

УДК 621.317

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИХ ГАЗОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ІЗ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВІ p-n-ПЕРЕХОДУ

© Обух Ірина, Яцук Василь, Скебський Петро, 2006

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,  
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна

*Проаналізовано термоанемометричні методи побудови газових лічильників, розглянуто характеристики сенсорів на основі p-n-переходу, проаналізовано певні математичні моделі методом уніфікації з модуляцією вимірюваного струму, розглянуто результати теоретичних досліджень та запропоновано модель для створення термоанемометричного газового лічильника на основі p-n-переходу.*

*Проанализировано термоанемометрические способы строения газовых счетчиков, рассмотрено характеристики сенсоров на основе p-n-перехода, проанализировано некоторые математические модели способом унификации с модуляцией измерительного тока, рассмотрены результаты теоретических исследований и предложена модель для строения термоанемометрических газовых счетчиков на основе p-n-перехода.*

*Methods of creation gas meters are analyzed in this paper. Some characteristics of p-n junction sensors are described. Four mathematical models by the unification with the modulation of measured current are analyzed. The result of the theoretical experiments is discussed. The best model for creation of gas meters is proposed.*

**1. Вступ.** Проблема комерційного обліку актуалізується у зв'язку з постійним зростанням тарифів на газ. Сучасний стан вимірювальної техніки в народному господарстві України не задовольняє вимог, що зросли у зв'язку з ситуацією, яка склалася в Україні з постачанням та споживанням газу. Це викликано передовсім тим, що безперервно підвищуються вимоги до точності засобів обліку газу, оскільки витрата кількості газу є параметром не стільки технологічним, скільки комерційним. Так, наприклад, підвищення точності вимірювання кількості газу, що надходить в Україну з Росії, лише на 0,1% заощаджує Україні понад 10 млн. дол. США на рік [1]. Україна, що сьогодні видобуває втричі менше природного газу, ніж у 70-ті роки ХХ ст., може задовольнити ним свої потреби лише на 18–20 %, іншу ж частину (80–82) % доводиться імпортувати. Зрозуміло, що в цих умовах зростає значущість проблеми точного обліку витрачання газу, а такий облік можливий лише за умов високої точності вимірювання витрати і кількості газу [2, 3]. Основна маса використовуваних лічильників газу сьогодні в Україні є механічними, морально застарілими, низького класу точності,

з обмеженими функціональними можливостями та не забезпечують можливості автоматизованого обліку. Сумарна похибка обліку газу такими приладами становить  $\pm(2-4) \%$  і не відповідає вимогам наказу Держкомнафтогазу № 355 від 01.11.94, відповідно до яких у взаєморозрахунках забороняється використовувати прилади обліку газу, сумарна похибка яких перевищує  $\pm 1 \%$ . За умови мінімально можливого ризику споживача та за сучасних тарифів на газ, за аналогією до [4], межа допустимих значень відносної похибки лічильників не повинна перевищувати  $\pm 0,2 \%$ , що більше ніж на порядок перевищує точність наявних лічильників. Тому можна підрахувати, що при чинному тарифі за газ у Львові  $0,1769 \text{ грн/м}^3$ , межа допустимих значень відносної похибки газових лічильників не повинна перевищувати  $\pm 0,5 \%$ . Можливості сучасних інформаційних технологій та мікроелектроніки актуалізують побудову "інтелектуального" житла [5–9]. Однією з найважливіших функцій такого житла є автоматизація обліку, контролю та діагностики споживання енерговитрат. Комерційний облік спожитого газу є частиною проблеми побудови інтелектуального житла і на тере-

нах СНД робляться перші спроби у цьому напрямі [10–12]. Сьогодення України вимагає якнайширшого застосування як газоощадних технологій, так і засобів обліку споживання природного газу. Про це свідчить безупинне зростання, передусім останніми роками, вимог щодо технічних і метрологічних характеристик лічильників і витратомірів природного газу.

