

## Генератор сигналов возбуждения электромагнитного поля для системы транспортировки ионного пучка в вакуумную камеру масс-спектрометра

© Ю.В. Тубольцев,<sup>1,2</sup> В.Т. Коган,<sup>1,2</sup> А.А. Богданов,<sup>1</sup> Ю.В. Чичагов,<sup>1</sup> А.С. Антонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: tuboltsev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 16 июня 2014 г.)

Описан высоковольтный высокочастотный генератор сигналов возбуждения электрического поля для системы транспортировки ионного пучка от атмосферного источника ионов в вакуумную камеру масс-спектрометра. Сигналы возбуждения представляют собой два высокочастотных синусоидальных сигнала одинаковой амплитуды и противоположной фазы. Амплитуда и частота сигнала регулируются от 20 до 100 В и от 10 до 1 МГц. Генератор также вырабатывает регулируемое напряжение смещения от 50 до 200 В. Управление частотой и амплитудой сигналов, а также регулировка напряжения смещения осуществляются программно с компьютера по USB-интерфейсу.

### Введение

Автоматизированные системы определения состава нелетучих соединений, являющихся важными маркерами исследуемых процессов, широко применяются в научных исследованиях при технологическом контроле в промышленности, а также при проведении диагностики заболеваний в медицине. Масс-спектрометрия как один из наиболее чувствительных и универсальных методов проведения подобных исследований [1], в настоящее время дает наиболее полную информацию при определении молекулярного и элементного составов проб.

Аналитические характеристики масс-спектрометров, их быстродействие, возможность проведения анализа в режиме реального времени, а также возможность применения в полевых условиях в значительной степени зависят от характеристик и параметров электронных систем управления. Одним из важнейших узлов масс-спектрометрического тракта является источник ионов, в котором осуществляется ионизация исследуемого вещества.

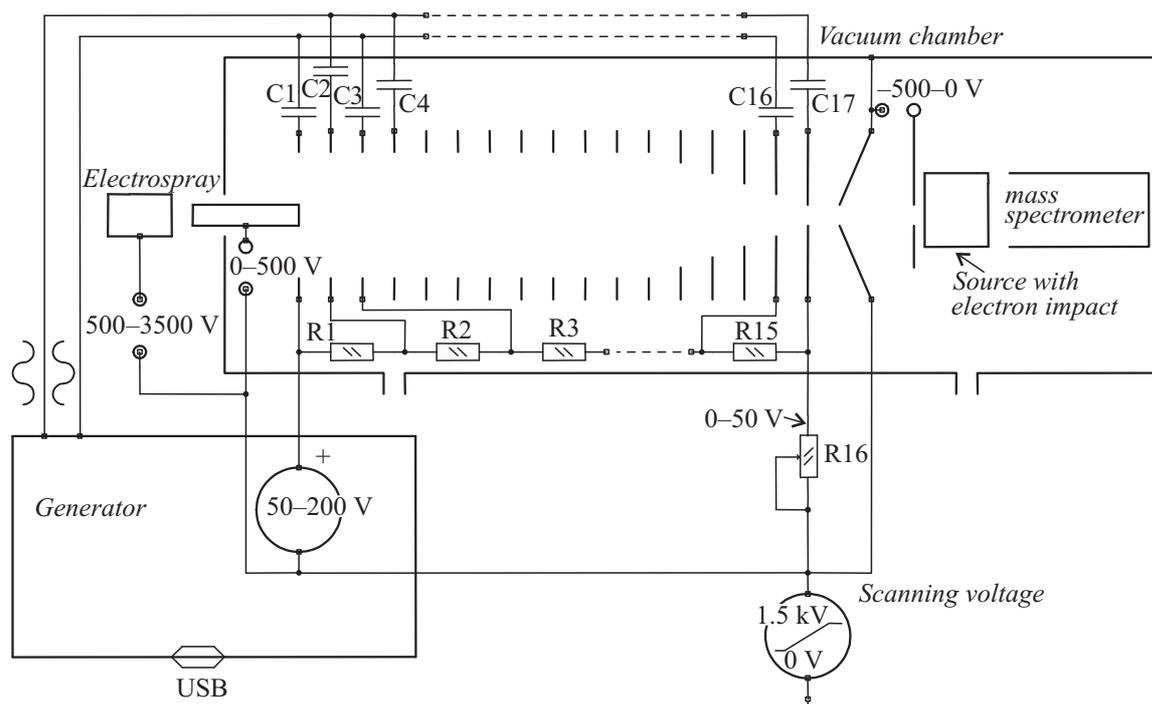
В масс-спектрометрии в последние годы были разработаны специальные методы ионизации нелетучих соединений при атмосферном давлении. Одним из наиболее успешных методов получения ионов нелетучих соединений в газовой фазе является метод ионизации распылением в электрическом поле — электроспрей [2]. При его использовании доставка ионов в высоковакуумную камеру масс-спектрометра осуществляется транзитом через форвакуумную область под действием комбинации постоянного и переменного электрических полей. При этом возникает проблема размытия пучка из-за рассеяния на атомах и молекулах среды и влияния сил пространственного заряда, что приводит к значительному уменьшению ионного тока, а следовательно, и

