

**А. П. Войтер, М. И. Доронин, А. Н. Ковалев, А. А. Гаврилов**

*Інститут ядерних исследований НАН України, Київ*

## ВОСЬМИКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АЦП С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ

Рассмотрены архитектура, принципы работы, программное обеспечение и конструкция восьмиканального спектрометрического АЦП с программируемой логикой для многопараметрических измерительных систем исследования ядерных реакций.

*Ключевые слова:* эксперимент, ядерные реакции, АЦП, ПЛИС, графический язык программирования.

### Введение

Спектрометрический аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) является составной частью разрабатываемой измерительной системы с гибкой архитектурой для экспериментальных исследований ядерных реакций [1]. АЦП может использоваться как для параллельной оцифровки спектрометрических импульсов, поступающих от независимых источников (до восьми) в монодетекторных измерительных системах, так и для оцифровки импульсов от телескопов (до четырех) в системах идентификации заряженных частиц низких и средних энергий по методу измерения удельных потерь энергии и полной энергии ( $E - \Delta E$ ).

АЦП разработан на основе программируемой логической интегральной микросхемы (ПЛИС) серии Cyclone фирмы Altera [2, 6]. Связь с персональным компьютером (ПК) осуществляется

по интерфейсу USB. Для работы в составе сложных измерительных систем в АЦП предусмотрена также системная шина данных и управления для интеграции с другими блоками ядерной электроники.

### Архитектура и принципы работы

Структурная схема АЦП представлена на рис. 1. В его состав входит восемь идентичных независимых каналов оцифровки импульсов. Каждый из этих каналов состоит из входного дифференциального усилителя, схемы отбора импульсов, пикового детектора с запоминанием, АЦП последовательного приближения AD7654 и схемы управления на основе CPLD серии MAX3000. Для установки порогов отбора импульсов используется восьмиразрядный цифроанalogовый преобразователь (ЦАП).

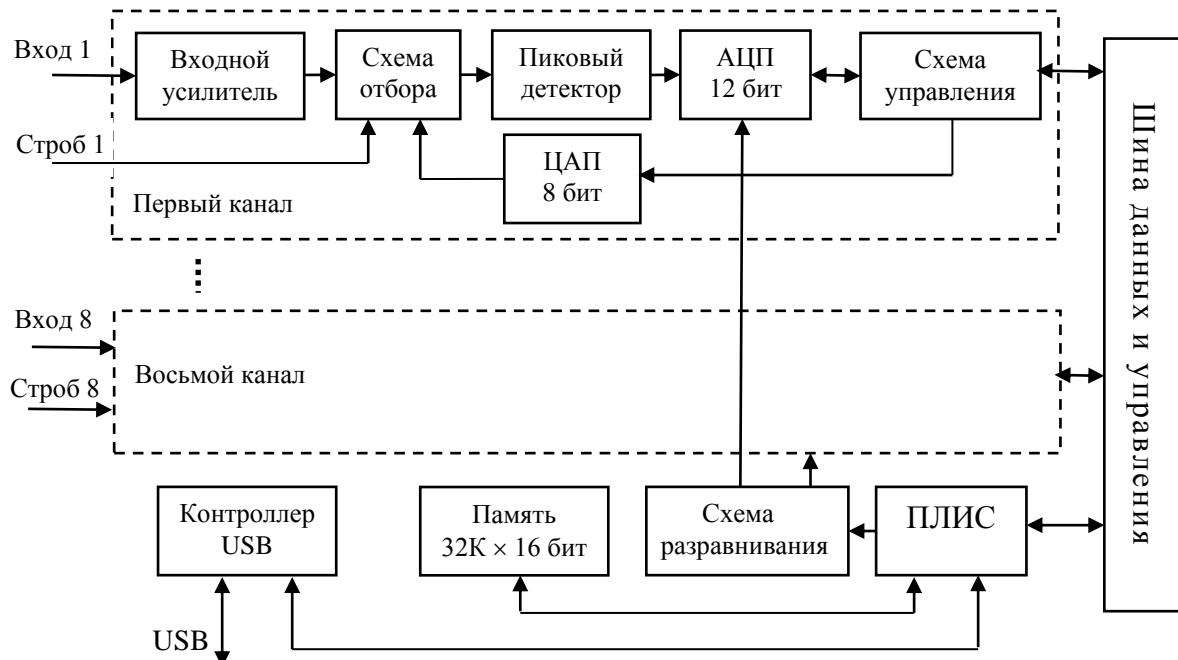


Рис. 1. Структурная схема АЦП.

