

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ  
МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

© 2013 г. В. Т. Черепин, В. И. Василенко, Т. А. Красовский\*

*Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины  
Украина, 03142, Киев, просп. Вернадского, 36**\*Физико-технический учебно-научный центр НАН Украины  
Украина, 03142, Киев, просп. Вернадского, 36*

Поступила в редакцию 26.09.2012 г.

Разработан малогабаритный высокочастотный генератор прямоугольных знакопеременных импульсов напряжения для питания цилиндрического электрода в камере монополюсного масс-спектрометра. Положительная и отрицательная амплитуды импульсов линейно возрастают от нуля до +150/–180 В за время ~10 мин, а частота линейно убывает от 2 до 1.4 МГц. Постоянная составляющая отрицательной полярности, необходимая для работы масс-спектрометра, создается за счет неравенства положительной и отрицательной амплитуд относительно общего провода. Получены спектры газов с атомными массами от 1 до 130.

DOI: 10.7868/S0032816213050029

В большинстве систем питания масс-спектрометров традиционно используются высокочастотные генераторы синусоидальных колебаний частотой 1.5–3 МГц с очень жесткими требованиями к стабильности частоты, амплитуды и формы напряжения в широком диапазоне амплитуд – от 0 до 1–2 кВ. Важным элементом таких генераторов является высокочастотный колебательный контур, габариты и параметры которого определяют габариты и параметры всего прибора. Высокая добротность контура – параметр, сильно зависящий от температурных и механических воздействий окружающей среды, поэтому трудно обеспечить стабильную работу генератора.

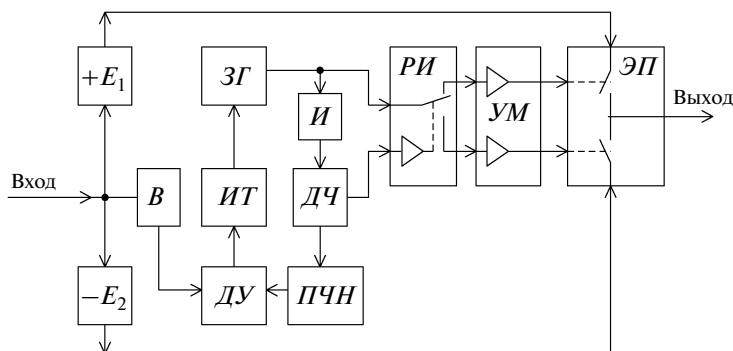
В то же время известны [1, 2] попытки применить для питания цилиндрического электрода в камере масс-спектрометра генератор прямоугольных или трапецеидальных колебаний. Экспериментальная проверка показала принципиальную возможность реализации этой идеи, однако старая элементная база, в частности быстродействие и допустимое рабочее напряжение применявшихся биполярных транзисторов, не позволили создать систему, конкурентоспособную по сравнению с традиционными высокочастотными генераторами. Известны также методы развертки спектра масс путем вариации частоты высокочастотного напряжения [3], однако реализация этого метода также наталкивалась на технические ограничения.

Современная элементная база электроники позволила разработать малогабаритный высокочастотный генератор прямоугольных знакопере-

менных импульсов напряжения, положительная и отрицательная амплитуда которых плавно изменяется по линейному закону от нуля до +150/–180 В со скоростью ~15 В/мин. Постоянная составляющая отрицательной полярности, необходимая для работы масс-спектрометра, в данном генераторе создается за счет неравенства положительной и отрицательной амплитуд относительно общего провода. Начальная частота этого напряжения 2 МГц.

На рис. 1 приведена блок-схема генератора высокой частоты, а на рис. 2 – его принципиальная схема. Задающий генератор  $3Г$  (рис. 1) на микросхеме  $D_1$  вырабатывает прямоугольные импульсы напряжения с начальной частотой 4 МГц и скважностью ~3. Эти импульсы с ее вывода 7 поступают на вход  $In1$  электронного переключателя  $D_3$  ( $PI$  на рис. 1), а также через задерживающую  $RC$ -цепочку на вход  $In1$  инвертора  $D_2$  и далее на счетный вход  $C1$  триггера  $D_{4,1}$ , который делит частоту этих импульсов на 2.