чувствительности всей измерительной системы. Поддерживать параметры пучков заряженных частиц в пределах допустимых разбросов, используя лишь статические ионно-оптические системы, проблематично.

Существенно уменьшить потери ионов в форвакуумном тракте можно, используя „ионную воронку“, предназначенную для удержания и фокусировки ионов в условиях форвакуума за счет формирования на ее электродах комбинации постоянного и переменного электрических полей [3,4]. Для удержания ионов в области ионной воронки на электроды должны подаваться два синусоидальных высоковольтных высокочастотных сигнала. Их напряжения должны быть одинаковы по амплитуде, а фазы следует чередовать на четных и нечетных электродах. На электроды также должны подаваться постоянные напряжения, обеспечивающие понижение потенциала для каждого последующего электрода ионной воронки, расположенного в направлении предполагаемого движения транспортируемых ионов.

В рамках совместной исследовательской программы Федерального медицинского исследовательского Центра им. В.А. Алмазова, лаборатории масс-спектрометрии Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН и кафедры космических исследований СПбГПУ, создается портативный масс-спектрометр для определения летучих соединений в выдыхаемом воздухе, одним из узлов которого является система транспортировки ионного пучка от атмосферного источника ионов (электроспрея) в вакуумную камеру масс-спектрометра.

Создание малогабаритных систем подобной направленности позволит существенно расширить применение высокочувствительного масс-спектрометрического метода для ранней диагностики заболеваний сердечно-сосудистой и эндокринной систем, органов дыхания и пищеварения и др., заменив на предварительной ста-



**Рис. 1.** Система транспортировки ионного пучка от атмосферного источника ионов в вакуумную камеру масс-спектрометра. R1–R17 — резисторы 180 кΩ. C1–C17 — конденсаторы 1000 пФ.

дии сложнее и дорогостоящие стационарные масс-спектрометрические системы.

В настоящей работе описывается программно-управляемый высоковольтный высокочастотный генератор сигналов возбуждения электрического поля для системы транспортировки ионного пучка от атмосферного источника ионов в вакуумную камеру масс-спектрометра.

## 1. Описание системы транспортировки ионного пучка. Требования к генератору сигналов возбуждения

На рис. 1 представлена структурная схема системы транспортировки ионного пучка от атмосферного источника ионов в вакуумную камеру масс-спектрометра. Для получения ионов в газовой фазе из нелетучих соединений жидкой пробы, полученной из конденсата выдыхаемого воздуха пациента, используется электро-спрей. Транспортировка ионного пучка осуществляется с помощью форвакуумной камеры, содержащей „ионную воронку“.

