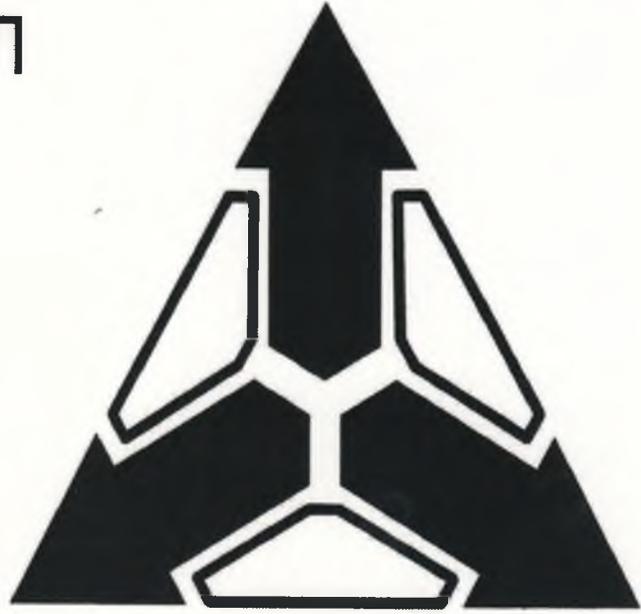


ISSN 2219-9365

МІЖНАРОДНИЙ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ  
ЖУРНАЛ



№ 1  
2015

**В**имірювальна та  
**О**бчислювальна  
**Т**ехніка в  
**Т**ехнологічних  
**П**роцесах

має високу захищеність від нестабільних діелектричних втрат, пористості і гранулометричного складу зерна.

Проведені дослідження експериментального зразка вологоміра у порівнянні із стандартним методом показали, що його метрологічні характеристики, а саме: середньоквадратична похибка вимірювання вологості дорівнює 0,049%, абсолютна похибка не перевищує 0,182%, приведена – 1,01%, дозволяють проводити контроль вологості із високою достовірністю.

## Література

1. Егоров Алексей Егорович. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / Алексей Егорович Егоров, Геннадий Никофорович Азаров, Александр Викторович Коваль [под ред. В. Г. Воронова]. – Харьков : Вища школа, 1986. – 240 с.
2. Декл. пат. 14659 Україна, МПК G 01 N 27/22. Ємнісний вологомір / Поджаренко В. О., Куцевол М. О., Куцевол О. М. ; заявник патентовласник Вінницьк. націон. техн. унів. – №u200511929 ; заявл. 12.12.05; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5. – 3 с.
3. Куцевол М. О. Двочастотний метод вимірювання вологості капілярно-шпаристих матеріалів зі значними втратами / М. О. Куцевол, О. М. Куцевол // Контроль і управління в складних системах : міжнар. наук.-техн. конф., 3-2 лют. 1999 р. : тези доп. – Вінниця : ВПІ, 1999. – С.185–188.
4. Куцевол О. М. Метод визначення ємності матеріалу зі значними діелектричними втратами / О. М. Куцевол, М. О. Куцевол // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : IX наук.-техн. конф., 30 трав.–2 черв. 2002 р. : тези допов. – Хмельницький, 2002. – С. 86–88.
5. Пат. 75699 Україна, МПК G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості / Поджаренко В. О., Куцевол М. О., Куцевол О. М. ; заявник патентовласник Вінницьк. націон. техн. унів. – №2004031999 ; заявл. 18.03.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5. – 3 с.