На выходе  $Q1$  триггера образуются прямоугольные импульсы частотой 2 МГц и скважностью 2 (меандр). Они поступают на управляющий вход  $In2$  переключателя  $D_3$ , который поочередно распределяет импульсы на его входе  $In1$  на два канала –  $Out1$ ,  $Out2$ , в каждом из которых последовательности импульсов частотой 2 МГц и скважностью 6 сдвинуты друг относительно друга на 180°. Переключение микросхемы  $D_3$  происходит через интервал ~100 нс после окончания импульса на входе  $In1$ . Импульсы с выходов  $Out1$ ,  $Out2$ ,



**Рис. 1.** Блок-схема генератора импульсов.  $+E_1$ ,  $-E_2$  — источники положительного и отрицательного напряжений;  $B$  — вычитатель;  $ЗГ$  — задающий генератор;  $И$  — инвертор импульсов;  $ДЧ$  — делитель частоты на 2;  $ПЧН$  — преобразователь частота—напряжение;  $ДУ$  — дифференциальный усилитель;  $ИТ$  — источник тока;  $РИ$  — распределитель импульсов;  $УМ$  — усилители мощности;  $ЭП$  — электронный переключатель.

усиленные по мощности микросхемой  $D_5$ , поочередно отпирают мощные полевые м.о.п.-транзисторы  $T_3$ ,  $T_4$ . Поскольку потенциал истока транзистора  $T_3$  скачкообразно изменяется от  $+150$  до  $-180$  В, для управления этим транзистором необходим гальванически изолированный источник управляющих импульсов. Поэтому использован дополнительный усилитель мощности на транзисторе  $T_2$  с понижающим трансформатором  $Tр$ .

Транзисторы  $T_3$ ,  $T_4$  открываются поочередно в течение всего лишь  $1/6$  периода, т.е. на  $83$ – $120$  нс. Этого времени достаточно для полного перезаряда емкости нагрузки (емкости цилиндрического электрода в масс-фильтре —  $35$  пФ), а также проходных емкостей транзисторов  $T_3$ ,  $T_4$ . В паузах, когда оба транзистора закрыты, емкость нагрузки удерживает заряд, поэтому выходное напряжение имеет вид прямоугольных знакопеременных импульсов. Резисторы  $R_9$ ,  $R_{10}$  включены для ограничения амплитуды перезарядного тока.

Известное из [1] соотношение

$$M = \alpha V / r_0^2 f^2 \quad (1)$$

связывает массовое число  $M$  выделенного в масс-анализаторе иона с амплитудой  $V$  переменного напряжения на цилиндрическом электроде. Коэффициент  $\alpha \approx 0.16$  — отношение величины постоянной составляющей напряжения на центральном электроде к амплитудному значению этого напряжения;  $r_0$ , см — радиус электрического поля масс-анализатора;  $f$ , МГц — частота переменного напряжения. Это соотношение справедливо при условии питания электрода масс-анализатора гармоническим напряжением постоянной частоты. В нашем случае, как выявилось в процессе пробных записей спектров, при линейном возрастании амплитуды импульсного напряжения и неизменной частоте интервалы между пиками масс постепенно уменьшались, что приво-

дило к неравномерной плотности спектра. К тому же линейно возрастал ток перезаряда емкости нагрузки и паразитных емкостей выходных транзисторов. При этом квадратично возрастала мощность рассеяния на транзисторах.

Поэтому был выбран метод анализа с линейным возрастанием амплитуды напряжения от нуля до  $+150$ ,  $-180$  В и с одновременным линейным снижением частоты этого напряжения от 2 до  $\approx 1.4$  МГц. С учетом того, что в формуле (1) частота  $f^2$  — в знаменателе, скорость снижения частоты экспериментально подобрана такой, чтобы полностью скомпенсировать вышеуказанные уменьшения интервалов между пиками масс и обеспечить линейность развертки. При этом максимальная мощность рассеяния на выходных транзисторах с понижением частоты уменьшилась на  $\approx 35\%$ .

Такое снижение частоты реализуется следующим образом. Внешний сигнал развертки  $U_p = 0$ – $4.096$  В поступает через резисторы  $R_3$ ,  $R_4$  на инвертирующий вход усилителя  $A_{1.1}$  (вычитатель  $B$  на рис. 1). На этот же вход через резистор  $R_5$  подано смещение от источника  $-12.5$  В. При изменении напряжения  $U_p$  от нуля до  $4.096$  В напряжение на выходе  $Out1$  усилителя  $A_{1.1}$  изменяется от 5 до  $3.5$  В. Это напряжение является опорным для пропорционально-интегрального регулятора частоты, в состав которого входят дифференциальный усилитель  $A_{1.2}$  и источник тока на транзисторе  $T_1$ . Напряжение с выхода  $Out2$  усилителя  $A_{1.2}$  управляет током коллектора транзистора  $T_1$ . Этот ток через переключку  $J_2$  заряжает частотоподающий конденсатор  $C_1$  задающего генератора  $D_1$ .

