

Электромагнитный клапан для регулируемого импульсного напуска газа

В. А. Батурин, А. Ю. Карпенко, П. А. Литвинов, С. А. Пустовойтов

Предложена простая конструкция электромагнитного клапана для импульсного напуска газа в вакуумные устройства. Длительность газового импульса может изменяться в пределах 0,3—2 мс при частотах повторения до 60 Гц. Клапан управляется небольшими импульсными токами и не создает значительных наводок.

PACS: 07.77.Gx; 37.20.+j

Ключевые слова: конструкция, клапан, напуск, газ, вакуум, частота, ток.

Батурин Владимир Андреевич, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией.

Карпенко Александр Юрьевич, мл. научный сотрудник.

Литвинов Петр Алексеевич, ст. научный сотрудник.

Пустовойтов Сергей Александрович, мл. научный сотрудник.

Институт прикладной физики НАН Украины/

Украина, 40030, г. Сумы, ул. Петропавловская, 58.

Тел. (0542) 22-30-27. Факс (0542) 22-37-60.

E-mail: baturin@ipflab.sumy.ua

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2008 г.

© Батурин В. А., Карпенко А. Ю., Литвинов П. А., Пустовойтов С. А., 2010

Введение

Клапаны для импульсной подачи газа широко используются в технике физического эксперимента и часто являются важной и даже неотъемлемой частью многих устройств. Среди таких устройств важное место занимают источники ионов, нейтральных и кластерных частиц. Молекулярные пучки малой длительности применяются для исследований в области спектроскопии, химической

динамики и взаимодействия газ—поверхность, а также могут быть полезными для времяпролетных исследований в потоках частиц [1—4]. Используя импульсные источники газа, можно создавать более интенсивные молекулярные пучки по сравнению с пучками, полученными от непрерывно действующих источников [5].

Идеальный импульсный клапан должен производить короткие по длительности и неограниченные по интенсивности газовые импульсы с высокой скоростью повторения. При этом он должен иметь простую конструкцию, высокий ресурс работы и низкую себестоимость.

Существует большое число конструкций импульсных клапанов, которые отличаются по своим характеристикам и типу исполнения, но ни одна из них не может соответствовать требованиям идеального.

Импульсные клапаны являются механическими устройствами, и как результат, ограничение их технических характеристик связано с конструктивными особенностями. Поэтому зачастую при конструировании импульсного клапана приходится находить компромисс в реализации некоторых технических характеристиках.

Все импульсные газовые клапаны можно разделить на три вида по разновидности движущей силы:

- клапаны типа "магнитной петли тока";
- пьезоэлектрические;
- электромагнитные.

• *Импульсные газовые клапаны типа "магнитной петли тока"* работают на эффекте взаимного отталкивания двух проводников, по которым проходит ток, и дают возможность формировать очень короткие газовые импульсы. В режимах одиночных импульсов они позволяют получать времена напуска газа ~10 мкс. В усовершенствованных конструкциях получают импульсы с длительностью 50 мкс на частотах порядка 10 Гц. Однако для их питания требуются большие токи, создающие высокочастотные помехи [6, 7].

• *Пьезоэлектрические клапаны* открываются за счет прогиба пьезопластинки, отличаются низким энергопотреблением и способностью работать со скоростями повторения до 750 Гц [8]. Минимальная длительность газового импульса таких клапанов составляет 100—150 мкс [9]. Однако использование малой потребляемой мощности приводит к получению небольшой силы, приводящей в действие исполнительный механизм и, как следствие, к получению малого рабочего хода. Поэтому такие клапаны не позволяют получать интенсивные молекулярные пучки. Существуют также проблемы, связанные с недостаточной прочностью пьезопластинки и ее малым прогибом [10].

• *Электромагнитные клапаны* являются наиболее простыми и наименее дорогими [11, 12], они приводятся в действие взаимодействием электромагнитного поля с ферромагнитными частями клапана. В простых конструкциях запирающий механизм клапана основан на силе восстановления спиральной пружины. Эта сила частично противодействует магнитной силе, открывающей клапан. Сильная пружина в таких конструкциях ограничивает механический ход (следовательно, уменьшает интенсивность газового импульса), а слабая пружина увеличивает время закрытия клапана (значит, и длину газового импульса).

