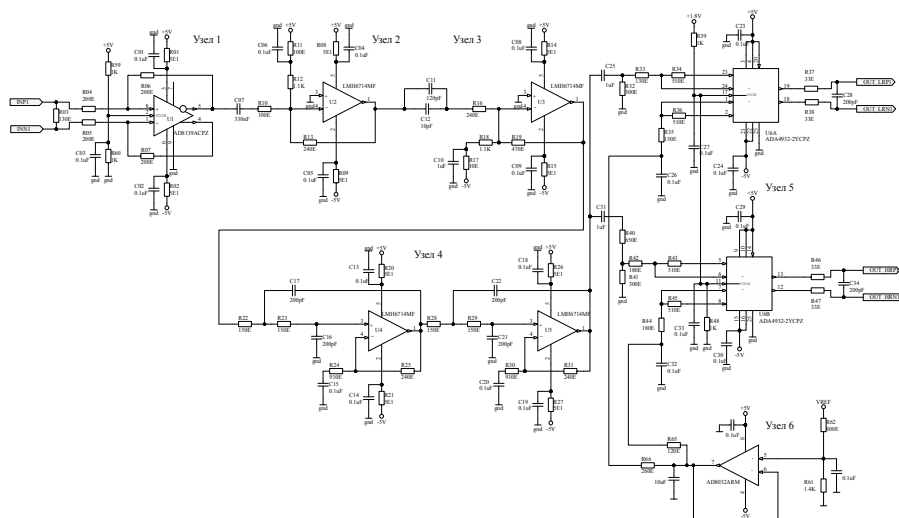


Рис. 2. Принципиальная схема формирующего усилителя

В ходе работы было выполнено моделирование в среде Multisim [9]. На рис. 3 представлена осциллограмма выходного сигнала усилителя с наибольшим коэффициентом усиления при подаче на вход дифференциальной ступеньки с фронтом, равным времени высвечивания скинтиллятора.

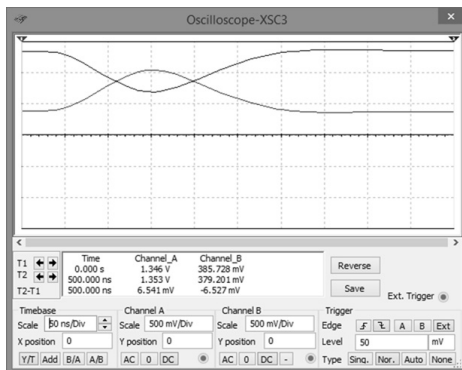


Рис. 3. Выходные сигналы усилителя с наибольшим коэффициентом усиления

После этого были выбраны процессор для обработки форм сигналов, приемопередатчики, элементы питания и другие необходимые микросхемы. Затем была произведена трассировка печатной платы (рис. 4) согласно рекомендациям производителей микросхем и требованиям производителя печатных плат НЭК [10].

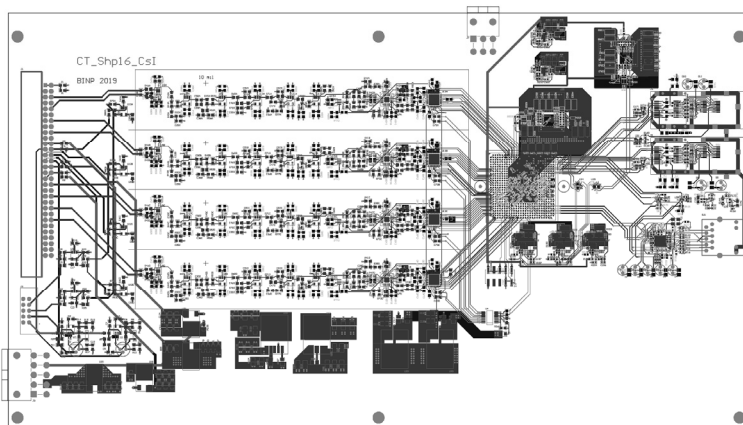


Рис. 4. Дизайн платы формировщиков-анализаторов и АЦП

также не может дать точного результата, потому что заранее не известно, по каким точкам нужно интегрировать. Предполагается, что наиболее точным методом из представленных является аппроксимация стандартной кривой методом минимизации функции χ^2 . Более подробно про метод минимизации χ^2 можно прочесть в работах [11–13].

