

УДК 615.83

А.В. Кипенский, д-р техн. наук, проф.

Р.С. Томашевский, канд. техн. наук

Куличенко В.В., Махонин Н.В

Национальный технический университет «Харьковский политехнический университет»

г. Харьков, Украина

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПОТОКА ОЗОНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

*В работе рассмотрена пневматическая система регулирования расхода озono-кислородной смеси медицинского озонатора. Для регулирования расхода использован метод широтно-импульсной модуляции, который реализуется микропроцессорной системой управления. Приведена блок-схема алгоритма работы этой системы и графики, демонстрирующие процесс автоматического регулирования расхода. Библ. 6, рис. 4.*

**Ключевые слова:** озono-кислородная смесь, медицинский озонатор, регулирование расхода, метод широтно-импульсной модуляции, микропроцессорная система управления.

*У роботі розглянута пневматична система регулювання витрати озono-кисневої суміші медичного озонатора. Для регулювання витрати використано метод широтно-імпульсної модуляції, який реалізується мікропроцесорною системою керування. Наведено блок-схема алгоритму роботи цієї системи та графіки, що демонструють процес автоматичного регулювання витрати. Бібл.6, рис. 4.*

**Ключові слова:** озono-киснева суміш, медичний озонатор, регулювання витрати, метод широтно-імпульсної модуляції, мікропроцесорна система керування.

### Введение

Метод использования озono-кислородной смеси в лечебных целях получил название – *озонотерапия* [1, 2]. Эффективность от проведения процедур по этому методу в существенной степени зависит от дозировки воздействия, которая определяется концентрацией озона (КО) в озono-кислородной смеси (ОКС) и ее расходом, как при непосредственном воздействии на организм, так и при озонировании дистиллированной воды, физиологического раствора или масла.

Для регулирования КО в ОКС наиболее часто используют электрофизический метод в сочетании с импульсной модуляцией электрической энергии, подводимой к разрядной камере, где озон образуется под действием объемного барьерного разряда [3, 4]. Расход в озонаторах регулируют различным образом, однако наиболее перспективными являются пневматические системы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) потока [5]. Основной проблемой в таких системах является недостаточное быстродействие электромагнитных клапанов (ЭМК), с помощью которых осуществляется модуляция потока кислорода, что объясняется инерционностью электрической цепи ЭМК и его пневматического канала.

**Цель** данной работы состояла в разработке такого алгоритма управления пневматической системой с широтно-импульсной модуляцией потока кислорода, который бы позволял учитывать инерционность электромагнитного клапана в пневматическом тракте озонатора и нелинейность регулировочной характеристики такой системы.

### Основной материал

Схема пневматической системы с микропроцессорным управлением приведена на рис. 1. В качестве источника кислорода для медицинского озонатора обычно используются баллоны (БК) с медицинским кислородом, снабженные редуктором (Р), или кислородная сеть медицинского учреждения. Для понижения до рабочего давления кислорода в пневматическом тракте озонатора служит регулятор давления (РД). Однако он не обеспечивает необходимую стабилизацию этого давления на своем выходе при изменении расхода ОКС.

Далее в пневматическом тракте последовательно с РД установлен ЭМК, с помощью которого осуществляется модуляция потока кислорода. Для реализации процесса измерений расхода кислорода используется датчик дифференциального давления (ДДД), установленный параллельно диафрагме (Дф), которая представляет собой сужающее устройство для создания перепада давления. В пневматическом тракте озонатора Дф установлена непосредственно после ЭМК. Зависимость расхода  $Q$  от перепада давления  $\Delta P$  на диафрагме определяется выражением [6]:

$$Q = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P},$$

где  $\alpha$  – коэффициент расширения кислорода при прохождении сужающего устройства диафрагмы;

$\varepsilon$  – коэффициент расхода;

$S$  – площадь отверстия диафрагмы;

$\rho$  – плотность кислорода.