**2. Мета роботи.** Метою роботи є розроблення пропозицій щодо можливості побудови термоанемометричного газового лічильника із сенсорами на основі р-п-переходу. Для цього проаналізовано різні математичні моделі методом уніфікації з модуляцією вимірювального струму р-п-переходу і визначено похибки в певному діапазоні вимірювання температури. За результатами наших теоретичних досліджень можна буде зробити певні висновки щодо того, яка математична модель дасть змогу побудовувати точний термоанемометричний газовий лічильник із сенсорами на основі р-п-переходу.

**3. Аналіз сучасного стану проблеми.** Сьогодні існує багато методів побудови газових лічильників. Необхідно відзначити, що в останні роки збільшилась кількість підприємств, що готуються випускати турбінні та роторні лічильники. Здійснено державні приймальні випробування (ДПВ) турбінних лічильників газу, які готує до виробництва ЗАТ “Комон-Україна” (м. Київ); освоєно турбінні лічильники газу мале підприємство “СМОГ” (м. Ужгород); готове до випробувань турбінних лічильників газу спільне українсько-голандське підприємство “Е.К.С.І.” (м. Харків). Це саме підприємство готується виготовляти і роторні лічильники газу фірми “Інструмент Інтернаціонал” (Бельгія) [13]. У побуті для обліку газу застосовують понад півтора мільйона мембранних та роторних лічильників газу, переважно з відносними похибками  $\pm 2\%$  та  $\pm 3\%$ . Нині у Державний реєстр України ЗВТ занесено понад 60 типів та типорозмірів побутових лічильників газу, які імпортують та виробляють 14 підприємств України, але всі ці лічильники мають такі самі похибки  $\pm(2-3)\%$  [13]. Деякі підприємства України почали освоювати лічильники газу, що працюють за іншими принципами дії. Це насамперед ультразвукові лічильники, які приводять автоматично вимірний об’єм до стандартних умов не тільки за температурою та тиском, а і за густиною газу. Але основним недоліком ультразвукових лічильників є висока ціна, тому їх не можуть встановити всі верстви населення. В Україні також розроблені побутові лічильники газу

турбінного типу, яким аналогів у цій галузі застосування немає [13]. Одним із способів підвищення достовірності обліку газу в побуті є підвищення точності лічильників газу та впровадження лічильників з температурною компенсацією та компенсацією за тиском [13].

З аналітичного огляду відомих методів та засобів побудови побутових газових лічильників можна зробити висновок, що термоанемометричні методи найкраще відповідають технічному завданню завдяки їхній потенціально високій точності та можливості забезпечення порівняно невеликих масогабаритних показників. Серед сучасних термоанемометрів на практиці найширше для вимірювання параметрів газових середовищ застосовують термоанемометри постійної температури (ТАПТ) [14, 15]. Відомо, що на практиці найістотніше погіршує метрологічні параметри температура газового потоку. Виявляється, що при зміні температури газового потоку  $\theta_x$  відносна похибка у визначеній швидкості становить  $(1-4)\%/K$  [16]. Для значних змін температури газу в побутових лічильниках від  $-40^\circ C$  до  $+50^\circ C$  стосовно температури  $\theta_x = +20^\circ C$ , при якій ТАПТ був проградуирований, похибки визначення швидкості газового потоку стають неприпустимо великими. Отже, дуже важливо в побутовому газовому лічильнику забезпечити інваріантність до зміни температури газового потоку. Варто також звернути увагу на пожежо- та вибухобезпечність газового лічильника, яка потребує вибору мінімально можливих потужностей та температур перегрівання сенсора. Відомо, що малопотужні транзистори можуть бути перегріті на різницю температур до  $50^\circ C$  при виділенні в їхньому об’ємі електричної потужності лише  $1,5\text{ Вт}$ . Відповідно, при потужності на порядок меншій, на підставі рівняння теплового балансу і перегрівання буде на порядок меншим. Отже, якщо використати діодний кремнієвий сенсор та вибрати значення потужності перегріву  $P_{пр} = 0,15\text{ Вт}$ , то при такій потужності та спаді напруги на р-п-переході  $1\text{ В}$ , через нього треба пропустити струм  $0,15\text{ Вт}/1\text{ В} = 0,15\text{ А}$ , що надто багато для побутового лічильника, який би повинен працювати від акумуляторних батарей – принаймні мати їх у резерві. Тому треба вибирати транзисторний сенсор з керованим виділенням потужності по базовому колу [17].