© А. П. Войтер, М. И. Доронин, А. Н. Ковалев, А. А. Гаврилов, 2016

Каналы АЦП имеют индивидуальные входы стробирования, рассчитанные на прием положительных сигналов ТТЛ логики либо отрицательных NIM уровней на нагрузке 50 Ом. В каждом канале имеется возможность либо сразу передавать результат преобразования, либо накапливать данные в своей области гистограммной памяти модуля АЦП.

Обмен данными и управление режимами работы спектрометрического АЦП происходит либо по системной шине через 40-контактный разъем на передней панели модуля, либо по интерфейсу USB.

Аналоговые входы имеют связь по постоянному току и принимают положительные импульсы от стандартных спектрометрических усилителей с постоянной времени формирования от 0,25 до 20 мкс. Дифференциальные входы аналоговых каналов позволяют снизить влияние наводок на входные цепи модуля.

Каждый канал имеет свой дискриминатор нижнего уровня, порог которого регулируется с помощью 8-разрядного ЦАП в диапазоне от 0 до 2,55 В, и дискриминатор верхнего уровня с регулируемым порогом в диапазоне от 5 до 2,45 В.

Каждый из восьми каналов имеет пиковый детектор с запоминанием и принимает импульсы с амплитудами в диапазоне от 0 до +5 В. Сигналы с выходов пиковых детекторов оцифровываются 12-разрядными АЦП. Результат преобразования каждого канала представляет собой 16-разрядное слово, в котором 12 младших разрядов отведены для выходного кода АЦП и 3 старших разряда использованы для кода номера канала. Данные с выходов каналов передаются по системной шине в ПЛИС, в которой происходит коррекция, масштабирование кодов АЦП в зависимости от установленного режима работы и накопление спектров.

Программная установка параметров АЦП осуществляется 16-разрядными словами, в которых 8 старших разрядов использованы в качестве адресных и 8 младших разрядов использованы для передачи кода операции.

Для записи в регистры порогов используются следующие разряды слова:

D15-D13 – номер канала;

D10-D08 – код режима записи порогов;

D07-D00 – значения порогов.

Для записи в регистр управления используются разряды слова:

D10,D09 – код режима записи управляющего слова;

D06 – инкремент счетчика разравнивания/генератор псевдослучайных кодов;

D05 – запись в память восемь одномерных

спектров/запись в память два двухмерных спектра;

D04 – память в режиме FIFO/память в режиме гистограмм;

D03 – совпадения/антисовпадения;

D02 – автозапуск/стробирование;

D01,D00 – коэффициент преобразования АЦП 512, 1024, 2048, 4096.

Для записи в регистр чтения используются разряды слова:

D15-D13 – номер канала;

D10,D09 – код режима чтения;

D04 – разрешение/запрет чтения временной метки;

D03 – чтение данных из каналов/чтение регистра состояния;

D02 – чтение двухмерных спектров из памяти;

D01,D00 – чтение одномерных спектров из запоминающих устройств всех или выбранного канала.

Запуск работы канала может производиться либо в режиме автозапуска, либо в режиме стробирования. При автозапуске процесс преобразования инициируется входным сигналом, прошедшим через схему отбора импульсов, с амплитудой, которая соответствует выставленным значениям нижнего и верхнего порогов.

В режиме стробирования к этим условиям добавляется наличие на входе канала стробирующего импульса, который запускает процесс преобразования.

Индивидуальные входы стробирования каналов позволяют работать в режимах совпадений/антисовпадений.

Для коррекции дифференциальной нелинейности АЦП применена схема разравнивания с использованием метода скользящей шкалы, который уменьшает дифференциальную нелинейность АЦП в корень квадратный из M раз, где M – количество возможных состояний N-разрядной схемы разравнивания [7]. Работой разравнивающего ЦАП можно управлять либо с помощью счетчика, содержимое которого увеличивается на единицу после каждого завершения цикла преобразования микросхемы АЦП, либо с помощью генератора псевдослучайных кодов, реализованного в ПЛИС. Выбор производится при начальной установке режимов работы модуля.