Далее в пневматическом тракте озонатора установлена разрядная камера (РК), где непосредственно происходит синтез озона. Выход разрядной камеры фактически является выходом озонатора, к которому подключается нагрузка (Н). Обычно нагрузкой озонатора являются флаконы с жидкостями для их барботирования; пластиковые мешки, в которых осуществляется газация конечностей пациентов; контейнеры для забора ОКС в шприцы и т.д. Кроме того к нагрузке может быть отнесен пневматический тракт, с помощью которого указанные изделия соединяются с озонатором.

Формирование управляющего воздействия, которое представляет собой некоторую совокупность чисел  $N_i$ , в системе для регулирования потока кислорода методом ШИМ осуществляется микроконтроллером (МК).

Частота модуляции  $f_M$  задается цифро-импульсным преобразователем (ЦИП1) с частотно-импульсным законом преобразования (ЧИП), в который записывается число  $N_1$

$$f_M = f_P / N_1,$$

где  $f_P = 5$  кГц – рабочая частота, которая для всех ЦИП является тактирующей частотой, а для АЦП – частотой запуска преобразователя.

Длительность импульса  $\tau_{и}$  управления определяется ЦИП2 с широтно-импульсным законом преобразования (ШИП), в который записывается число  $N_2$

$$\tau_{и} = N_2 / f_P.$$

Формирование рабочей частоты  $f_P$  осуществляется ЦИП3 с ЧИП, куда записывается число  $N_3$

$$f_P = f_{ти} / N_3,$$

где  $f_{ти}$  – тактовая частота микроконтроллера, формируемая генератором тактовых импульсов (ГТИ) и задающая скорость работы МК.

Таким образом, сигнал управления  $u_y$  ЭМК будет представлять собой импульсную последовательность с частотой  $f_M$  и длительностью импульсов  $\tau_{и}$ . Усиление этого сигнала и придание ему оптимальной для срабатывания ЭМК формы осуществляется усилителем-формирователем (УФ). При периодическом открывании и закрывании ЭМК выражение для среднего значения расхода ОКС, получаемого на выходе нагрузки (Н), в первом приближении будет иметь вид

$$Q = Q_{ок} \cdot \tau_{и} \cdot f_M,$$

где  $Q_{ок}$  – значение расхода ОКС при открытом состоянии электромагнитного клапана.

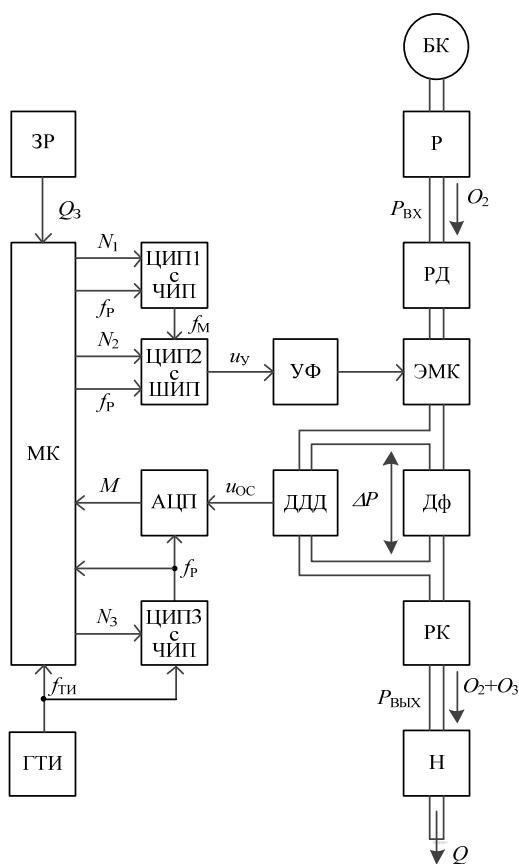


Рис. 1

Для исключения влияния возмущающих факторов (изменение давления  $P_{ВХ}$  на входе озонатора и/или пневматического сопротивления его нагрузки) на процесс регулирования и стабилизации расхода ОКС в системе управления используется цепь обратной связи с выходным сигналом  $u_{OC}$ , который снимается с выхода датчика ДДД. В силу инерционности ЭМК импульсы  $u_{OC}$ , соответствующие перепаду давления кислорода на диафрагме при регулировании расхода методом ШИМ, будут иметь форму, отличную от формы управляющих импульсов  $u_y$  (см. рис. 2).