## References

1. Egorov A. E. Issledovanie ustroystv i sistem avtomatiki metodom planirovaniya eksperimenta. Kharkov, Vischa shkola, 1986. – 240 c.[in Russian]
2. 2. Dekl. pat. 14659 Ukraine, MPK G01N27/22. Yemnisnyi volohomir / Podzharenko V. O., Kutsevol M. O., Kutsevol O. M. – № u200511929; Zajavl. 12.12.05; Opubl. 15.05.06, Biul. – №5. – 3 c.[in Ukrainian]
3. Kutsevol M. O., Kutsevol O. M. Dvochastotnyi metod vymiriuвання volohosti kapiliamo-shparystykh materialiv zi znachnymy vtratyamy. Kontrol i upravlinnia v skladnykh systemakh: mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Vinnytsia, VPI, 1999. – С. 185–188.[in Ukrainian]
4. Kutsevol O. M., Kutsevol M. O. Metod vyznachennia yemnosti materialu zi znachnymy dielektrychnymy vtratyamy. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tehnolohichnykh protsesakh : IX nauk.-tekhn. konf. Khmelnytskyi, 2002. – С. 86–88.[in Ukrainian]
5. 5. Pat. 75699 Ukraine, MPK G01N27/22. Sposib vymiriuвання volohosti / Podzharenko V. O., Kutsevol M. O., Kutsevol O. M. – № 2004031999 ; Zajavl. 18.03.04; Opubl. 15.05.06, Biul. – №5. – 3 c.[in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 16.1.2015 р.

Надрукована/Printed :24.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Паламарчук І. П.

УДК 621.382

В.С. ОСАДЧУК, А.В. ОСАДЧУК, Я.А. ОСАДЧУК

Вінницький національний технічний університет

## МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СЕНСОР ДАВЛЕНИЯ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ

*В статье представлены характеристики микроэлектронного радиоизмерительного сенсора давления с частотным выходом в виде автогенераторной схемы на основе двух полевых транзисторов с различной проводимостью каналов и чувствительным к давлению конденсатором. На основе эквивалентной схемы микроэлектронного радиоизмерительного сенсора давления получены зависимости выходного сигнала от времени, функцию преобразования и чувствительности. Чувствительность устройства зависит от режима питания по постоянному току и величины давления, которое действует на чувствительную к давлению емкость, она изменяется от 470 до 235 Hz/mmHg.*

*Ключевые слова: сенсор давления, давление, частота, отрицательное сопротивление.*

V.S. OSADCHYK, A.V. OSADCHYK, I.A. OSADCHYK

Vinnytsia National Technical University

## MICROELECTRONIC RADIOMEASURING PRESSURE SENSOR WITH FREQUENCY OUTPUT

*The paper presents the characteristics of microelectronic radiomeasuring pressure sensor with frequency output in the form of autogenerating scheme based on two field-effect transistors with different channel conductivity and pressure-sensitive capacitor. Based on the equivalent circuit of microelectronic radiomeasuring pressure sensor output signal obtained depending on the time conversion function and sensitivity. The sensitivity of the device depends on the DC power and the pressure which acts on the pressure sensing capacitance, it ranges from 470 to 235 Hz/mmHg.*

*Keywords: pressure sensor, pressure, frequency, negative resistance.*

**Вступление**

Характеристики микрoэлектронных сенсоров давления определяют точность и надежность приборов контроля технологических процессов, характеристики окружающей среды, безопасность работы ядерных, тепловых, химических установок, летальных аппаратов, транспорта и т.д. Это определяет жесткие требования к микрoэлектронным сенсорам давления.

Одним из перспективных научных направлений в разработке радиоизмерительных микрoэлектронных сенсоров давления является использование зависимости реактивных свойств и отрицательного сопротивления полупроводниковых приборов от влияния внешних физических величин и создание на этой основе нового класса радиоизмерительных микрoэлектронных сенсоров давления. В устройствах такого типа происходит преобразование давления в частотный сигнал, что позволяет создать радиоизмерительные преобразователи по интегральной технологии и дает возможность повысить быстродействие, точность и чувствительность, расширить диапазон измеряемых величин, улучшить надежность, помехоустойчивость и долговременную стабильность параметров [1-3]. Кроме того, объединение на одном кристалле микрoэлектронного преобразователя со схемами обработки информации позволяет создание «интеллектуальных» устройств. Использование частоты как информационного параметра разрешает избежать применения усилительных устройств и аналого-цифровых преобразователей при обработке информации, что снижает себестоимость систем контроля и управления [4-6]. В данной статье представлены исследования характеристик радиоизмерительного микрoэлектронного сенсора давления с частотным выходом на основе двух МДП транзисторов, которые образуют автогенератор, частота генерации которого зависит от давления на полупроводниковую емкостную структуру.