Для работы с методом минимизации функции χ^2 необходимо знать аналитическую формулу сигнала. Рассчитать ее невозможно, поэтому аналитическая функция находится с помощью аппроксимации полиномами. С помощью среды моделирования Multisim была построена осциллограмма выходного сигнала формирующего усилителя при подаче на вход дифференциальной ступеньки с передним фронтом, равным времени высвечивания сцинтиллятора (рис. 6, а). Такой сигнал был взят из предположения, что кристалл высвечивает равномерно, хотя в реальности это не совсем верно. Более точный сигнал с выхода усилителя будет получен после изготовления платы.

Для вычисления промежуточных значений кривая была интерполирована кубическими сплайнами (рис. 6, б). В качестве аппроксимирующей функции было взято математическое выражение [14]

$$f(t) = P + A \left(p_0 + p_1 t + p_2 t^2 \right) \left(A_1 e^{\frac{-t}{\tau_1}} + A_2 e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right).$$

Результат аппроксимации с наилучшей погрешностью представлен на рис. 6, в. Средняя погрешность аппроксимации составила 18,25 %. Поиск подходящего полинома и вычисления коэффициентов не завершен и находится на завершающей стадии.

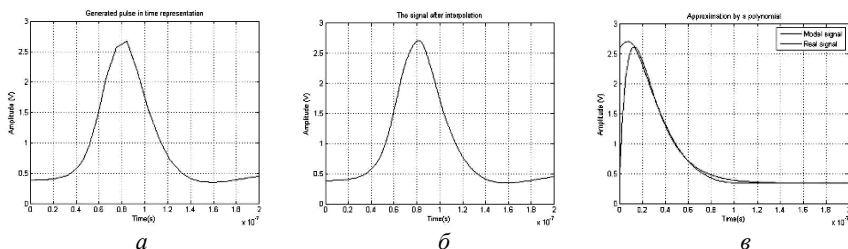


Рис. 6. Аппроксимация:

а – выходной сигнал усилителя; б – сигнал после интерполяции; в – аппроксимированный и интерполированный сигналы

После этого с помощью метода Монте-Карло будет вычислена точность восстановления амплитуды и времени для каждого метода. По результатам этого метода будет сделан окончательный выбор алгоритма вычисления амплитуды и времени появления, а также вычислены необходимые коэффициенты [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены этапы разработки модуля сбора данных регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с- τ фабрики. В работе приведены принципиальная схема формирующего усилителя и топология печатной платы. Разработка и проверка алгоритмов находится в завершающей стадии, после которой будет известна точность восстановления амплитуды сигнала и времени появления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Группен К.* Детекторы элементарных частиц: пер. с англ. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. – 408 с.
2. *Онучин А.П.* Экспериментальные методы ядерной физики: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 220 с.
3. *Глушак А.А.* Модуль сбора данных электромагнитного калориметра Супер С- τ фабрики: выпускная квалификационная работа. – Новосибирск, 2019. – 63 с.
4. *Глушак А.А., Жуланов В.В., Аульченко В.М.* Модуль сбора данных электромагнитного калориметра Супер С- τ фабрики // Интеллектуальный потенциал Сибири: 27-я региональная научная студенческая конференция, г. Новосибирск, 23–25 сентября 2019 г.: сборник научных трудов: в 3 ч. – Новосибирск, 2019. – Ч. 2. – С. 367–368.
5. *Глушак А.А., Жуланов В.В., Аульченко В.М.* Разработка прототипа модуля сбора данных электромагнитного калориметра Супер с- τ фабрики // Интеллектуальный потенциал Сибири: 27-я региональная научная студенческая конференция, г. Новосибирск, 23–25 сентября 2019 г.: сборник научных трудов: в 3 ч. – Новосибирск, 2019. – Ч. 3. – С. 339–344.
6. *Глушак А.А.* Формирующий усилитель спектрометрического канала регистрации сигналов // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: материалы VIII региональной научно-практической конференции, Томск, 2019. – Томск, 2019. – Ч. 2. – С. 473–476.
7. *Глушак А.А., Жуланов В.В.* Модуль сбора данных регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с- τ фабрики // Наука.

Технологии. Инновации: сборник научных трудов: в 9 ч. – Новосибирск, 2019. – Ч. 1. – С. 14–18.

8. Супер Чарм–Тау фабрика. Концептуальный проект Ч.1 (физическая программа, детектор) / В.В. Анашин, А.В. Анисёнков, В.М. Аульченко и др. – Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2018. – 136 с.