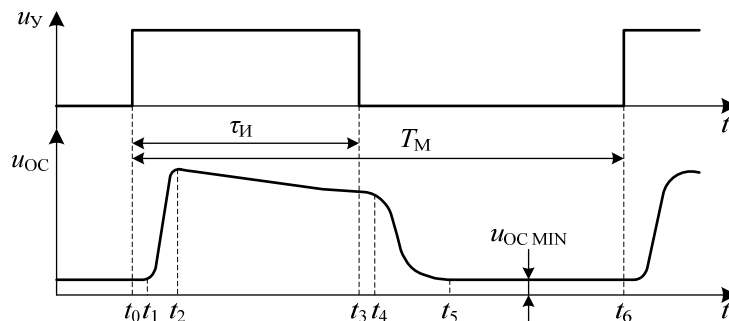


Рис. 2

При формировании фронта импульса  $u_y$  в момент времени  $t_0$  клапан остается закрытым в течение еще некоторого интервала времени до момента  $t_1$ , когда значение магнитной индукции будет достаточным для открывания ЭМК. На интервале  $t_1-t_2$  клапан открывается, что приводит к затягиванию фронта сигнала обратной связи  $u_{OC}$  (временной интервал нарастания расхода через пневматический канал). Интервал  $t_2-t_3$  соответствует включенному состоянию клапана, однако уровень сигнала обратной связи  $u_{OC}$  не постоянен, он уменьшается по мере выравнивания давления между входом и выходом диафрагмы.

В момент появления среза импульса  $u_y$  (рис. 2, момент времени  $t_3$ ) возникает ЭДС самоиндукции, которая поддерживает ЭМК в открытом состоянии до момента времени  $t_4$ . На интервале времени  $t_4-t_5$  клапан закрывается, и расход кислорода через него полностью прекращается. Выходной сигнал ДДД при этом будет иметь некоторое ненулевое значение  $u_{OC\ MIN}$ , что обусловлено схемно-конструктивным исполнением датчика. В момент времени  $t_6$  начинается формирование нового периода  $T_M$  ШИМ.

Для компенсации влияния реальных параметров импульса потока кислорода на процесс регулирования расхода ОКС, производится периодическое с частотой  $f_p$  преобразование сигнала  $u_{OC}$  в последовательность цифровых кодов  $M$ . Эти преобразования осуществляются аналого-цифровым преобразователем (АЦП), в течение периода  $T_M = 1/f_M$ .

Обработка сигнала обратной связи в медицинском озонаторе и формирование управляющего воздействия с учетом этого сигнала осуществляются в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого приведена на рис. 3.

При подаче напряжения питания на микроконтроллер, последний осуществляет запись чисел  $N_1$  и  $N_3$  в соответствующие ЦИП, а затем производится запуск ЦИПЗ для выполнения цифровых преобразований по частотно-импульсному закону, что обеспечивает формирование рабочей частоты  $f_p$ . Далее для расчета смещения сигнала обратной связи  $u_{OC\ MIN}$  на выходе датчика ДДД при нулевом расходе (см. рис. 2) осуществляется периодический запуск и опрос АЦП, а затем и определение числа  $M_{\min}$ . Кроме того, определяется значение расхода ОКС  $Q_3$ , заданное задатчиком ЗР (см. рис. 1). После этого может быть осуществлен «Запуск» системы управления.