**4. Порівняння методів уніфікації статичних характеристик напівпровідникових сенсорів.** Недоліком всіх вищеописаних лічильників газу є доволі велика похибка, тому актуальним є створення засобу

обліку газу з похибкою, не вищою за  $\pm 0,5\%$ , що буде корисним як споживачам, так і державі. З цією метою пропонується використати для побудови термоанемометричного газового лічильника сенсори на основі р-п-переходу. Температурні сенсори на основі р-п-переходу є перспективними для засобів вимірювання теплових величин. Такі сенсори працездатні у доволі великому температурному діапазоні від 1 К до 473 К [18]. Мікроелектронні р-п сенсори температури дають принципову можливість істотного зменшення споживаної потужності в термоанемометричних лічильниках. Нелінійність сенсорів на основі р-п-переходу близька до нелінійності термометрів опору і не передбачає складних схем лінеаризації [19]. Але основним їхнім недоліком є великий технологічний розкид. Тому основна увага зосереджена на розгляді необхідності використання методів уніфікації їхніх характеристик з модуляцією вимірюваного струму для декількох математичних моделей їхньої передавальної характеристики.

В [20] описано різні математичні моделі характеристик струму-напруга р-п-переходу, зокрема модель Еберса-Молла 2, модель Еберса-Молла 3, модель Гумеля-Пуна, поліноміальне наближення. Ці моделі порівнювали між собою стосовно використання мінімальної кількості реперних точок температури при їхньому калібруванні. Результати дослідження показали, що всі розглянуті моделі не змогли точно описати повної характеристики струму-напруга. Крім того, на вимірювання впливала, як правило, велика температурна похибка. В сучасних працях дослідження спрямовані на пошук потрібної ділянки характеристики струму-напруга, що дасть змогу досягти необхідної точності відносно визначення температури.

Проаналізувавши отримані результати [20], не можна остаточно визначити, на підставі якої моделі треба побудувати термоанемометричний газовий лічильник із сенсорами на основі р-п-переходу для забезпечення необхідних вимог.

**5. Аналіз методу уніфікації з модуляцією вимірювального струму.** Розглядалися різні математичні моделі, для яких була здійснена уніфікація з модуляцією вимірювальних струмів для того [21], щоб оцінити, яка з них має найменшу методичну похибку. Саме це дасть можливість створити термоанемометричний газовий лічильник, у якого буде мінімальна похибка, доступна ціна, можливість дистанційно перекидати вхід лічильника у разі підвищення температури, несплати або за будь-якої іншої потреби. Щоб позбавитись впливу опорів бази, виводів електродів та ліній зв'язку через

р-п-перехід, пропускають три значення струму  $I_{11}$ ,  $I_{21} = 2,839 \cdot 10^{-4} \text{ A}$ ,  $I_{31} = 1,439 \cdot 10^{-4} \text{ A}$  і визначають результат вимірювання  $\Delta U1(T)$  для всіх моделей за співвідношенням

$$\Delta U1(T) = U31(T) - U11(T) - U21(T) + U31(T) \quad (1)$$

Для описання температурної залежності напруги на прямозміщеному р-п-переході при  $I_{np} = const$  з урахуванням всіх чинників використовується математична модель, запропонована Василюком в [18]