Отрицательную обратную связь по частоте осуществляет преобразователь частота—напряжение ( $ПЧН$  на рис. 1), который содержит одновибратор  $D_{4.2}$  и фильтр  $R_7$ ,  $C_2$ . Одновибратор запускается по фронту импульсов на выходе  $Q1$  триггера. Длительность импульсов на выходе  $Q2$  одновиб-

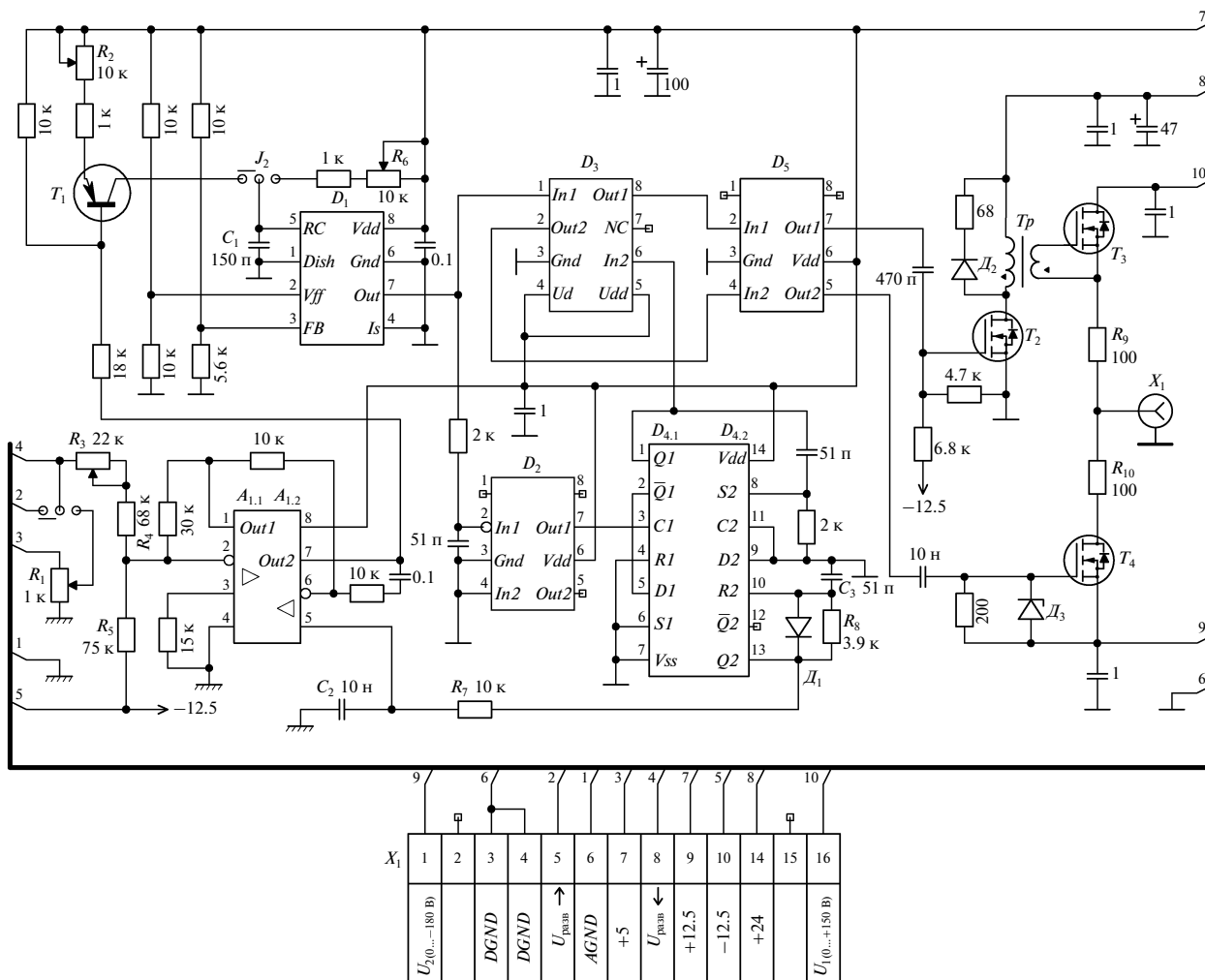


Рис. 2. Принципиальная схема генератора импульсов.  $A_1$  – LM358;  $D_1$  – UCC35705S,  $D_2$  – TPS2813,  $D_3$  – ADG419,  $D_4$  – CD4013,  $D_5$  – TPS2812;  $T_1$  – BC807,  $T_2$  – 2N7000,  $T_3$ ,  $T_4$  – IRF710;  $D_1$ ,  $D_2$  – LL4148,  $D_3$  – BVZ55-B15.

ратора постоянна и равна  $0.66(R_8C_3) \approx 100$  нс. Постоянное напряжение на конденсаторе  $C_2$  равно напряжению на инвертирующем входе усилителя  $A_{1,2}$  и пропорционально частоте выходного напряжения генератора импульсов. Начальная частота 4 МГц устанавливается потенциометром  $R_2$ . Скорость снижения частоты можно изменять потенциометром  $R_3$ .

В данной схеме предусмотрена возможность ручной установки фиксированной частоты ЗГ потенциометром  $R_6$  (в другом положении переключки  $J_2$ ), а также ручной установки сигнала развертки потенциометром  $R_1$ . Такие действия полезны при наладке и проверке прибора.

Для питания выходного электронного переключателя необходимы два напряжения ( $+E_1$  и  $-E_2$ ) относительно общего провода (“земли”). Они должны плавно изменяться по линейному закону:

$+E_1$  от нуля до +150 В,  $-E_2$  – от нуля до –180 В со скоростью  $\sim 15$  В/мин. Уровень пульсаций и шумов в обоих напряжениях должен быть не более 0.05%, поскольку пульсации уменьшают разрешающую способность масс-спектрометра.

Эти напряжения вырабатывает двухканальный блок питания, принципиальная схема которого приведена на рис. 3. Каждый канал содержит 2 каскада. Первые каскады – широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения +24 В в регулируемые постоянные напряжения, изменяющиеся в пределах +(15–159) В для  $+E_1$  и –(15–188) В для  $-E_2$ . Преобразователи имеют высокий к.п.д. (86–92%), но ограниченный диапазон изменения выходного напряжения. Кроме того, выходные напряжения содержат импульсные помехи  $\approx 1$  В на частоте преобразования 33 кГц.