Разработка описанного ниже электромагнитного клапана опиралась на требования, возникшие при работе с источниками ионных и кластерных пучков в импульсных режимах. Необходимость напуска газа в такие источники с регулируемой длительностью газового импульса и высокой частотой его повторения привела к разработке простого по конструкции и высокостабильного в работе импульсного электромагнитного клапана, работающего с частотой повторения до 60 Гц при длительности газового импульса от сотен микросекунд до единиц миллисекунд.

Конструкция клапана

Конструкция клапана напоминает устройство, описанное в работе [12], где авторы провели модификацию клапана фирмы General Valve. Основной отличительной особенностью представленного клапана является то, что в запирающем механизме используется пластинчатая пружина, имеющая большую жесткость и меньшую массу по сравнению с массой спиральной пружины. Это позволяет увеличить быстродействие клапана и способствует уменьшению длительности газового импульса.

Конструкция импульсного газового клапана показана на рис. 1. Газовый штуцер, выполненный из магнитомягкого материала, соединен с внутренней частью корпуса из немагнитного материала. Внутри корпуса расположен якорь электромагнита, к которому жестко крепится прижимной винт с пластинчатой возвратной пружиной. С обратной стороны якоря располагается демпферная пружина. Прижимной винт имеет полость, в которую установлено вакуумное уплотнение 7 для герметизации сопла. Сопло имеет выходное отверстие и седловину и установлено на фланце. В качестве вакуумного уплотнения 10, в зависимости от назначения клапана, могут быть использованы прокладки из меди, фторопласта или резины. Внутренняя часть корпуса вакуумно-плотно прижимается к фланцу с помощью гайки 11, а при-

жимная гайка 12 удерживает катушку возбуждения и магнетомягкий кожух на корпусе клапана.

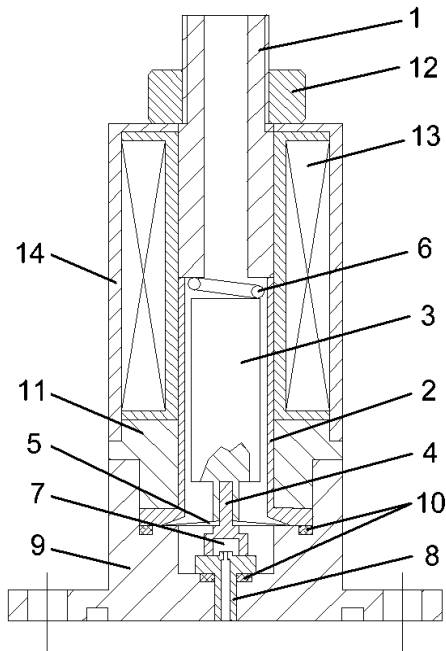


Рис. 1. Электромагнитный клапан:

- 1 — газовый штуцер; 2 — корпус; 3 — якорь электромагнита;
- 4 — прижимной винт; 5 — возвратная пластинчатая пружина;
- 6 — демпферная пружина; 7, 10 — вакуумные уплотнения;
- 8 — сопло; 9 — фланец; 11, 12 — прижимные гайки;
- 13 — катушка возбуждения; 14 — кожух

Устройство работает следующим образом. Штуцер 1 подсоединяется к объему с рабочим газом. В отсутствие электрического импульса пластинчатая пружина 5 вакуумно-плотно прижимает винт 4 с уплотнением 7 к соплу 8. При подаче электрического импульса на катушку возбуждения 13 якорь электромагнита 3 втягивается внутрь катушки и приподнимает винт 4 с уплотнением 7, в результате чего открывается отверстие в сопле 8 для напуска газа. После окончания воздействия электрического импульса пружина 5 возвращает сердечник в исходное состояние, и напуск газа прекращается. Демпферная пружина 6 служит для предотвращения возникновения эффектов дребезга при работе клапана.

Эксперимент

Для питания обмотки клапана было собрано устройство, позволяющее генерировать импульсы тока с длительностью 0,5—3 мс и изменять их амплитуду в широких пределах. Импульсы тока с частотами повторения от 1 до 60 Гц подавались на схему, изображенную на рис. 2, которая коммутирует ток в обмотке газового клапана транзисторами VT1 и VT2. Амплитуда питающих импульсов регулируется переключением обмоток трансформатора TV1, а их контроль осуществляется с шунта R3.