$$U2(T) = -\frac{2 \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{2}{I_S} - 2 \cdot \left( \frac{T_0}{T} - \theta \right) + 2 \cdot k \cdot T \cdot \ln \left( -\frac{I_R \cdot \sqrt{\exp \frac{\theta \cdot q}{k \cdot T}}}{\sqrt{\exp \frac{\theta \cdot q}{k \cdot T}}} + I_R \cdot \exp \frac{\theta \cdot q}{k \cdot T} + I_{np} \cdot I_S \cdot \exp \frac{\theta \cdot q}{k \cdot T} \right)$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура, К;  $q$  – заряд електрона;  $I_S$  – струм насичення (тепловий струм),  $I_S = 0,86 \cdot 10^{-15} \text{ A}$ ;  $R$  – значення опору бази, виводів електродів та ліній зв'язку;  $I_R = 0,2 \cdot 10^{-13} \text{ A}$ ;  $n_e$  – коефіцієнт емісії;  $r(T) = 2302,48 \cdot \frac{\ln(1 + \delta(T))}{\delta(T)}$  – зміна опору;  $\delta(T) = 0,0003846 \cdot T + 1,118019$  – для кремнію у цьому температурному діапазоні;  $I_{np}$  – повний струм через р-п-перехід.

Використовуючи метод уніфікації з модуляцією вимірюваного струму, вираз (2) за допомогою певних математичних перетворень буде мати такий вигляд

$$\Delta U2(T) = k \cdot \frac{T}{q} \cdot \ln \left[ \frac{(I_{31})^2}{I_{11} \cdot I_{21}} \right] \quad (3)$$

Рівняння (3) описує температурну залежність кремнієвого сенсора, що працює в режимі модуляції струму. Враховуючи реальні (1) та ідеальні (3) значення, розрахували методичні похибки для кожної моделі

$$\Delta U11(T) = \Delta U1(T) - \Delta U2 \quad (4)$$

Здійснено теоретичні дослідження кількох математичних моделей, зокрема моделі, запропонованої Василюком, моделі Молла-Еберса 2, моделі Молла-Еберса 3, моделі Гумеля-Пуна, поліноміальне наближення. Кожна модель розглядалась при трьох значеннях вимірюваль-

ного струму. Ми не досліджували модель Шоклі, оскільки ця модель має велику методичну похибку.

Виконавши всі необхідні розрахунки, ми отримали результат для моделі, запропонованої В. Василюком [19], відображений на рис. 1.

Для моделі Шоклі вплив опору може бути змодельований через такий вираз (модель Молла-Еберса 2):

$$U = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) + R \cdot I, \quad (5)$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура, К;  $q$  – заряд електрона;  $I_s$  – струм насичення (тепловий

струм),  $I_s = 0,86 \cdot 10^{-15}$  А;  $R$  – значення опору бази, виводів електродів та ліній зв'язку.

Саме модель Молла-Еберса 2 і забезпечує перший рівень моделювання. Виконавши всі розрахунки, ми отримали результат, унаочнений на рис. 2.

Для цієї моделі значення методичної похибки не перевищує  $8,01 \cdot 10^{-12}$  В за різних значень температури.

Модель Молла-Еберса 3 (рис. 3) враховує високій рівень інжекції. Ця модель була спрощена через робочі умови, доречні для вимірювання температури сенсорів на основі р-п-переходу, вільних від калібрування. З цього випливає:

$$I = \frac{I_s}{B_f} \left( \exp\left(\frac{q \cdot U_{pn}}{k \cdot T}\right) - 1 \right) + \frac{I_s}{1 + \theta \cdot \exp\left(\frac{q \cdot U_{pn}}{2 \cdot k \cdot T}\right)} \cdot \left( \exp\left(\frac{q \cdot U_{pn}}{k \cdot T}\right) - 1 \right) + C_2 \cdot I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{q \cdot U_{pn}}{n_{el} \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right), \quad (6)$$