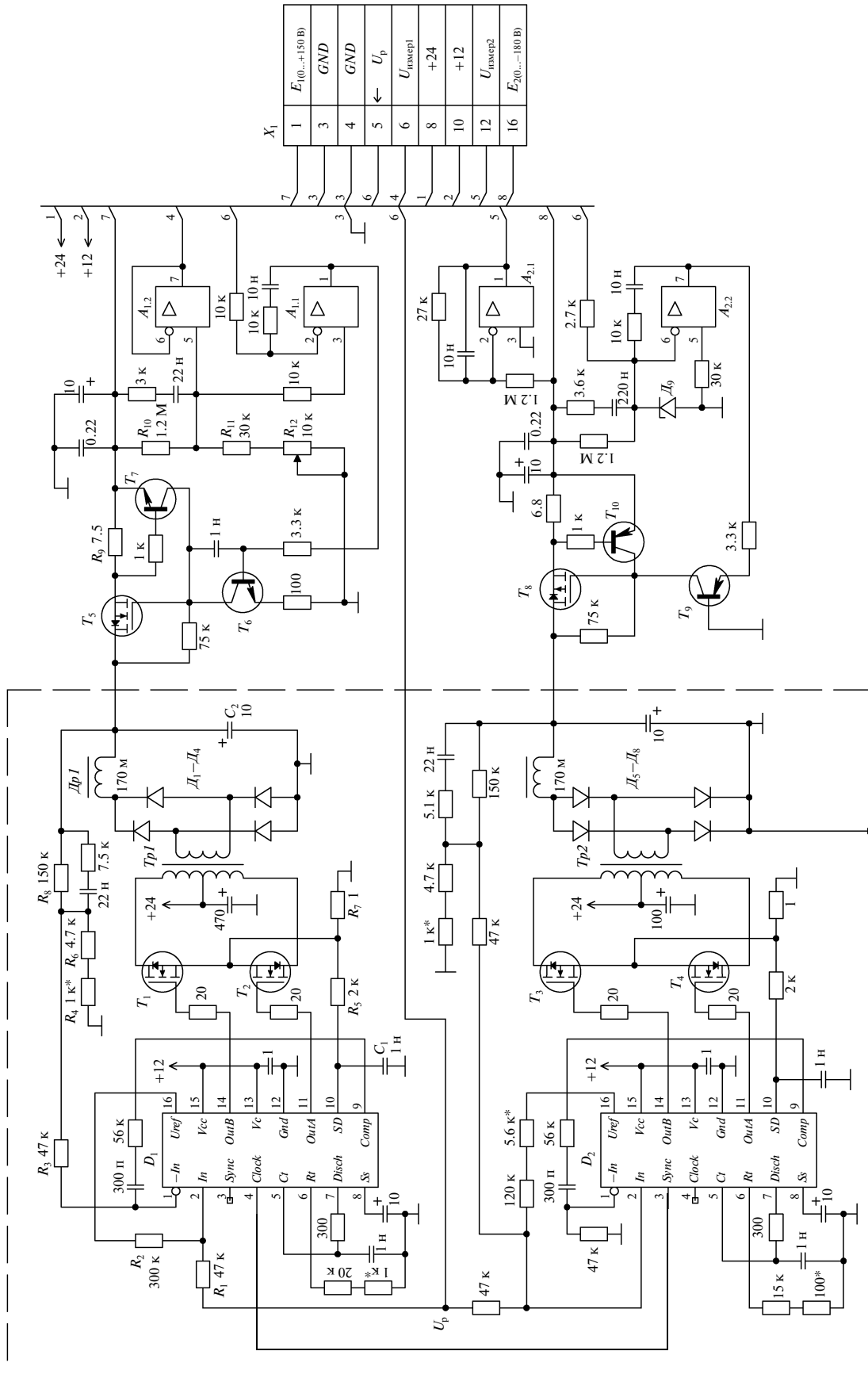


Рис. 3. Принципиальная схема блока питания генератора. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> – SG3525A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> – LM358; T<sub>1</sub>–T<sub>5</sub> – IREF640N, T<sub>6</sub> – MPSA42, T<sub>7</sub> – BC817, T<sub>8</sub> – IREF9640, T<sub>9</sub> – MPSA92, T<sub>10</sub> – BC807; Д<sub>1</sub>–Д<sub>8</sub> – ВУУ26С, Д<sub>9</sub> – ВЗУ55-В8.

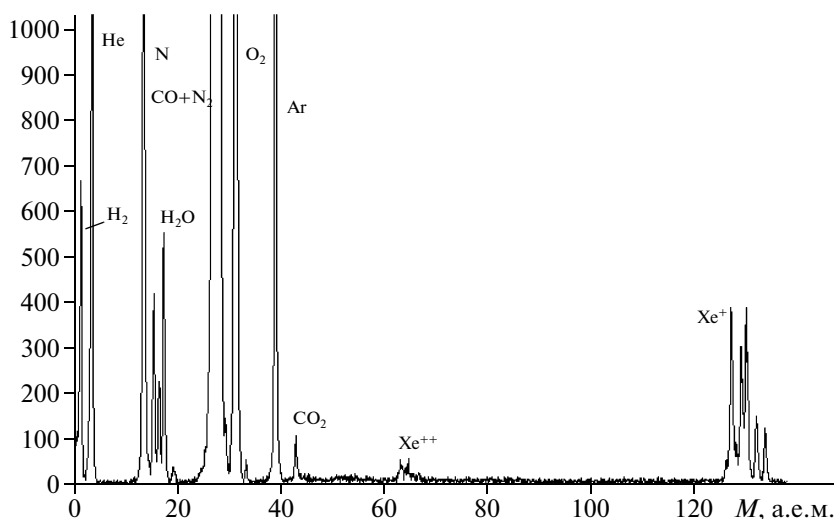


Рис. 4. Пример спектра остаточного газа с примесью ксенона.

Вторые каскады — регулируемые линейные стабилизаторы, выходные напряжения которых изменяются от 0 до +150 В и от 0 до –180 В соответственно. Шумы и пульсации выходного напряжения не превышают 30 мВ. Обои каскадами управляет напряжение развертки  $U_p$ . При этом напряжения на проходных транзисторах стабилизаторов изменяются в пределах от 15 до 9 В, а мощность рассеяния  $\leq 0.5$  Вт, что позволяет исключить радиатор и таким образом существенно уменьшить габариты блока. К.п.д., общий для двух каскадов,  $\sim 80\%$ .