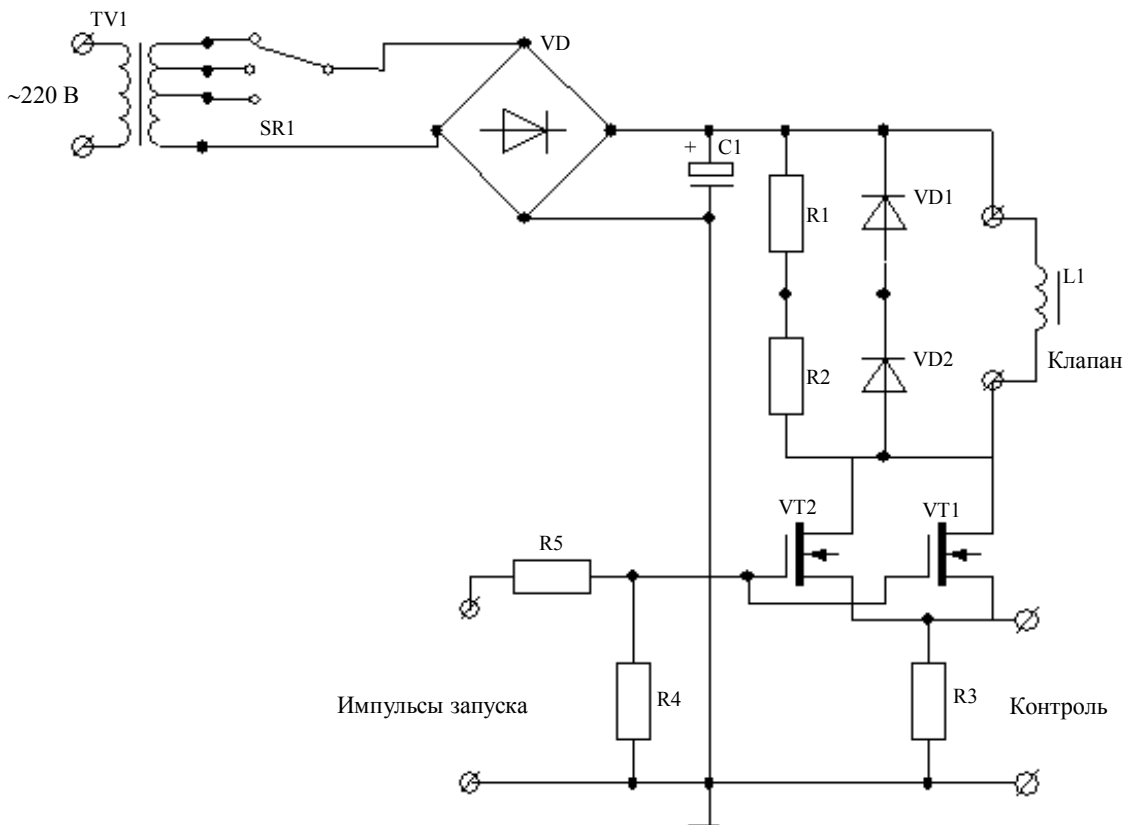


Рис. 2. Схема управления клапаном

Для измерения газовых импульсов электромагнитный клапан помещали в вакуумную камеру вместимостью 100 л, откачиваемую до давления $5 \cdot 10^{-4}$ Па с помощью диффузионного насоса производительностью 2500 л/с.

Рабочий газ под высоким давлением подавали по медной трубке, присоединенной к штуцеру 1 клапана. Измерение временных характеристик газовых импульсов производили ионизационным манометром, расположенным на расстоянии 5 мм от сопла 8. Манометр располагали так, чтобы поток газа из сопла проходил через область ионизации между анодом и коллектором. В качестве манометра использовался доработанный ионизационный преобразователь ПМИ-10-2, который вполне удовлетворял условиям быстродействия [13, 14] и может быть использован для детектирования молекулярных пучков [15—17]. Сигнал с ионизационного манометра регистрировался цифровым осциллографом.

Измерения проводили на клапане с диаметром отверстия в сопле, равном 0,5 мм. Характеристики газовых импульсов исследовали в диапазоне длительностей управляющего импульса $f = 0,5—3$ мс при питающих напряжениях $U = 120, 140, 160$ В и пластинчатых пружинах с различной жесткостью.

При испытаниях клапана в качестве газа для напуска использовали азот при давлениях до 0,5 МПа. Расхода газа измерялся дифференциальным манометром. Благодаря большому объему вакуумной камеры и хорошей скорости откачки вакуум в процессе измерений изменялся на незначительную величину.

Результаты

На рис. 3 показаны типичные осциллограммы газовых импульсов при напряжении 120 В и различных длительностях управляющего импульса.