**Теоретические и экспериментальные исследования характеристик сенсора давления**

Схема радиоизмерительного микрoэлектронного сенсора давления представлена на рис. 1. В результате различной проводимости каналов полевых МДП транзисторов VT1 и VT2 вольтамперная характеристика на выходе устройства имеет падающий участок, что соответствует появлению отрицательного дифференциального сопротивления при выборе рабочей точки на этом участке.

Таким образом, в колебательной системе автогенератора возникают электрические колебания за счет преобразования отрицательным дифференциальным сопротивлением энергии постоянного источника напряжения в энергию переменного электрического поля. Колебательная система состоит из индуктивности  $L$  и эквивалентной емкости  $C$ , в которую входит емкость существующая на электродах сток-сток полевых транзисторов VT1 и VT2, емкость  $C_1$ , которая изменяется под действием давления, и емкость  $C_2$ , защищающая источник постоянного напряжения  $U_1$  от переменного высокочастотного тока и в тоже время обеспечивая необходимую величину эквивалентной емкости колебательной системы. Сопротивления  $R_1$ - $R_2$  обеспечивают режим работы полевых транзисторов VT1 и VT2 по постоянному току.

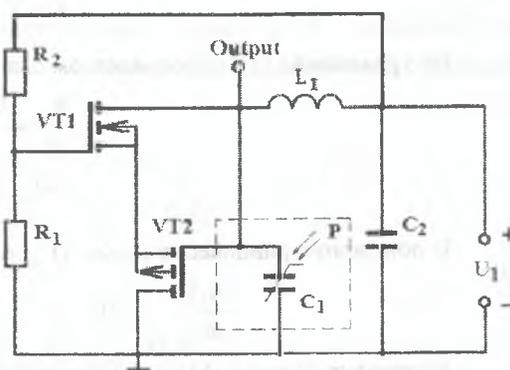


Рис.1. Электрическая схема радиоизмерительного микрoэлектронного сенсора давления

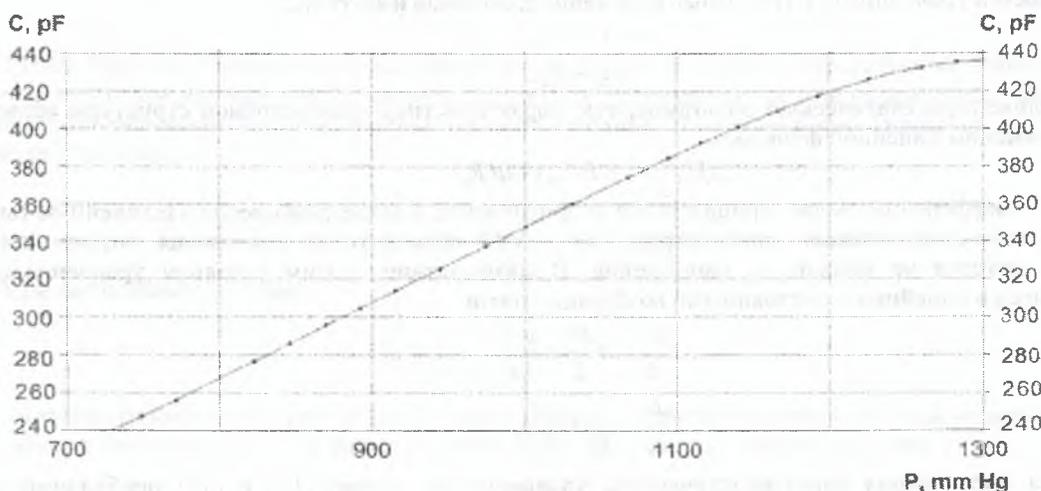


Рис. 2. Зависимость емкости первичного преобразователя от давления

Радиоизмерительный микрoэлектронный сенсор давления работает следующим образом. Выбором постоянного напряжения источника  $U_1$  добиваемся генерации электрических колебаний в контуре

автогенератора. Последующее приложение давления к мембране конденсатора  $C_1$  приводит к изменению емкости колебательной системы что, в свою очередь, вызывает изменение частоты генерации устройства. Первичный измерительный преобразователь давления представляет конденсатор с мембраной, изготовленной методом плазменного травления кремния. Ее толщина составляет 12 мкм. Электроды изготовлены методом катодного распыления меди. Зависимость емкости от давления показана на рис. 2.