9. *Курина М., Фомина К.* Программа схемотехнического моделирования Multisim: описание программы. – URL: http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/soft/multisim/manual.pdf (дата обращения: 28.11.2019).

10. Памятка разработчику. Вып. 5. Проектирование для автоматического монтажа. – Минск: Нанотех, 2004. – 25 с.

11. Структура и алгоритм функционирования аппаратуры многоканального кристаллического калориметра для работы при больших нагрузках / В.М. Аульченко, В.Н. Жилич, В.В. Жуланов, А.С. Кузьмин, Д.В. Матвиенко, К. Миябаяши, И. Накамура, Ю.В. Усов, Б.Г. Чеон, Б.А. Шварц, В.Е. Шебалин // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 39–47.

12. *Шебалин В.Е.* Электромагнитный калориметр детектора Belle-II // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2018. – Т. 49, вып. 4. – С. 1392–1400.

13. Time and energy reconstruction at the electromagnetic calorimeter of the Belle-II detector / V. Aulchenko, A. Bobrov, T. Ferber, A. Kuzmin, K. Miyabayshi, G. De Nardo, V. Shebalin, A. Sibidanov, Yu. Usov, V. Zhulanov // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12 (08). – P. C08001.

14. *Воевода А.А., Филушов В.Ю.* Эквивалентные преобразования определенного класса нелинейных систем с переходом от интеграла по времени к интегралу по параметру // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 1. – С. 38–52.

15. *Глушак А.А., Жуланов В.В.* Модуль сбора данных регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с-tau фабрики // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов: в 9 ч. – Новосибирск, 2019. – Ч. 6. – С. 75–78.

Глушак Анастасия Андреевна, старший лаборант сектора 3-12 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, магистрант кафедры электрофизических установок и ускорителей НГТУ. E-mail: nastya.glushak.97@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-64-74

Data collection module the registering electronics of the electromagnetic calorimeter Super c- τ factory^{*}

A.A. Glushak

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master's student of the Department of electrophysical installations and accelerators.

Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 11 academician Lavrentiev Prospekt, Novosibirsk 630090, Russian Federation, senior laboratory assistant of sector 3-12. E-mail: nastya.glushak.97@mail.ru

The Super c- τ factory being designed at the Institute of Nuclear Physics (BINP SB RAS) is a new high-luminosity accelerator-storage complex for a comprehensive study of the physics of c-quark and τ -lepton. The design luminosity of the installation is $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, which allows to increase the amount of experimental information. But at the same time, such luminosity imposes strict requirements on the detector, whose task is to register the particles being born and calculate their main characteristics – energies and momentum. One of the main subsystems of the detector is the electromagnetic calorimeter, in which scintillation counters are used to identify particles and measure the energy of γ -quant. Pure cesium iodide (CsI) crystals with a decay time of 30 ns will be used as a scintillator in the Super c- τ factory project.

The main tasks of the detector electronics are to generate signal from a charge-sensitive pre-amplifier to minimize the level of electronic noise, to digitize of the signal with form analysis to calculate the main characteristics-amplitude, appearance time and quality of approximation, to form of packets for transmission to the general data collection system. These tasks are supposed to be solved using a special 16-channel board of amplifiers-shapers and ADCs. At the moment, its four-channel prototype CT_Shp16_CsI is being developed, on which it is necessary to debug the operation of the module and check the data transmission over the fiber-optic communication line.

This article is dedicated to the development of CT_Shp16_CsI. The general system of collecting calorimeter data is considered, a schematic circuits of the shaper amplifier and the design of the printed circuit board are presented, the structure of the digital signal processing project and the intermediate results of the development of the algorithm for calculating the main signal characteristics are described.

Keywords: electromagnetic calorimeter, scintillation counters, forming amplifier, digital signal processing, minimization of function χ^2

REFERENCES

1. Grupen C. *Particle detectors*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996 (Russ. ed.: Grupen K. *Detektory elementarnykh chastits*. Novosibirsk, Sibirskii khronograf Publ., 1999. 408 p.).

^{*} Received 16 October 2019.