Ионная воронка состоит из последовательно расположенных осесимметричных кольцевых электродов. Для создания переменного электрического поля, удерживающего ионы в области ионной воронки, на электроды должны подаваться два синусоидальных высоковольтных высокочастотных сигнала. Напряжения должны быть одинаковы по амплитуде, а фазы следует чередовать на четных и нечетных электродах. Для успешной работы ионной воронки с заряженными частицами в широком

диапазоне изменения их масс и зарядов предлагается иметь возможность установки частоты от 10 кГц до 1 МГц и амплитуды сигнала от 20 до 100 В (размах сигнала от 40 до 200 В).

На электроды также должны подаваться постоянные напряжения, обеспечивающие понижение потенциала для каждого последующего электрода ионной воронки, расположенного в направлении предполагаемого движения транспортируемых ионов. Это должно обеспечиваться регулируемым источником постоянного напряжения 50–200 В и делителем напряжения, выполненным на резисторах R1–R16. Синусоидальные колебания подаются на электроды через разделительные конденсаторы C1–C17. Причем рассеиваемая мощность на резисторах и конденсаторах должна быть ограничена, поскольку они будут размещены внутри вакуумной камеры.

Важным требованием является то, что все сигналы возбуждения должны вырабатываться относительно сканирующего напряжения, изменяющегося от 300 В до 1.5 кВ. Управление их частотой и амплитудой, а также управление источником постоянного напряжения должно осуществляться программно с компьютера по USB-интерфейсу.

## 2. Описание генератора

На рис. 2 представлена структурная схема программно-управляемого генератора высоковольтных сигналов возбуждения электромагнитного поля для системы транспортировки ионного пучка от атмосферного источника ионов в вакуумную камеру масс-спектрометра.