Перейдем к определению функции преобразования и чувствительности радиоизмерительного сенсора давления. Эти расчеты можно сделать на основании эквивалентной схемы, которая представлена на рис. 3.

На схеме (рис.3) суммарная индуктивность  $L$  включает в себя внешнюю индуктивность колебательного контура и индуктивность выводов схемы, емкость  $C$  включает в себя внешнюю емкость  $C_1$ , которая

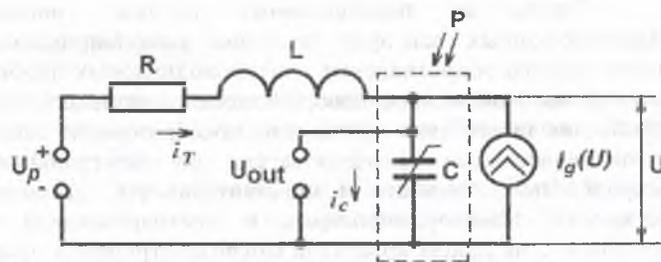


Рис. 3. Эквивалентная схема радиоизмерительного сенсора давления

зависит от давления, внешнюю емкость  $C_2$ , а также внутреннюю емкость полевых транзисторов VT1 и VT2 на электродах сток-сток. Сопротивление  $R$  включает в себя сопротивление нагрузки схемы и сопротивления выводов схемы.

Эквивалентная схема сенсора давления (рис.3) описывается уравнениями Кирхгофа

$$U_p = Ri_T + L \frac{di_T}{dt} + U, \quad (1)$$

$$i_T = C \frac{dU}{dt} + I(U). \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) определяем слагаемые  $di_T/dt$  и  $dU/dt$

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - Ri_T - U}{L}, \quad (3)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C}. \quad (4)$$

В положении равновесия схемы ( $U_0, i_{T0}$ ) токи и напряжения схемы не изменяются, поэтому

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{T0}} = 0, \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \quad (5)$$

Используя условия (5) из уравнений (3) и (4) находим

$$U_p - i_{T0}R - U_0 = 0, \quad (6)$$

$$i_{T0} - I(U_0) = 0. \quad (7)$$

Состояние схемы в соответствии с (6) и (7) реализуется в точке пересечения статистической вольтамперной характеристики и линии нагрузки

$$I(U_0) = (U_p - U_0) / R, \quad (8)$$

которое есть состоянием равновесия исследуемой схемы. Для рассмотрения работы схемы в динамическом режиме введем в уравнения (3) и (4) новые переменные, которые имеют вид:

$$u = U - U_0, \quad (9)$$

$$i = i_T - i_{T0}. \quad (10)$$

Нелинейную статическую вольтамперную характеристику транзисторной структуры вблизи точки состояния заменим линейной функцией

$$I(U_0 + u) = I(U_0) + u/R_g, \quad (11)$$

где  $R_g$  – дифференциальное отрицательное сопротивление в точке равновесия. Нелинейную емкость на электродах сток-сток полевых транзисторов VT1 и VT2 вблизи точки равновесия считаем постоянной величиной, которая не зависит от напряжения. В соответствии с этим условием уравнения (3) и (4) преобразуются в линейные с постоянными коэффициентами

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L}, \quad (12)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u}{R_g C}. \quad (13)$$

Для определения характеристического уравнения на основе (12) и (13) необходимо провести дифференцирование напряжения по времени в уравнения (13)