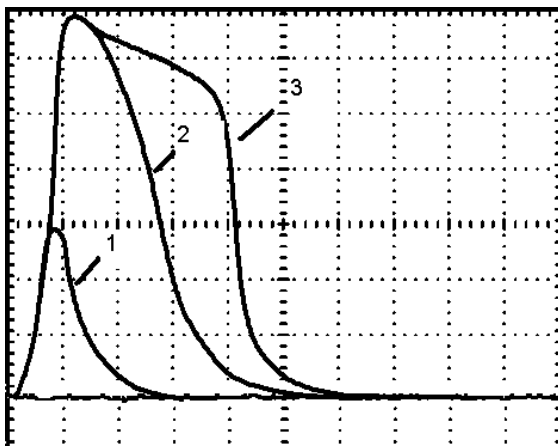


Рис. 3. Профили газовых импульсов, формируемых клапаном при давлении на входе $P = 0,2$ МПа, напряжении управляющего импульса $U = 120$ В, длительности управляющих импульсов τ , мкс:
1 — 650; 2 — 700; 3 — 800 (масштаб развертки 0,5 мс/дел)

Результаты испытания клапана показали, что минимальные длительности газовых импульсов у клапана с диаметром выходного отверстия 0,5 мм на уровне половины максимума составляли порядка 300 мкс. При фиксированном напряжении на обмотке клапана длительность газового импульса увеличивается пропорционально длительности управляющего импульса.

Основным параметром, влияющим на амплитуду газовых импульсов при заданных давлении на входе клапана, диаметре сопла и температуре, является высота подъема затвора, а именно, на сколько полным является его открывание.

При полностью открытом клапане минимальное время установления стационарного потока составляет единицы микросекунд [18], а значит, амплитуда газового импульса будет зависеть от напряжения и длительности управляющего импульса до тех пор, пока импульсный клапан не будет полностью открыт (см. рис. 3).

Уменьшение амплитуды газовых импульсов большой длительности с течением времени на осциллограммах (см. рис. 3, кривая 3) происходит из-за охлаждения катода ионизационного манометра струей газа. В ходе испытаний частота повторения газовых импульсов достигала 80 Гц. Дальнейшее повышение частоты было ограничено нестабильностью в работе ионизационного манометра. Ресурсные испытания работы клапана при таких частотах следования импульсов не проводились, но очевидно, что они будут определяться качеством изготовления пластинчатой пружины и отсутствием остаточных деформаций у материала уплотнения.

Работа клапана при частоте повторения 60 Гц демонстрируется на рис. 4, где построена огибающая серии таких импульсов. Из рис. 4 видно, что разброс амплитуды газовых импульсов почти сопоставим с вариациями нулевой линии и в основном обусловлен электрическими шумами.

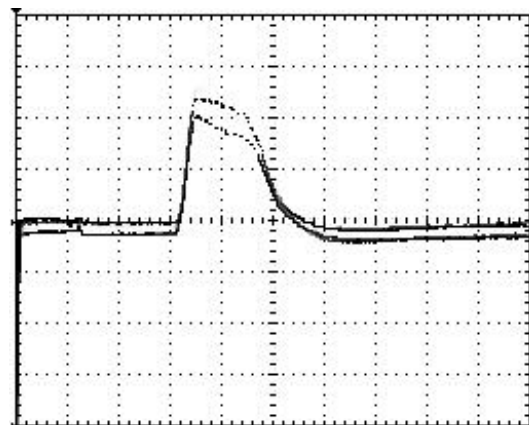


Рис. 4. Огибающие серии газовых импульсов при работе клапана с частотой повторения 60 Гц (масштаб развертки 0,5 мс/дел)

Расход газа у клапана в одиночном импульсе зависит от давления на входе в него, длительности и амплитуды управляющего импульса, а также от диаметра выходного отверстия сопла и может изменяться в широких пределах. На рис. 5 показана зависимость расхода газа от длительности газового импульса при фиксированных величинах давления газа на входе и напряжении управляющего импульса.

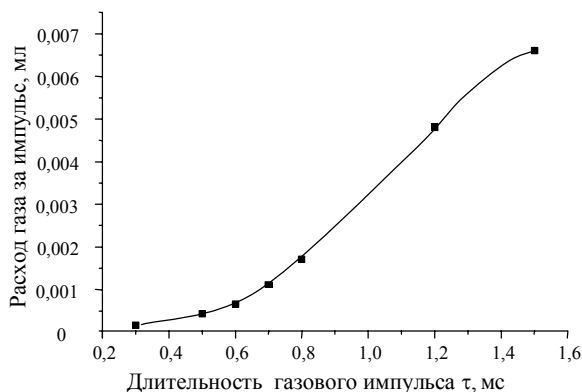


Рис. 5. Расход газа в одиночном импульсе при различных длительностях газового импульса.