По команде «Запуск» рассчитывается значение числа  $N_2$  в функции заданного значения расхода  $Q_3$

$$N_2 = N_{2\ IL} \cdot Q_3 / Q_{IL}$$

После записи этого числа в ЦИП2, производится запуск ЦИП1 и ЦИП2 (подача на их тактовые входы сигнала с частотой  $f_p$ ), что приводит к формированию управляющего сигнала  $u_y$ , а следовательно и к периодическому открыванию и закрыванию ЭМК.

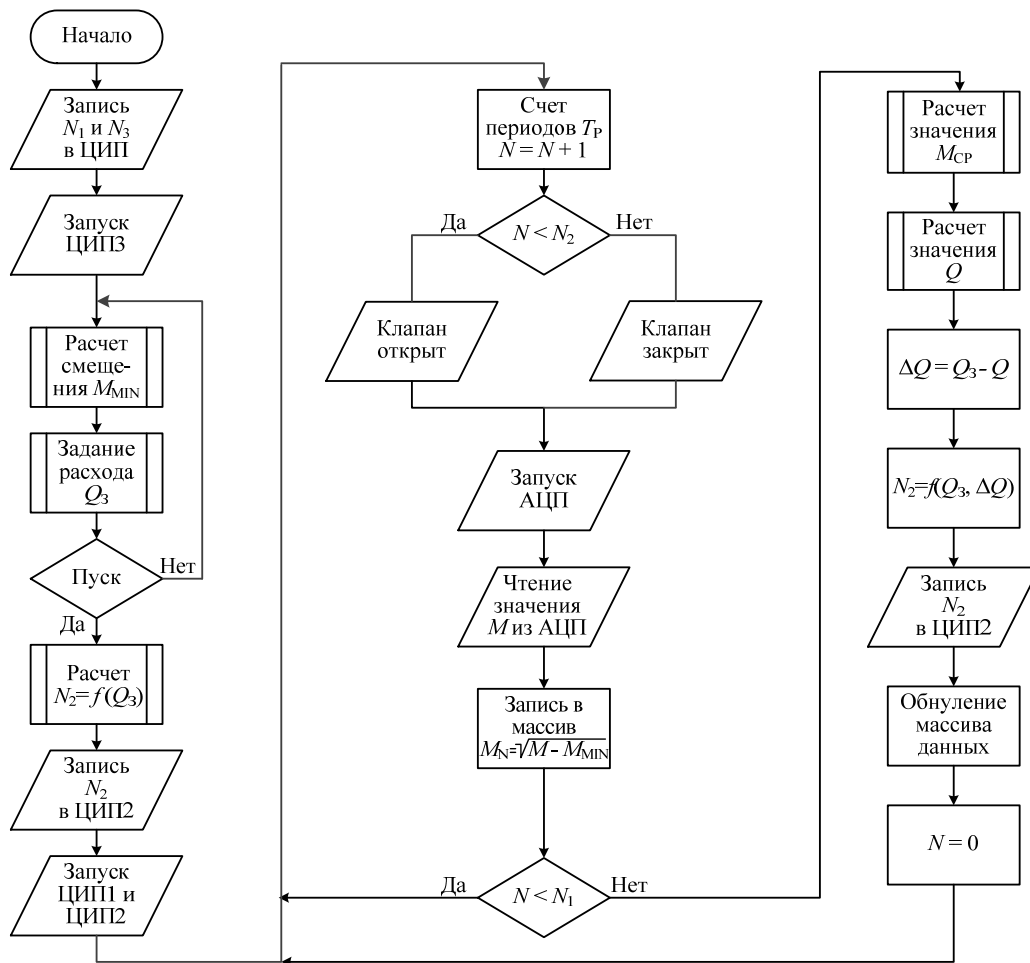


Рис. 3

Дискретность регулирования длительности  $\tau_{и}$  управляющего импульса  $u_{у}$  равна одному периоду рабочей частоты  $T_p = 1 / f_p$ . По истечении каждого такого периода (операция *счет периодов*  $T_p$ ) производится *сравнение* их количества  $N$  с числом  $N_2$ . Результат этого сравнения определяет состояние клапана, после чего с помощью АЦП (*запуск АЦП*) осуществляется преобразование сигнала  $u_{ос}$  в цифровой код числа  $M$ . Полученные значения (*чтение из АЦП*) корректируется с учетом смещения сигнала обратной связи и функции преобразования, после чего *записываются* в массив данных, расположенный в памяти МК.