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{1}{C} \frac{di}{dt} - \frac{1}{R_g C} \frac{du}{dt}. \quad (14)$$

Подставим в уравнение(14) вместо  $di/dt$  его значение (12), тогда получим

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \left( -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L} \right) \cdot \frac{1}{C} - \frac{1}{R_g C} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (15)$$

С другой стороны, в соответствии эквивалентной схемы устройства (рис.3) можно записать

$$i = i_c + i_g, \quad (16)$$

где  $i_g = u/R_g$ . При подстановке (16) в (15) получим уравнение

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{du}{dt} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{u}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (17)$$

Характеристическое уравнение в соответствии с (17) имеет вид

$$x^2 + x \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) + \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) = 0. \quad (18)$$

Корни характеристического уравнения (18) имеет вид

$$x_{1,2} = \frac{- \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right)^2 + \frac{4}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)}}{2} = 0. \quad (19)$$

В соответствии с теорией устойчивости Ляпунова, корни характеристического уравнения (19) определяют условие равновесия системы. Если  $x_1$  и  $x_2$  имеет действительные значения, то при  $x_{1,2} < 0$  любое отклонение системы будет затухать по экспоненциальному закону, а при  $x_{1,2} > 0$  – нарастают. Если  $x_{1,2} = (a \pm jb)$  имеют комплексный характер, то в системе возможны синусоидальные колебания, причем при  $a > 0$  колебания нарастают, а при  $a < 0$  затухают.

Решение уравнения (17) можно представить в виде

$$u(t) = A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{4 \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)} \right] t + \\ + B \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) - \sqrt{4 \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right)} \right] t, \quad (20)$$

где  $A$  и  $B$  коэффициенты, которые определяются из начальных условий. Две составляющие уравнения (20) описывают периодический процесс, амплитуда которого нарастает по экспоненциальному закону. Условия возникновения синусоидальных колебаний в системе описываются неравенствами

$$\left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right) < 0, \quad (21)$$

$$\frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) > 0. \quad (22)$$

Таким образом, возникновение колебаний на резонансной частоте в исследуемом сенсоре давления будет иметь место при выполнении условий (21) и (22). Резонансная частота определяется на основании равенства нулю реактивной составляющей полного входного сопротивления схемы (рис. 3), которое описывается уравнением

$$Z = R + \frac{R_g}{1 + (\omega C R_g)^2} + j \left( \omega L - \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} \right). \quad (23)$$

При выполнении условия

$$\omega L - \frac{\omega C R_g^2}{1 + (\omega C R_g)^2} = 0 \quad (24)$$

в схеме наступает резонанс. Из уравнения (24) определяем резонансную частоту, которая является функцией преобразования. Эта функция описывает зависимость резонансной частоты от давления

$$F(P) = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}(P)} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}(P)}{L} - 1}. \quad (25)$$

Чувствительность радиоизмерительного сенсора давления определяется на основании (25) и описывается уравнением

$$S_p^F = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}(P)}{L} - 1} \left( \frac{dC_{ekv}(P)}{dP} \right)}{\pi R_g C_{ekv}^2(P)} + \frac{1}{4} \frac{R_g \left( \frac{dC_{ekv}(P)}{dP} \right)}{\pi L C_{ekv}(P) \sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}(P)}{L} - 1}} \quad (26)$$