Для улучшения линейности схемы разравнивания в микросхеме ЦАП используются только восемь старших разрядов.

В качестве собственной буферной памяти АЦП (далее по тексту – памяти) используется RAM-память микросхемы ПЛИС серии Cyclone. Блок памяти ПЛИС сконфигурирована как “true dual port memory”. Объем памяти позволяет записывать восемь одномерных спектров размером

4К × 16 разрядов либо два двухмерных спектра размером 128 × 128 × 16 разрядов.

Для подключения к ПК в АЦП используется контроллер USB. Он реализован на основе микросхемы универсального микроконтроллера Xmega128 A1 [4], микросхемы программируемой логики и микросхемы FT245R, реализующей мост между памятью типа FIFO и интерфейсом USB.

### Конструкция

АЦП выполнен в стандартном модуле КАМАК двойной ширины. Предусмотрено два варианта конструкции АЦП. Первый вариант (слева на рис. 2) является универсальным и может использоваться в относительно несложных измерительных системах с количеством каналов не более восьми и подключается к ПК по интерфейсу USB. Этот АЦП состоит из двух печатных плат: собственно 8-канального АЦП и платы контроллера USB (рис. 3)

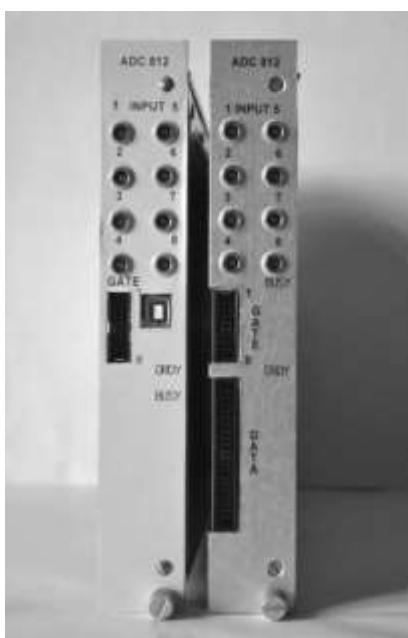


Рис. 2. Конструкция АЦП.

Второй вариант (справа на рис. 2) предназначен для работы в составе сложных многодетекторных систем и подключается к системнойшине данных и управления через 40-контактный разъем на передней панели. Контроллер шины может обслуживать до четырех таких модулей, т.е. 32 измерительных канала.

На передней панели АЦП расположены 8 разъемов LEMO для аналоговых входов, 16-контактный разъем для входов стробирования, 40-контактный разъем системной шины (вариант 2) или разъем USB (вариант 1).

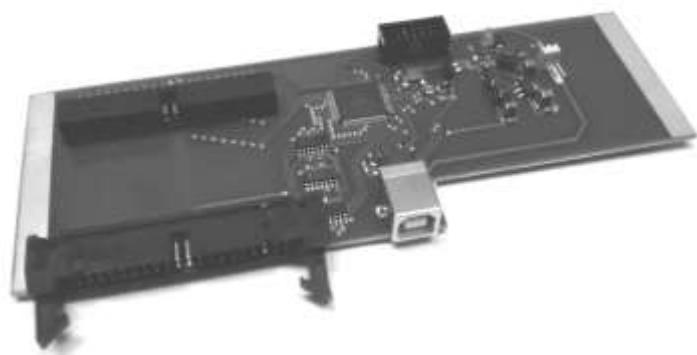


Рис. 3. Плата контроллера USB.

### Технические характеристики

8 аналоговых входов с диапазоном сигналов от 0 до +5,0 В;

8 входов стробирования для сигналов ТТЛ/NIM уровней (выбор с помощью микропереключателей);

«разрешение 9 - 12 бит (выбор программно)»;

дифференциальная нелинейность ±2 %;

интегральная нелинейность ±0,05 %;

наличие гистограммной памяти;

счетчик событий;

режимы автозапуска и стробирования;

время преобразования и считывания для каждого входа равно 3 мкс;

установка нижнего и верхнего порогов дискриминации для каждого входа;

собственная буферная память 32К × 16 бит;

интерфейсы: системная шина данных и управления, USB;

конструкция: модуль КАМАК двойной ширины.