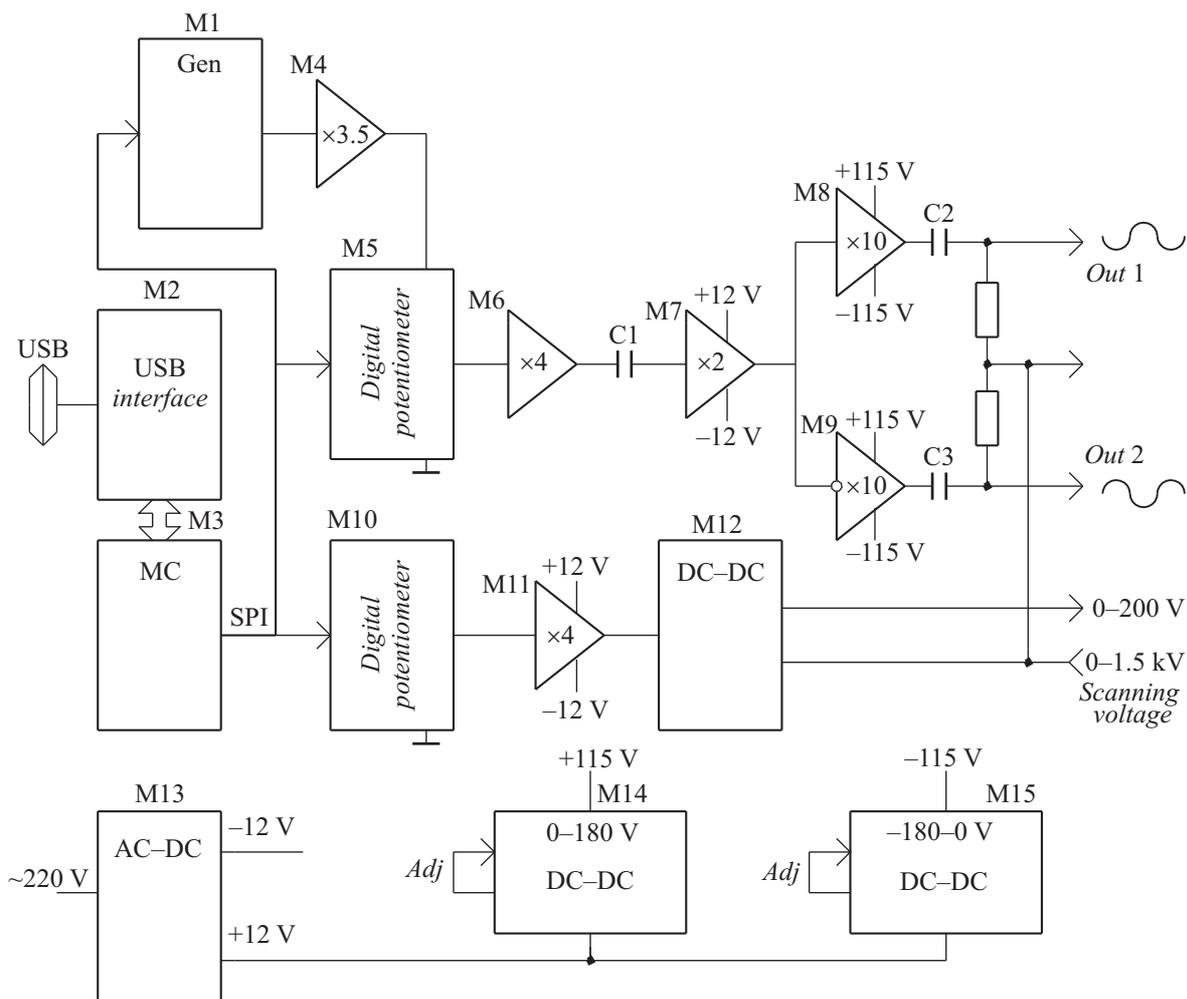


Рис. 2. Структурная схема программно-управляемого генератора.

Задающий генератор синусоидальных колебаний M1 выполнен на микросхеме AD9833. Форма и выходная частота сигнала генератора задаются программно. AD9833 представляет собой программируемый генератор синусоидальных, треугольных или прямоугольных выходных сигналов в диапазоне частот от 0 до 12 MHz. Исходную тактовую частоту импульсов 24 MHz задает кварцевый генератор. При такой тактовой частоте обеспечивается разрешающая способность на уровне 0.1 Hz. Режим работы AD9833 программируется через последовательный интерфейс SPI путем загрузки данных в устройство в виде шестнадцатирядных слов.

Сигнал, получаемый с генератора Gen, имеет амплитуду всего 700 mV. Поэтому для дальнейшего его усиления до 100 V и управления по амплитуде используется нижеописанная схема. Усилитель M4 обеспечивает выходной сигнал около 2.5 V, подаваемый на цифровой потенциометр M5. Цифровой потенциометр, выполненный на микросхеме AD8402, предназначен для управления амплитудой сигнала. Дальнейшее усиление сигнала осуществляется масштабными усилителями M6 и M7. Следует отметить, что сигнал на выходе M6

смещен относительно нуля, и для выделения переменной составляющей служит разделительный конденсатор C1. На выходе усилителя M7 размах сигнала достигает 18 V. Оба усилителя M6 и M7 выполнены на микросхеме AD8066.

Для получения парафазных сигналов с амплитудой до 100 V используются высоковольтные высокочастотные усилители M8 и M9. Они выполнены на операционных усилителях PA98A компании Apex. Амплитуда выходного напряжения у них может составлять  $\pm 215$  V, выходной ток до 200 mA, скорость нарастания сигнала составляет  $1000$  V/ $\mu$ s. Для смещения сигналов по фазе входной сигнал подается на прямой вход D1 и инверсный вход D2 (рис. 3).

Так как делитель напряжения, на который они должны работать, находится на уровне напряжения развертки от 0.3 до 1.5 kV, то сигналы с этих усилителей подаются на пластины через высоковольтные разделительные конденсаторы C2 и C3.