$$U = U_{pn} + R \cdot I,$$

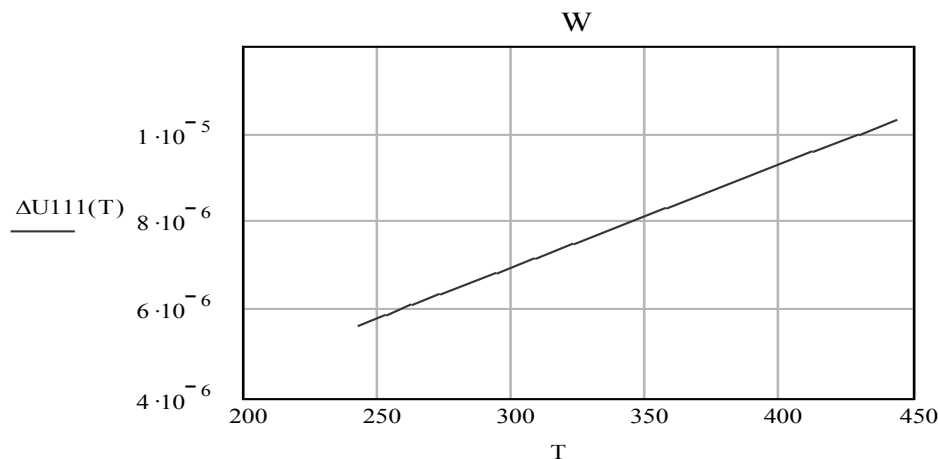


Рис. 1. Методична похибка моделі статичної характеристики напівпровідникового сенсора, запропонованої в [19]

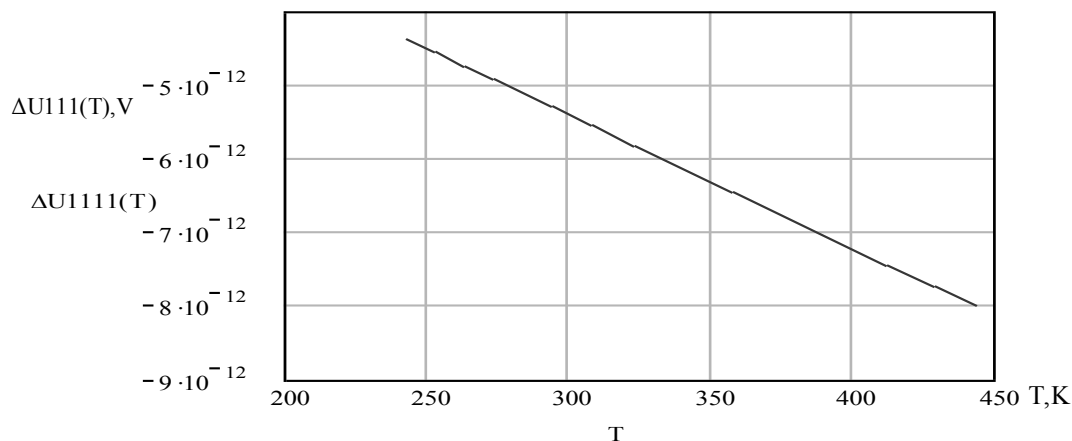


Рис. 2. Методична похибка для моделі Молла-Еберса 2

де  $U_{pn}$  – напруга через р-п-перехід;  $T$  – температура;  $I_s$  – струм насичення;  $V_f$  – коефіцієнт посилення;  $\theta$  – параметр інжекції високого рівня;  $C_2$  – відтворення / рекомбінація параметра;  $n_{e1}$  – коефіцієнт емісії;  $R$  – опір;  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – заряд електрона.

Для цієї моделі значення методичних похибок становлять  $0,2 \cdot 10^{-16} \dots 1,8 \cdot 10^{-16}$  В за різних значень температури.