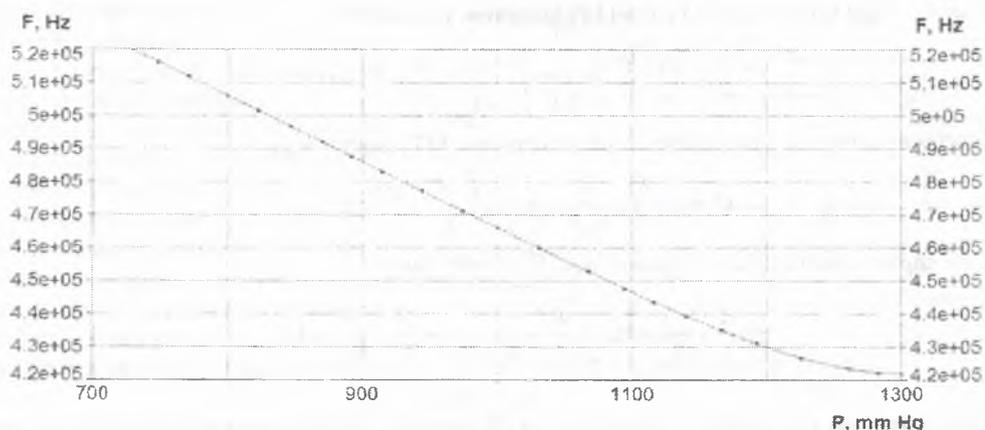


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от давления

На рис. 4 представлена зависимость резонансной частоты от давления. Как видно из графика, резонансная частота имеет линейный характер до 1230 mmHg давлений, затем линейность нарушается, что объясняется краевыми эффектами поведения мембраны в точках крепления.

На рис. 5 представлена зависимость чувствительности сенсора от изменения давления. Анализ графика показывает, что существует определенный диапазон давления, при котором чувствительность имеет максимальное значение и изменяется от 470 до 235 Hz/mmHg.

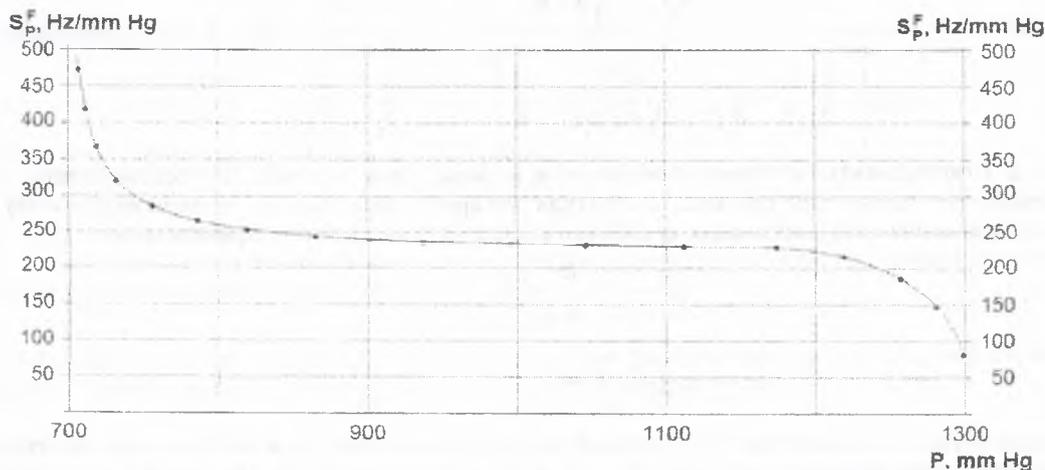


Рис. 5. Зависимость чувствительности сенсора от изменения давления

### Выводы

Предложена конструкция радиоэлектронного радиоизмерительного сенсора давления на основе автогенераторного устройства, в котором первичный преобразователь давления является мембранный конденсатор.

На основе решения уравнения колебательной системы микроэлектронного радиоизмерительного сенсора давления получена зависимость выходного напряжения от времени, условие возникновения синусоидальных колебаний в системе, функция преобразования, которая описывает зависимость резонансной частоты от давления, а также уравнение чувствительности. Чувствительность сенсора давления изменяется от 470 до 235 Hz/mmHg.

### Литература

1. Новицкий П.В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П.В. Новицкий, В.Г. Кноринг, В.С. Гугников. – Ленинград: Энергия, 1970. – 424 с.
2. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. –М.: Радио и

связь, 1990. –264 с.

3. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.

4. Осадчук В.С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / В.С. Осадчук, А.В. Осадчук. -Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. - 275с.

5. Патент на корисну модель №83356 України, МПК G01R 31/315. Вимірювач тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Заявка № u201300303; Заяв. 09.01.2013; Пр. 18.04.13. Опубл.10.09.13 Бюл.17.