Дополнительной функцией генератора для поставленной физической задачи является выработка программно-управляемого напряжения от 50 до 200 V на уровне

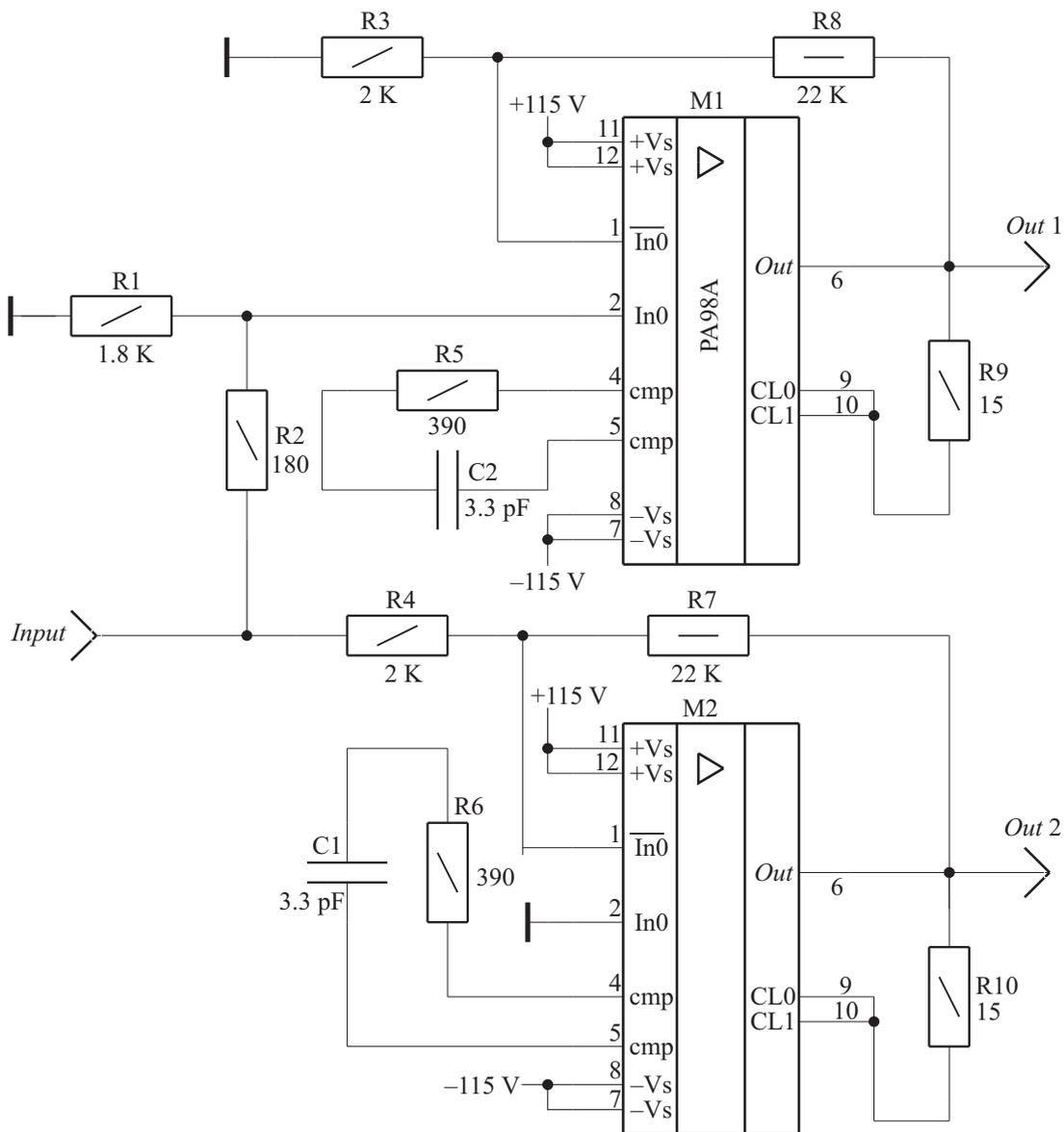


Рис. 3. Схема включения высоковольтных усилителей.

напряжения развертки 0.3–1.5 kV. Это осуществляется с помощью цифрового потенциометра M10, усилителя M11 и DC–DC-преобразователя M12. Последний выполнен на модуле с изолированным выходом G02 компании EMCO.