На вход *In* контроллера  $D_1$  (рис. 3) подается через резистор  $R_1$  напряжение  $U_p$ . При этом на выходах *OutA*, *OutB* контроллера образуются парафазные прямоугольные импульсы частотой 33 кГц, длительность которых пропорциональна  $U_p$ . Они поочередно открывают полевые транзисторы  $T_1$ ,  $T_2$  двухтактного усилителя мощности, который питается от источника +24 В. С вторичной обмотки трансформатора  $Tr1$  повышенное напряжение симметричных импульсов подается на выпрямитель  $D_1$ – $D_4$  и далее на LC-фильтр  $Dp1$ ,  $C_2$ .

Стабилизация напряжения на  $C_2$  осуществляется с помощью отрицательной обратной связи, поступающей на вход  $-In$  контроллера  $D_1$  через резистор  $R_3$  с делителя напряжения  $R_4$ ,  $R_6$ ,  $R_8$ . При  $U_p = 0$  на выходе преобразователя должно быть минимальное напряжение 15 В (необходимое для нормальной работы последующего линейного стабилизатора), поэтому на вход *In* контроллера через резистор  $R_2$  подается ток смещения от опорного источника +5 В (с вывода 16  $D_1$ ). Для защиты преобразователя от перегрузки по току служат датчик тока  $R_7$ , фильтр  $R_5$ ,  $C_1$  и вход *SD* контроллера (Shutdown).

Напряжение с конденсатора  $C_2$  подается на вход линейного стабилизатора (транзисторы  $T_3$ – $T_5$ , микросхема  $A_1$ ). Отрицательная обратная связь осуществляется через делитель напряжения  $R_{10}$ – $R_{12}$  и дифференциальный усилитель  $A_{1,1}$ . Повторитель напряжения  $A_{1,2}$  выдает сигнал, идущий через разъем на вход аналого-цифрового преобразователя для измерения напряжения  $+E_1$  и индикации на компьютере. Датчик тока  $R_8$  и транзистор  $T_5$  служат для защиты транзистора  $T_3$  от перегрузки.

Аналогично построен импульсный преобразователь напряжения для источника  $-E_2$  ( $D_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ), с той лишь разницей, что напряжение обратной связи отрицательной полярности поступает на вход *In* контроллера  $D_2$ . Оба контроллера должны работать на одной и той же частоте преобразования, чтобы избежать увеличения пульсаций от “биения” частот. Поэтому контроллер  $D_2$  является ведомым, т.е. на его вход *Sync* (вывод 3) поданы синхроимпульсы с выхода *Clock* (вывод 4) ведущего контроллера  $D_1$ . В линейном стабилизаторе напряжения  $-E_2$  использованы транзисторы  $T_8$ – $T_{10}$  обратной проводимости, а также микросхема  $A_2$ .

С помощью переменного резистора  $R_{12}$  можно изменять в некоторых пределах коэффициент передачи стабилизатора  $+E_1$  для того, чтобы иметь возможность за счет разности  $|E_1| - |E_2|$  экспериментально подобрать оптимальное значение отношения  $\alpha = U_-/V_-$ .

Для снижения уровня электромагнитного излучения от импульсных преобразователей блок питания закрыт металлическим экраном.

Таким образом, создан компактный малогабаритный прибор, пригодный для работы в тяжелых

условиях для экологических и космических исследований. Использование импульсного генератора развертки масс-спектра с монополярным анализатором имеет перспективы при анализе газов с атомными массами от 1 до 130. Для получения спектра с бóльшим диапазоном масс потребуются бóльшие амплитуды выходных импульсов, что повлечет за собой значительное повышение мощности и соответствующий выбор элементов схемы генератора.

Одним из преимуществ питания масс-спектрометра от импульсного генератора является по-

вышение чувствительности масс-спектрометра в ~1.5 раза по сравнению с питанием от генератора синусоидальных колебаний.

На рис. 4 приведен образец спектра, полученного с применением импульсного генератора высокой частоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шеретов Э.П., Терентьев В.И.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 12. С. 2609.
2. *Шеретов Э.П., Колотилин Б.И., Сафонов М.П.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 3. С. 614.