Модель Гумеля-Пуна (ГП) є загалом еквівалентом моделі МЕ 3. Відмінність між ними – це практичне формулювання в математиці низького розширення і впливу інжекції великого рівня. Модель ГП фізично походить від навантажень в основі і веде до незначно точнішої моделі, ніж модель МЕ 3. Спрощення моделі ГП, зроблене Голмером, дає рівняння:

$$I = I_r \left( \exp\left(\frac{e \cdot U_{pn}}{n_e \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) + \frac{I_s}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{I_s}{I_k} \cdot \left( \exp\left(\frac{e \cdot U_{pn}}{k \cdot T}\right) - 1 \right)}} \cdot \left( \exp\left(\frac{e \cdot U_{pn}}{k \cdot T}\right) - 1 \right)$$

$$U = U_{pn} + R \cdot I, \tag{7}$$

де  $U_{pn}$  – напруга через р-п-перехід;  $T$  – температура;  $I_s$  – струм насичення;  $I_k$  – повний струм;  $I_r$  – струм відтворення / рекомбінації,  $I_r = 0,2 \cdot 10^{-13}$  А;  $n_e$  – коефіцієнт емісії;  $R$  – опір;  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – заряд електрона.

Кожен параметр загалом впливає на характеристику I-U, але має значну перевагу тільки в певній області характеристики. Кожна область характеристики повинна бути зосереджена на виборі групи точок I-U для вимірювання температури (рис. 4).

Для того, щоб зменшити похибки моделі, зображеної рівнянням Шоклі, було запропоновано скоригувати її поліноміальним наближенням [21] (рис. 5):

$$U = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) + r_1 \cdot I + r_2 \cdot I^2 + \dots + r_k \cdot I^k, \tag{8}$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – заряд електрона;  $I_s$  – струм насичення (тепловий струм),  $I_s = 0,86 \cdot 10^{-15}$  А;  $r(T) = 2302,48 \cdot \frac{\ln(1 + \delta(T))}{\delta(T)}$  – зміна опору;  $\delta(T) = 0,0003846 \cdot T + 1,118019$  – для кремнію у певному температурному діапазоні.