Связь с компьютером осуществляется с использованием USB-интерфейса M2, выполненного на специальном модуле UM245R, выпускаемом компанией FTDI. При работе с использованием данного модуля протокол передачи данных реализуется непосредственно им. Со стороны компьютера общение с модулем UM245R осуществляется через виртуальный COM-порт с помощью драйверов этой же компании FTDI. Данное решение позволяет применять хорошо известные способы работы с COM-портом и при этом сохранить такие преимущества USB как надежность и скорость передачи данных.

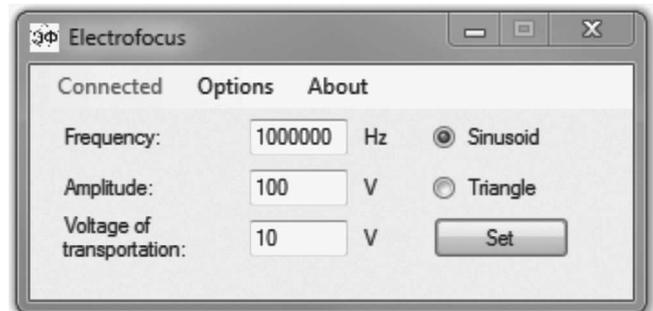


Рис. 4. Оконный интерфейс для установки параметров генератора.

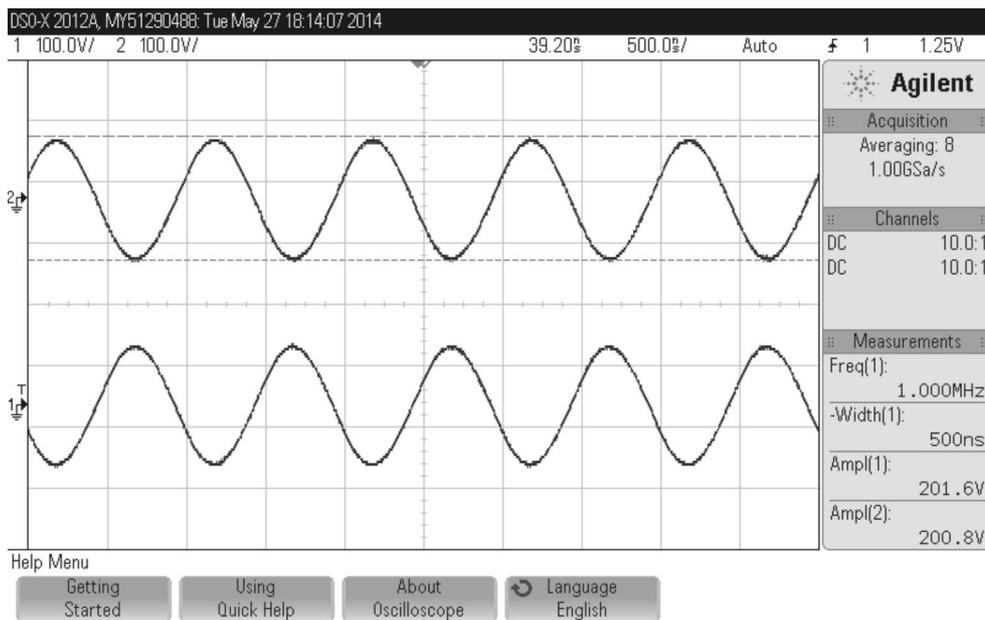


Рис. 5. Осциллограммы синусоидальных сигналов возбуждения с двух выходов генератора.

Данные из UM245R читаются микроконтроллером МС (М3) и записываются в него через двунаправленный 8-ми разрядный параллельный порт по соответствующим сигналам чтения и записи. Кроме того, микроконтроллер предназначен для установки параметров генератора и двух цифровых потенциометров. Установка параметров осуществляется по SPI-интерфейсу.

