

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 Никифорович 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 vymiriuvannya volohosti kapiliarno-shparystykh materialiv zi znachnymy vtratamy. 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 vtratamy. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : IX nauk.-tekhn. konf. Khmelnytskyi, 2002. – С. 86–88.[in Ukrainian]

5. 5. Pat. 75699 Ukraine, MPK G01N27/22. Sposib vymiriuvannya 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 RADIO MEASURING 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.*

**Вступлення**

Характеристики мікроелектронних сенсорів тиску визначають точність і надійність приладів контролю технологічних процесів, характеристики оточуючої середовища, безпеку роботи ядерних, теплових, хімічних установок, летальних апаратів, транспорту і т.д. Це визначає жорсткі вимоги до мікроелектронним сенсорам тиску.

Одним з перспективних наукових напрямків в розробці радіоізмерительних мікроелектронних сенсорів тиску є використання залежності реактивних властивостей і опору напівпровідникових приладів від впливу зовнішніх фізичних величин і створення на цій основі нового класу радіоізмерительних мікроелектронних сенсорів тиску. В пристроях такого типу відбувається перетворення тиску в частотний сигнал, що дозволяє створити радіоізмерительні перетворювачі за інтегральною технологією і дає можливість підвищити швидкість дії, точність і чутливість, розширити діапазон вимірюваних величин, покращити надійність, стійкість до перешкоджань і довготривалу стабільність параметрів [1-3]. Крім того, об'єднання на одному кристалі мікроелектронного перетворювача зі схемами обробки інформації дозволяє створити «інтелектуальні» пристрої. Використання частоти як інформаційного параметра дозволяє уникнути застосування підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при обробці інформації, що знижує собівартість систем контролю і управління [4-6]. В даній статті представлені дослідження характеристик радіоізмерительного мікроелектронного сенсора тиску з частотним виходом на основі двох МДП транзисторів, які утворюють автогенератор, частота генерації якого залежить від тиску на напівпровідникову ємнісну структуру.

**Теоретичні і експериментальні дослідження характеристик сенсора тиску**

Схема радіоізмерительного мікроелектронного сенсора тиску представлена на рис. 1. В результаті різної провідності каналів польових МДП транзисторів VT1 і VT2 вольтамперна характеристика на виході пристрою має падаючий ділянку, що відповідає появі негативного диференціального опору при виборі робочої точки на цьому ділянці.

Таким чином, в коливальній системі автогенератора виникають електричні коливання за рахунок перетворення негативним диференціальним опором енергії постійного джерела напруги в енергію змінного електричного поля. Коливальна система складається з індуктивності  $L$  і еквівалентної ємності  $C$ , в яку входить ємність існуюча на електродах сток-сток польових транзисторів VT1 і VT2, ємність  $C_1$ , яка змінюється під впливом тиску, і ємність  $C_2$ , захищаюча джерело постійної напруги  $U_1$  від змінного високочастотного струму і в той же час забезпечує необхідну величину еквівалентної ємності коливальної системи. Опору  $R_1$ - $R_2$  забезпечують режим роботи польових транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму.

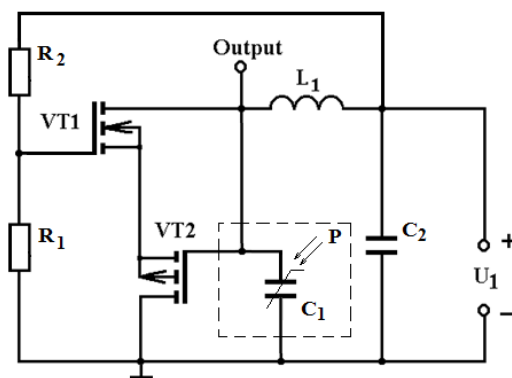


Рис.1. Електрична схема радіоізмерительного мікроелектронного сенсора тиску

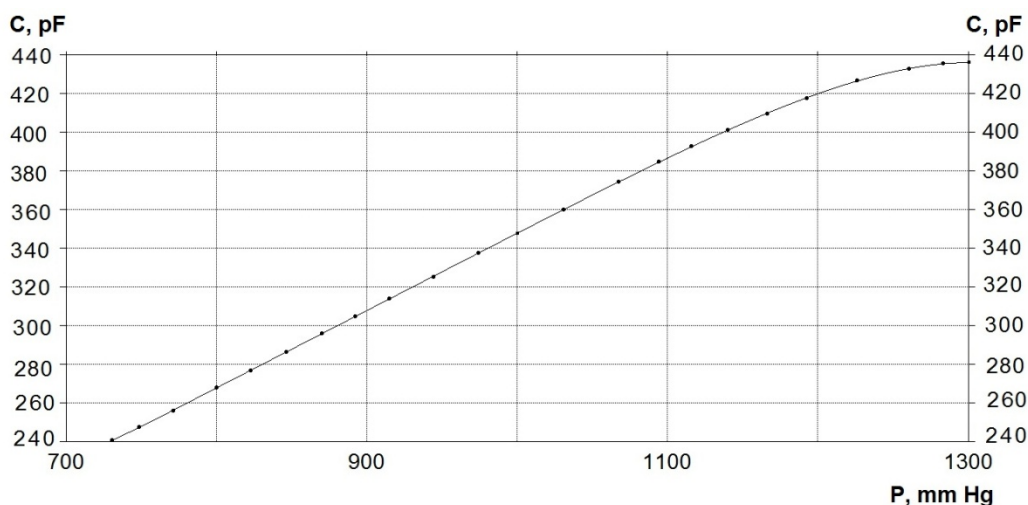


Рис. 2. Залежність ємності первинного перетворювача від тиску

Радіоізмерительний мікроелектронний сенсор тиску працює наступним чином. Вибором постійної напруги джерела  $U_1$  добиваємося генерації електричних коливань в контурі

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.