При достижении числом  $N$  значения  $N_1$  (т.е. по окончании текущего периода модуляции  $T_M$ ) производится процедура определения среднего значения числа  $M_{ср}$  по выражению

$$M_{ср} = \frac{1}{N_1} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} M_i,$$

где  $i$  – порядковый номер элемента в массиве;

Далее рассчитывается значение расхода  $Q$  кислорода на текущем периоде  $T_M$  через пневматический тракт озонатора

$$Q = M_{ср} \cdot \frac{Q_{1L}}{M_{ср 1L}},$$

где  $Q_{1L} = 1$  л/мин;

$M_{ср 1L}$  – значение  $M_{ср}$ , определенное при расходе 1 л/мин.

После *вычисления* разницы  $\Delta Q$ , *определяется* значение числа  $N_2$  с учетом заданного значения расхода  $Q_3$  и отклонения  $\Delta Q$ . Это число записывается в ЦИП2, для формирования в следующем периоде  $T_M$  управляющего импульса  $u_{у}$ . Обнулением массивом данных и переменной  $N$  заканчивается очередной цикл работы системы. Далее процессы формирования управляющего воздействия полностью повторяются.

Графики, приведенные на рис. 4, демонстрируют зависимость длительности временного интервала открытого состояния ЭМК от давления кислорода на его входе при заданном значении

расхода  $Q_3 = 1,0$  л/мин. Из графиков отчетливо видно, что при повышении давления кислорода на входе озонатора, продолжительность временного интервала открытого состояния ЭМК сокращается, что и обеспечивает стабилизацию расхода ОКС.

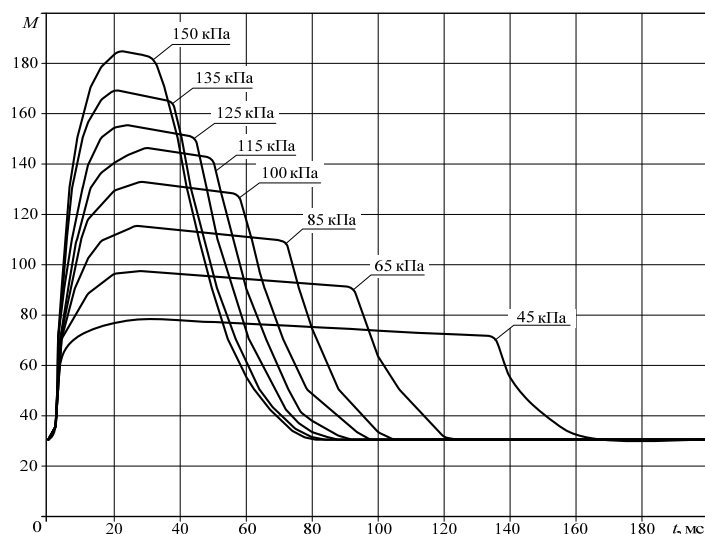


Рис. 4

Следует отметить, что для корректной работы такой системы управления необходима предварительная калибровка ДДД с целью определения значений чисел  $N_{2\text{ IL}}$  и  $M_{\text{CP IL}}$  при расходе  $Q_{\text{IL}} = 1,0$  л/мин.