6. Патент на корисну модель №87762 України, МПК H01R 19/00. Мікроелектронний сенсор тиску / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Заявка на винахід №u201214140 від 11.12.12 Пр. 26.03.13 Опубл.25.02.14 Бюл.4

References

1. Novitsky P.V. Digital devices with frequency sensors / P.V. Novitsky, V. Knoring, V.S. Gutnikov. - Leningrad: Energy. 1970. - 424 p.  
 2. Vikulin I.M., Stafeev V.I. Physics of semiconductor devices / I.M. Vikulin, V.I. Stafeev // –М.: Radio and communication, 1990. - 264 P.  
 3. Osadchuk A.V. Microelectronic frequency transducers based on the transistor structures with negative resistance / A.V. Osadchuk / Vinnitsa, "Universum-Vinnitsa", 2000. – 303 P.  
 4. Osadchuk V.S. Reactive properties of transistors and transistor circuits / V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk // -Vinnitsa "Universum-Vinnitsa", 1999. - 275s.  
 5. Patent for useful model № 83356 Ukraine, IPC G01R 31/315. Pressure meter with active inductive element / Osadchuk V.S., Osadchuk A.V., Osadchuk I.A. Application № u201300303; Statement. 09.01.2013; Tr. 18/04/13. Opubl.10.09.13 Byul.17.  
 6. Patent for useful model №87762 83356 Ukraine, IPC G01R 31/315. Mikroelektronny sensor pressure / Osadchuk V.S., Osadchuk A.V., Osadchuk I.O. Application №u201214140; Statement. 12.11.12; Tr. 03.26.13 Opubl.25.02.14 Byul.4.

Рецензія/Peer review : 22.1.2015 р. Надрукована/Printed :24.1.2015 р.  
 Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 621. 317

А.А. ТРОЦЬ

Університет «Україна», м.Київ, Україна

**МЕТОД КОНТРОЛЮ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ГАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ**

*Подані основні положення методу контролю компонентного складу газових технологічних середовищ на основі розробленої теорії виникнення матеріальної енергетичної надлишковості та її розвитку при прагненні до рівня середовища. Розглянута теоретична необхідність введення прогресуючого простору як основного при викладенні теорії методу.*

*Метод контролю дозволяє описати термодинамічний стан об'єкту регулювання на основі опису всього комплексу енергетичних станів взаємодії його параметрів в єдиній системі контролю, що в свою чергу дозволяє здійснювати контрольно-регулюючу дію на об'єкт регулювання в рамках заданої точності.*

*Ключові слова: метод контролю; прогресуючий простір; евклідов простір; оператор переходу.*

A.A. TROTS

University "Ukraine", Kyiv, Ukraine

**QUALITY MONITORING OF COMPONENTAL STRUCTURE OF GAS TECHNOLOGICAL ENVIRONMENTS**

*The basic position control method of gas component composition process fluids based on material developed theory of power redundancy and its development in the pursuit of environment. The theoretical need to introduce progressive space as the main method in the presentation of the theory.*

*Control method can describe the thermodynamic state of produce from the description of the whole complex interaction energy states its parameters in a single control system, which in turn allows the control and regulating effect on the object of regulation within a prescribed accuracy.*

*Key words: control method; progressive space; Euclidean space; transition operator.*

**Вступ**

В теорії і практиці багатокомпонентного газового аналізу одним із основних завдань при створенні математичної моделі процесу є адекватне відображення реального процесу взаємодії окремих компонентів в єдиній термодинамічній системі з метою найбільш повного опису окремого технологічного процесу в рамках заданої точності та максимальної автоматизації процесу контролю. Для вирішення поставленої задачі найвірніше використання загальнофізичних методів, так як процес утворення оптимального технологічного середовища пов'язаний з комплексом технічних засобів контролю. Засоби контролю, взагалі, інформативно базуються на перетворенні енергії різноманітних фізичних ефектів і явищ в конкретно визначений інформативний сигнал, який потребує додаткової автоматизованої обробки для