Напряжение управляющего импульса $U = 160$ В, давление азота на входе клапана $P = 0,1$ МПа

Заключение

Клапан предложенной конструкции в течение нескольких лет используется в Институте прикладной физики НАН Украины для напуска газа в источники отрицательных ионов и кластерных пучков и зарекомендовал себя как надежное и удобное в работе устройство.

Отсутствие электрических наводок при работе клапана обусловлено малым током питания катушки возбуждения клапана. Установка сменного сопла и возможность использования сменных катушек возбуждения дают возможность расширить диапазон характеристик у получаемых газовых импульсов, а применение металлических или фторпластовых уплотнений позволяет использовать клапан в широком температурном интервале.

Регулировка длительностей напуска газа осуществляется изменением длины управляющего импульса. Увеличение длительности газовых импульсов фактически ничем не ограничено, и клапан может работать даже в непрерывном режиме.

Амплитуда газовых импульсов задается давлением на входе клапана и диаметром отверстия сопла при полном открывании клапана либо напряжением управляющего импульса при режимах работы, когда затвор полностью не открывается.

Описанное устройство может быть предложено для применения в различных приложениях, где необходим регулируемый импульсный напуск газа в вакуумные устройства.

Литература

1. Anderson J. B. Molecular Beams and Low Density Gasdynamics; Wegner P. P., Ed.; Dekker. — New York, USA., 1974. P. 1.
2. Gentry W. R. Atomic and Molecular Beam Methods. — Scoles G. Ed.; Oxford University Press: New York, USA., 1988. P. 54.
3. Castleman Jr. A. W., Keesee R. G.//Chem. Rev. 1986. V. 86. P. 589.
4. Smalley R. E., Levy D. H., Wharton L.//J. Chem. Phys. 1976. V. 64. P. 3266.
5. Byer R. L., Dunkan M. D.//Ibid. 1981. V. 74. No. 4. P. 2174.
6. Димов Г. И.//ПТЭ. 1968. № 5. С. 168.
7. Джентри и Джэйнс//Приб. науч. исслед. 1978. № 5. С. 31.
8. Cross J. B., Valentini J. J.//Rev. Sci. Instrum. 1982. V. 53. P. 38.
9. Proch D., Trickl T.//Ibid. 1989. V. 60. P. 713.
10. Kung A. H. et al.//Chem. Phys. Lett. 1988. V. 144. P. 427.
11. Otis C. E., Johnson P. M.//Rev. Sci. Instrum. 1980. V. 51. P. 1128.
12. Бушер Дж., Дуглас Д. // Приб. науч. исслед. 1990. V. 61. № 9. С. 65.
13. Барашкин С. Т., Сыромятников С. Н., Тютюник О. И., Породонов Б. Т., Кошелев Ю. М.//ПТЭ. 1989. № 3. С. 173.
14. Батурин В. А., Карпенко А. Ю., Коляничко С. В.//Вісник СумДУ. 2004. № 8(67) С. 138—143.
15. Зарвин А. Е., Шарфутдинов Р. Г. Динамика разреженных газов. — г. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1976. С. 19.
16. Батурин В. А., Карпенко А. Ю.//ПТЭ. 2004. № 3. С. 156—160.
17. Батурин В. А., Карпенко А. Ю.//ВАНТ. 2006. (15). № 1. С. 130—134.
18. Saenger K. L., Fenn J. B.//J. Chem. Phys. 1983. V. 79. No. 12. P. 6043.

The electromagnetic valve for adjustable pulse gas inlet

V. A. Baturin, A. Yu. Karpenko, P. A. Litvinov, S. A. Pustovojtov

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences,

58 Petropavlovskaya str., 40030, Sumy, Ukraine

E-mail: baturin@ipflab.sumy.ua

The simple design of the electromagnetic valve for pulse overlap gas inlet into the vacuum devices is offered. Duration of a gas pulse can be changed in limits 0.3—2 ms at a repetition rate up to 60 Hz. The valve supply does not create electromagnetic noise.

PACS: 07.77.Gx, 37.20.+j

Keywords: design, valve, inlet, gas, vacuum, frequency, current.

Bibliography — 18 references.

Received 19 November 2008

* * *