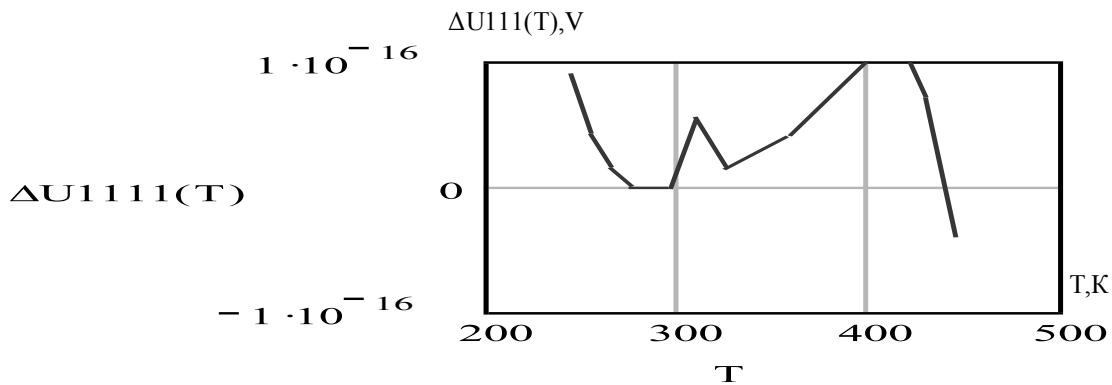


Рис. 3. Методична похибка для моделі Молла-Еберса 3

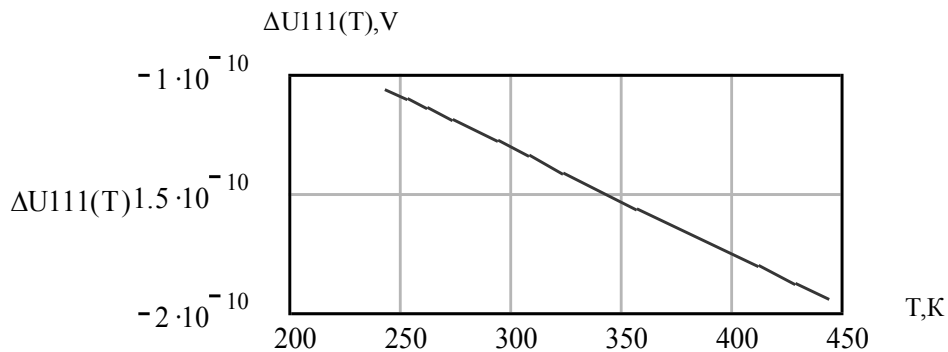


Рис. 4. Методична похибка для моделі Гуммеля-Пуна

Рівняння моделі (8) зі змінним коефіцієнтом  $k$  використані для створення статичної характеристики I-U р-n переходу за різних температур (273,15 К; 303,15К; 343,15К і 383,15К). Як вважалось, збільшення порядку полінома приводить до зменшення температурних похибок. Це переважно обмежено четвертим порядком

полінома. Додавання наступних поліноміальних членів не приводить до зменшення похибки [21].

Для цієї моделі методичні похибки становлять  $-6,362 \cdot 10^{-10}$  –  $-5,674 \cdot 10^{-10}$  В за різних значень температури. На графіку (рис. 6) зображено температурні залежності методичних похибок всіх розглянутих математичних моделей.