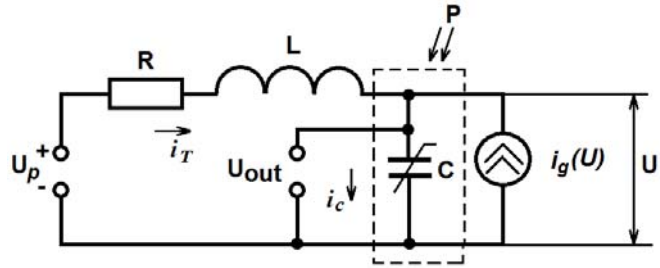


Рис. 3. Эквивалентная схема радиоизмерительного сенсора давления

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 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 уравнения Кирхгофа

$$U_p = Ri_T + L \frac{di_T}{dt} + U, \tag{1}$$

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

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

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - Ri_T - U}{L}, \tag{3}$$

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

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

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

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

$$U_p - i_{T0}R - U_0 = 0, \tag{6}$$

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

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

$$I(U_0) = (U_p - U_0) / R, \tag{8}$$

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

$$u = U - U_0, \tag{9}$$

$$i = i_T - i_{T0}. \tag{10}$$

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

$$I(U_0 + u) = I(U_0) + u/R_g, \tag{11}$$

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

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L}, \tag{12}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u}{R_g C}. \tag{13}$$

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

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{1}{C} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{R_g C} \cdot \frac{du}{dt}. \tag{14}$$

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

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

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

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

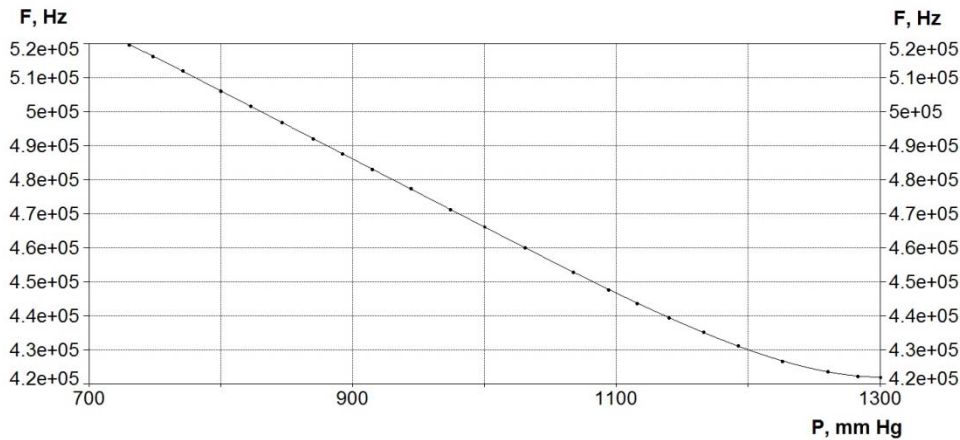


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от давления

На рис. 4 представлена зависимость резонансной частоты от давления. Как видно из графика, резонансная частота имеет линейный характер до 1200 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.

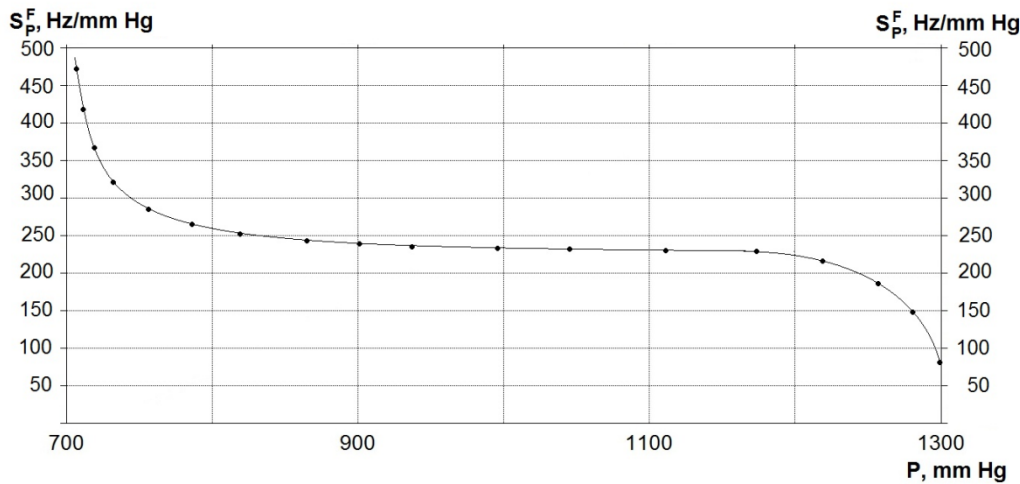


Рис. 5. Зависимость чувствительности сенсора от изменения давления

### 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. Гутников. – 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., Stafeyev V.I. Physics of semiconductor devices / I.M. Vikulin, V.I. Stafeyev // –M.: 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. ТРОЦ**

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