В нашем случае микроконтроллер МС выступает в виде простого ретранслятора данных между компьютером и SPI-устройствами (генератором и двумя цифровыми потенциометрами). Компьютер передает микроконтроллеру пакет байтов, содержащий адрес SPI-устройства и предназначенные для него данные, которые, по сути, являются управляющей командой для SPI-устройства. Таким образом, ответственность за формирование управляющей команды ложится на компьютерную программу, что позволяет получить полный доступ к любому из SPI-устройств, и, следовательно, использовать все их возможности, изменяя и дополняя компьютерную программу без дополнительного перепрограммирования микроконтроллера.

Протокол общения компьютера и микроконтроллера предусматривает систему защиты данных от искажений и помех, с этой целью в пакет включены байты начала передачи, окончания передачи и контрольной суммы пакета. Оконный интерфейс компьютерной программы представлен на рис. 4.

Генератор питается от сети  $\sim 220$  В, 50 Hz. Вторичные источники питания выполнены на AC-DC-преобразователе типа RS-35-12, обеспечивающем  $\pm 12$  В и четырех DC-DC-преобразователях R12-150 В с регулируемыми изолированными выходными напряжениями от 95 до 210 В. Благодаря изолированным выходам обеспечивается питание операционных усилителей PA98A

с одного DC-DC преобразователя +115 В, а с другого –115 В. В силу отсутствия на рынке малогабаритных DC-DC-преобразователей на напряжения 100–150 В с током более 100 мА, пришлось применить индивидуально для каждого выходного каскада два преобразователя R12-150В, обеспечивающих положительное и отрицательное напряжения питания.

На рис. 5 приведены осциллограммы синусоидальных колебаний на частоте 1 МГц с амплитудой 100 В или размахом сигнала 200 В.

Для испытания генератора применительно к задаче была сделана печатная плата с делителем напряжения, выполненным на 17-ти резисторах номиналом 180 к $\Omega$  и развязывающими конденсаторами 1000 пФ. Испытание генератора в течение 8 h при максимальных к нему требованиях — два сдвинутых по фазе синусоидальных



Рис. 6. Вид генератора с открытой крышкой.

сигнала с размахом 200 V и частотой 1 MHz — показали его устойчивую работу. При этом температура в корпусе не превышала 60°C. Компьютерная обработка синусоидального сигнала показала коэффициент нелинейности < 2%.

Конструктивно генератор выполнен на двух печатных платах, смонтированных в приборном корпусе, и имеет размеры 180 × 260 × 110 mm. Операционные усилители RA98A установлены на радиаторы, в корпус вмонтирован вентилятор для их обдува (рис. 6).

## Заключение

Создан программно-управляемый высоковольтный высокочастотный генератор сигналов возбуждения электрического поля, создаваемого на электродах ионной воронки системы транспортировки ионного пучка.

Генератор вырабатывает два сдвинутых по фазе на 180° сигнала с частотой от 10 kHz до 1 MHz и амплитудой выходного сигнала от 20 до 100 V. Коэффициент нелинейности сигнала < 2%. Максимально допустимый выходной ток составляет 30 mA. В генераторе имеется дополнительный управляемый источник постоянного напряжения смещения 50–200 V с выходным током от 0 до 15 mA.

Сигналы возбуждения и напряжение смещения на делитель вырабатываются относительно сканирующего напряжения развертки масс-спектрометра, изменяющегося от 300 V до 1.5 kV. Управление частотой и амплитудой, а также управление источником постоянного напряжения, осуществляется программно с компьютера по USB-интерфейсу.

## Список литературы

- [1] Fundamentals of contemporary mass spectrometry / Chhabil Dass. 2007.
- [2] Electrospray and MALDI mass spectrometry: fundamentals, instrumentation, practicalities, and biological applications / Ed. by R.B. Cole. 2<sup>nd</sup> ed. 2010.
- [3] Marginean I., Page J.S., Tolmachev A.V., Keqi Tang, Smith R.D. // Anal Chem. 2010. Vol. 82. N 22. P. 9344–9349.
- [4] Kelly R.T., Tolmachev A.V., Page J.S., Keqi Tang, Smith R.D. // Mass Spectrom. Rev. 2010. Vol. 29. N 2. P. 294–312.