### Программное обеспечение

Программное обеспечение АЦП реализовано на графическом языке программирования G в среде Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) [5].

Созданное программное обеспечение фактически является виртуальным прибором и состоит из трех основных частей:

лицевой панели (интерфейса оператора) АЦП на экране подключенного ПК;

блока диаграммы, содержащий код программы в графическом виде;

драйвера, через который программа работает с АЦП.

В отличие от языков с последовательным выполнением команд, таких как С и С++, данное программное обеспечение содержит в себе информацию о том, какие части программы следует выполнять параллельно. Для максимального использования всех преимуществ многоядерной

архитектуры процессоров современных ПК предусмотрены участки программы, которые должны выполняться независимо, т.е. реализован многопотоковый режим работы.

В качестве коммуникационного шлюза с АЦП программа использует наиболее распространенный в ПК порт USB 2.0.

Данные от АЦП поступают в программный буфер в памяти ПК. Далее, согласно расставленным приоритетам, обработанные данные записываются на жесткий носитель и параллельно отображаются на восьми графиках (в соответствии с количеством каналов) в виде гистограмм. Реализованные режимы работы: «СТАРТ», «ПАУЗА», «ПРОДОЛЖИТЬ», «СТОП». Первый и последний режимы соответствуют началу и концу эксперимента. Записанный файл данных в своем наименовании содержит дату и время начала эксперимента, а системные дата и время закрытия файла соответствуют его окончанию. К началу регистрации событий («СТАРТ»), а также в промежутке «ПАУЗА»/«ПРОДОЛЖИТЬ» оператор имеет возможность изменять начальные установки АЦП, например верхнего/нижнего порога дис-

криминаторов. Установка порогов происходит отдельно по каждому из восьми входов АЦП.

В программе предусмотрена защита от неосознанных действий оператора, которые могут привести к остановке или изменению хода измерений.

На рис. 4 представлен вид лицевой панели АЦП в режиме накопления. Программа позволяет одновременно вести накопление 8 спектров, при этом для построения гистограмм используются усредненные данные. 8191 канал превращается в 819, что вполне достаточно для понимания состояния текущих процессов.

В режиме измерений Е - ΔЕ программа обеспечивает накопление данных по четырем парам входов АЦП (четырем телескопам) входных данных и результирующий график Е - ΔЕ к каждой паре. Пример накопленного спектра в одном из восьми входных каналов представлен на рис. 5, при этом по нечетным входным каналам накапливаются спектры от детектора Е, а по четным – ΔЕ.

На рис. 6 представлен пример лицевой панели программы в режиме отображения зависимости удельных потерь энергии от энергии для пяти типов заряженных частиц.

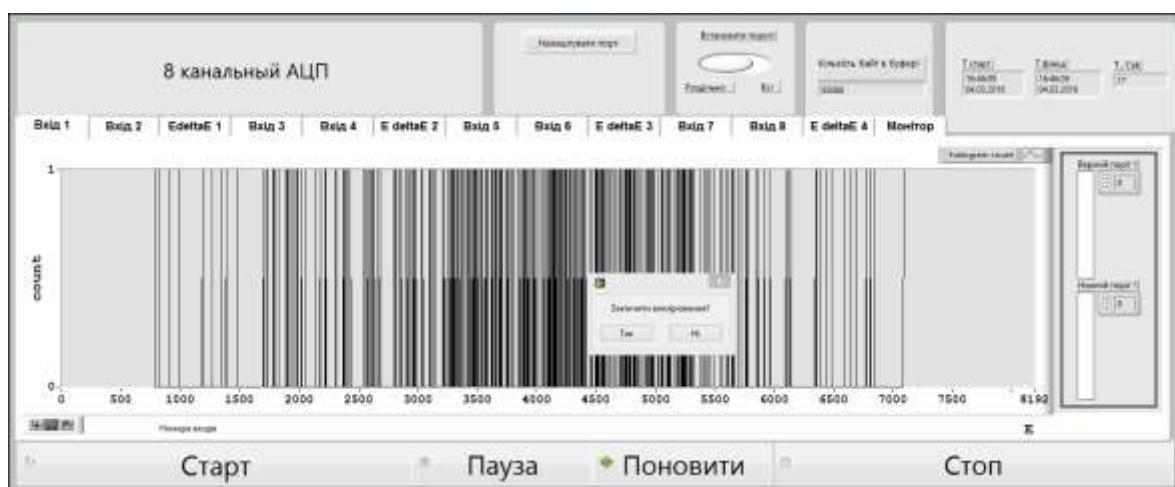


Рис. 4. Работа программы в режиме накопления.