#### Заключение

В итоге можно отметить, что эффективность использования метода ШИМ для регулирования расхода ОКС в медицинском озонаторе была подтверждена экспериментальными исследованиями макетного образца пневматической системы с микропроцессорным управлением. Фактические значения расхода ОКС не отличались от заданных во всем диапазоне регулирования более чем на допустимые 10 % даже при наличии предельных возмущений по входу (изменения входного давления на  $\pm 50\%$ ) и отклонений на выходе озонатора (все реальные виды нагрузки).

#### Список литературы

1. Масленников О. В., Конторщикова К. Н. Практическая озонотерапия: Пособие. – Н. Новгород: Изд-во «Вектор-ТиС», 2003. – 52 с.
2. Масленников О. В., Конторщикова К. Н. Озонотерапия: Внутренние болезни. – Н. Новгород: Изд-во «Вектор-ТиС», 2003. – 132 с.
3. Об особенностях регулирования концентрации озона в медицинском озонаторе / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, А. А. Лашин [и др.] // Материалы наук.-практ. конф. «Нові технології оздоровлення природними та преформованими факторами». – Харків: ХМАПО, 2002. – С. 229–231.
4. Сокол Е. И., Кипенский А. В., Лашин А. А. Компенсация возмущений при регулировании параметров озono-кислородной смеси в медицинском озонаторе // Нижегородский медицинский журнал. Приложение: Озонотерапия. – Нижний Новгород, 2003. – С. 313–315.
5. The Analysis of Technical Solutions for Medical Ozonators / Sokol E.I., Kipenskiy A.V., Kulichenko V.V., Tomashevskiy R.S., Barkhotkina T.M. // 2013IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). April 16-19, 2013, Kyiv, Ukraine – p. 262–265.
6. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ие, 1989. – 701 с.

#### THE CONTROL ALGORITHM OF PNEUMATIC SYSTEM WITH A PULSE-WIDTH MODULATION OF OZONE-OXYGEN MIXTURE FLOW

Kipenskiy A.V., Tomashevskiy R.S., Kulichenko V.V., Makhonin N.V.  
The National Technical University «KhPI»

The work described the pneumatic system flow control of ozone-oxygen mixtures of medical ozone generator. For flow adjustment used method of the pulse-width modulation, which is implemented by a

microprocessor control system. The flow-diagram of the algorithm of the system operation and graphs of process to automatically flow control are stated. References 6, figures 4.

**Key words:** ozone-oxygen mixture, medical ozone generator, flow control, the method of pulse-width modulation, the microprocessor control system.

1. Maslennikov O. V., Kontorshchikova K. N. Practical ozone therapy: A guide. – N. Novgorod: Publ. «Vector-TiS», 2003. – p. 52.

2. Maslennikov O. V., Kontorshchikova K.N. Ozone Therapy: Internal illnesses. . – N. Novgorod: Publ. «Vector-TiS», 2003. – P. 132.

3. About the features of controlling the concentration of ozone in medical ozone generators / E.I. Sokol, A.V. Kipenskiy, A.A. Lapshin [and other] // Materials of scientific and practical conf. «New technologies of healing by natural and preformed factors». – Kharkiv: КМААЕ, 2002. – P.229–231.

4. Sokol E.I., Kipenskiy A.V., Lapshin A.A. Compensation perturbation in the regulation of the parameters of ozone-oxygen mixture in the medical ozone generators // Nizhny Novgorod Medical Journal. Appendix: Ozone therapy. – Nizhniy Novgorod, 2003. – p.313-315.

5. The Analysis of Technical Solutions for Medical Ozonators / Sokol E.I., Kipenskiy A.V., Kulichenko V.V., Tomashevskiy R.S., Barkhotkina T.M. // 2013IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). April 16-19, 2013, Kyiv, Ukraine – p. 262-265.

6. Kremlevskiy P.P. Flowmeters and amount counters: Directory. – 4th pub. reproc. and comp. – L.: Engineering, Leningrad. department, 1989. – p. 701.