2. Onuchin A.P. *Eksperimental'nye metody yadernoi fiziki* [Experimental methods of nuclear physics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2010. 220 p.
3. Glushak A.A. *Modul' sbora dannykh elektromagnitnogo kalorimetra Super C-tau fabriki: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota* [Data collection module of electromagnetic calorimeter Super c-tau factory. Diploma qualification thesis]. Novosibirsk, 2019. 63 p.
4. Glushak A.A., Zhulanov V.V., Aul'chenko V.M. [Data collection module of electromagnetic calorimeter Super c-tau factory]. *Intellektual'nyi potentsial Sibiri: 27-ya regional'naya nauchnaya studencheskaya konferentsiya* [Intellectual potential of Siberia: 27th Regional Scientific Student Conference], Novosibirsk, September 23–25, 2019, pt. 2, pp. 367–368. (In Russian).
5. Glushak A.A., Zhulanov V.V., Aul'chenko V.M. [Development of a prototype of the data collection module of the electromagnetic calorimeter Super c-tau factory]. *Intellektual'nyi potentsial Sibiri: 27-ya regional'naya nauchnaya studencheskaya konferentsiya* [Intellectual potential of Siberia: 27th Regional Scientific Student Conference], Novosibirsk, September 23–25, 2019, pt. 3, pp. 339–344. (In Russian).
6. Glushak A.A. [Forming amplifier of the spectrometric signal registration channel]. *Nauka i praktika: proektnaya deyatel'nost' – ot idei do vnedreniya: materialy VIII regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science and practice: project activity – from idea to implementation: materials of the VIII regional scientific-practical conference], Tomsk, 2019, pt. 2, pp. 473–476. (In Russian).
7. Glushak A.A., Zhulanov V.V. [Data collection module for registering electronics of Super c-tau electromagnetic calorimeter factory]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers], Novosibirsk, 2019, pt. 1, pp. 14–18. (In Russian).
8. Anashin V.V., Anisenkov A.V., Aul'chenko V.M. et al. *Super Charm – Tau fabrika. Kontseptual'nyi proekt (fizicheskaya programma, detektor)*. Ch. 1 [Super Charm – Tau factory. Conceptual project (physical program, detector). Pt. 1]. Novosibirsk, INP SB RAS Publ., 2018. 136 p.
9. Kirina M., Fomina K. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Multisim: opisanie programmy* [Program of circuit modeling Multisim]. Available at: http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/soft/multisim/manual.pdf (accessed 28.11.2019).
10. *Pamyatka razrabotchiku. Vyp. 5. Proektirovanie dlya avtomaticheskogo montazha* [Memo to the developer. Iss. 5. Design for automatic installation]. Minsk, Nanotech LTD, 2004. 25 p.
11. Aulchenko V.M., Zhilich V.N., Zhulanov V.V., Kuzmin A.S., Matvienko D.V., Mibayashi K., Nakamura I., Usov Y.V., Cheon B.G., Shwartz B.A., Shebalin V.E. Structure and algorithm of electronics of a multichannel crystal calorime-

ter for a high-rate trigger. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 31–38. Translated from *Avtometriya*, vol. 51, no. 1, pp. 39–47.

12. Shebalin V.E. Elektromagnitnyi kalorimetr detektora Belle-II [Electromagnetic calorimeter of Belle-II detector]. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra – Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*, 2018, vol. 49, iss. 4, pp. 1392–1400.

13. Aulchenko V., Bobrov A., Ferber T., Kuzmin A., Miyabayshi K., De Nardo G., Shebalin V., Sibidanov A., Usov Yu., Zhulanov V. Time and energy reconstruction at the electromagnetic calorimeter of the Belle-II detector. *Journal of Instrumentation*, 2017, vol. 12 (08), p. C08001.

14. Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Ekvivalentnye preobrazovaniya opredelennogo klassa nelineinykh sistem s perekhodom ot integrala po vremeni k integralu po parametru [Equivalent transformations of a defined class of nonlinear systems with transition from integral to time to integral by parameter]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1, pp. 38–52.

15. Glushak A.A., Zhulanov V.V. [Data collection module for registering electronics of Super c-tau electromagnetic calorimeter factory]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers], Novosibirsk, 2019, pt. 6, pp. 75–78. (In Russian).

Для цитирования:

Глушак А.А. Модуль сбора данных регистрирующей электроники электромагнитного калориметра Супер с- τ фабрики // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 64–74. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-64-74.

For citation:

Glushak A.A. Modul' sbora dannykh registriruyushchei elektroniki elektromagnitnogo kalorimetra Super с- τ fabрики [Data collection module the registering electronics of the electromagnetic calorimeter Super с- τ factory]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 64–74. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-64-74.