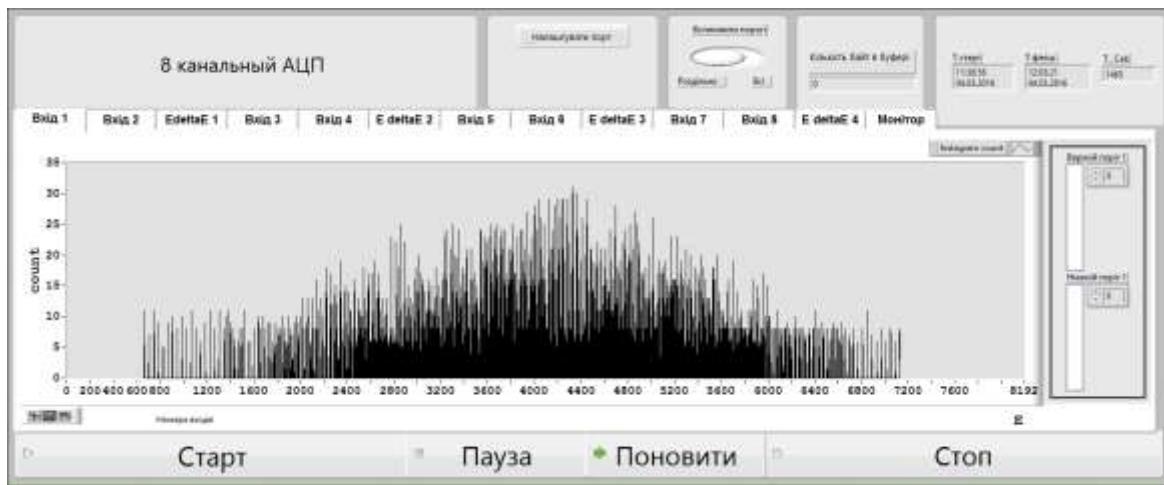


Рис. 5. Накопленный спектр в одном из входных каналов АЦП.

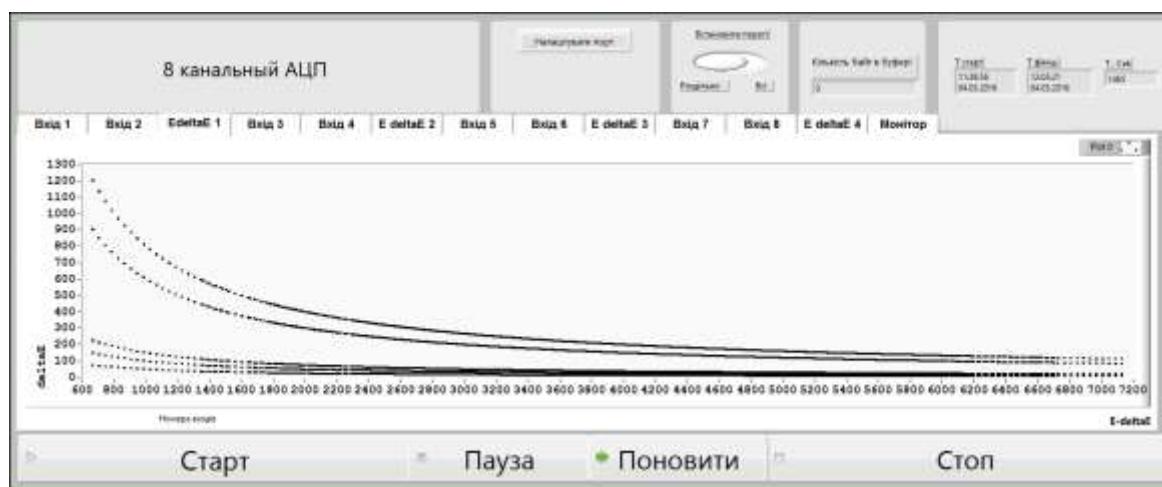


Рис. 6. Удельные потери энергии заряженных частиц.

## Выводы

Использование программируемой логики и символьного программирования обеспечивают гибкую архитектуру, возможность вариации функциональных параметров рассмотренного АЦП применительно к конкретным методикам экспериментального исследования ядерных реакций. Наличие виртуальной панели АЦП делает его удобным в использовании. Стабильность работы и высокая пропускная способность представленного спектрометрического АЦП обеспечивается за счет:

применения современной элементной базы; параллельной обработки сигналов от нескольких источников;

применения для преобразования быстродействующих АЦП;

использования быстрой системной шины передачи данных для сбора информации от нескольких модулей измерительной системы;

наличия многофункциональной буферной памяти в АЦП;

подключения к ПК по скоростному интерфейсу USB.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войтер А.П., Павленко Ю.М., Доронін М.І. та ін. Вимірювальна система з гнучкою архітектурою // Щорічник-2011. - К.: Ін-т ядерних дослідж., 2012. - С. 83.
2. Строгонов А. Проектирование комбинационных схем на базе ПЛИС // Компоненты и технологии. - 2008. - № 5. - С. 148 - 151.
3. Гаврилов Л.Е. Основы ядерной электроники. Часть 1. - М.: НИЯУ МИФИ, 2010. - 164 с.
4. Королев Н. AVR-контроллеры: развитие семейства. Часть 1 // Компоненты и технологии. - 2010. - № 5. - С. 82 - 86.
5. Мошкин В., Бессонов А., Батоврин В. LabVIEW. Практикум по электронике и микропроцессорной технике. - М.: ДМК-Прес, 2014. - 182 с.
6. Режим доступа к ресурсу: [www.altera.com](http://www.altera.com)
7. Cottini C., Gatti E., Svelto V. A new method of analog to digital conversion // Nucl. Instrum. Methods. - 1963. - Vol. 24. - P. 241 - 250.

**А. П. Войтер, М. И. Доронін, О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

## ВОСЬМИКАНАЛЬНИЙ СПЕКТРОМЕТРИЧНИЙ АЦП З ПРОГРАМОВАНОЮ ЛОГІКОЮ

Розглянуто архітектуру, принципи роботи, програмне забезпечення і конструкцію восьмиканального спектрометричного АЦП з програмованою логікою для багатопараметричних вимірювальних систем дослідження ядерних реакцій.

*Ключові слова:* експеримент, ядерні реакції, АЦП, ПЛІС, графічна мова програмування.

**A. P. Voiter, M. I. Doronin, A. M. Kovalev, O. O. Gavrylov**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

## EIGHT-CHANNEL SPECTROMETRIC ADC WITH PROGRAMMABLE LOGIC

The architecture, operating principles, software and design of eight-channel spectrometric ADC with programmable logic for multiparameter measurement systems research nuclear reactions is considered.

*Keywords:* experiment, nuclear reactions, ADC, FPGA graphical programming language.

## REFERENCES

1. *Vojter A.P., Pavlenko Yu.M., Doronin M.I. et al.* // Annual report-2011. - Kyiv: Int yadernikh doslidzh., 2012. - P. 83. (Ukr)
2. *Stroganov A.* // Komponenty i tekhnologii. - 2008. - No. 5. - P. 148 - 151. (Rus)
3. *Gavrilov L.E.* Fundamentals of nuclear electronics. Part 1. - Moskva: NIYaU MIFI, 2010. - 164 p. (Rus)
4. *Korolev N.* // Komponenty i tekhnologii. - 2010. - No. 5. - P. 82 - 86. (Rus)
5. *Moshkin V., Bessonov A., Batovrin V.* LabVIEW. Practical work on electronics and microprocessor technology. - Moskva: DMK-Pres, 2014. - 182 p. (Rus)
6. *Resource access: www.altera.com*
7. *Cottini C., Gatti E., Svelto V.* A new method of analog to digital conversion // Nucl. Instrum. Methods. - 1963. - Vol. 24. - P. 241 - 250.

Надійшла 26.01.2016  
Received 26.01.2016