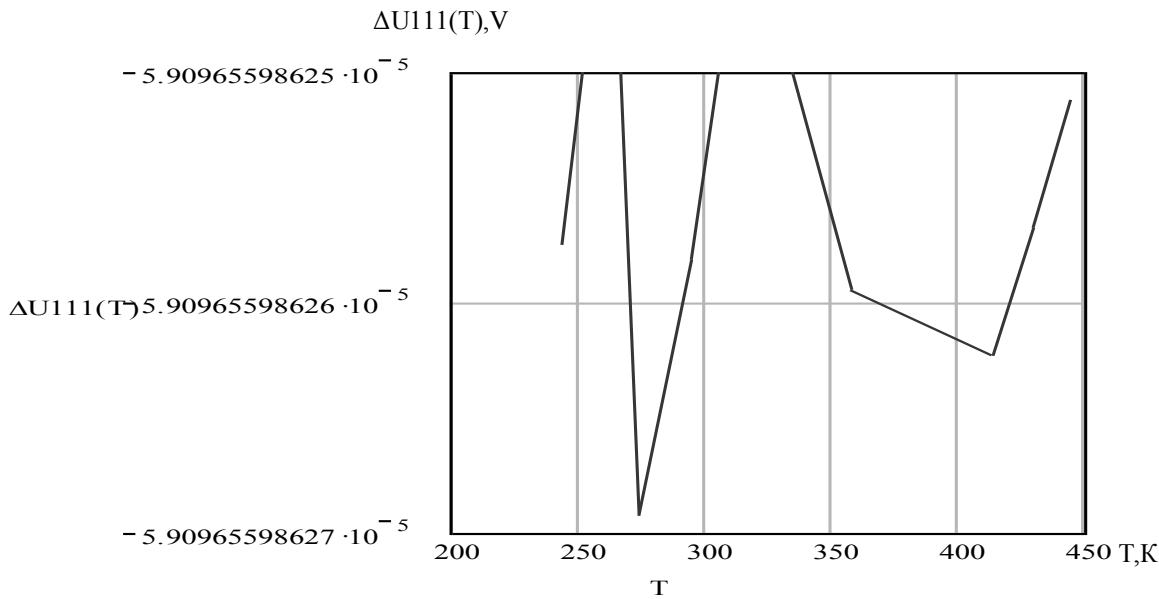


Рис. 5. Методична похибка для поліноміального наближення

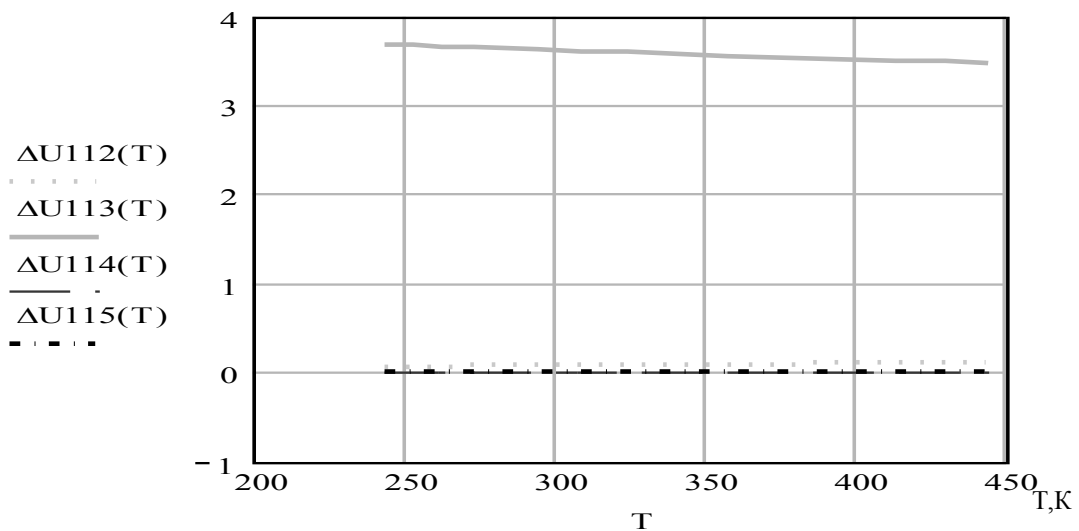


Рис. 6. Температурні залежності методичних похибок всіх розглянутих математичних моделей

**6. Висновки.** Результати експериментальних досліджень макета цифрового термометра підтвердили основні теоретичні результати. Для десяти довільно вибраних транзисторів розкид показів цифрового термометра не перевищив  $\pm 0,3$  °C. Ця похибка спостерігається при підключенні до р-п-переходу резистора 200 Ом.

Отже, були розглянуті відомі математичні моделі – запропонована Василюком, модель Молла-Еберса 2, модель Молла-Еберса 3, модель Гуммеля-Пуна, поліноміальне наближення – для визначення досконалої математичної моделі, для використання в лічильниках газу. Були визначені методичні похибки для кожної з моделей сенсорів температури, уніфікація в яких здійснюється методом модуляцією вимірювального струму, для діапазону вимірювання температури (242,92...443,63) К. За результатами теоретичних досліджень можна зробити висновок, що для побудови термоанемометричного газового лічильника із сенсорами на основі р-п-переходу найкращою можна вважати модель, запропоновану В. Василюком, оскільки їй притаманні співмірні значення методичних похибок та зручність у практичному використанні порівняно з іншими моделями.

1. Пістун С.П. Облік та економія енергоресурсів // Управління енерговикористанням: Доповіді 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 1997. – С. 12–14. 2. Бродин І.С. Реальність і прогнози підвищення експлуатаційної точності парку витратовимірювальних приладів в Україні: Доповіді науково-технічної конференції “Проблеми забезпечення обліку газу в Україні”. Івано-Франківськ, 1999. – С. 63–65. 3. Бродин І.С., Петришин І.С., Бестелесний А.Г., Дикий П.І. Державний спеціальний еталон одиниць об’єму та об’ємної витрати газу // Український метрологічний журнал. – 1997. – № 3. – С. 29–32. 4. Голюка Б., Яцук В., Столярчук П. Покращання якості лічильників гарячої води // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 62. – 2003. – С. 101–104. 5. U. Tröltzsch, O. Kanoun, H.-R. Tränkler. Mikrosystemsgesteuertes Energiemanagement für das Intelligente Haus // 6 Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik, 29–30 October 2003, Chemnitz, S. 110–117. 6. O. Kanoun, U. Tröltzsch, H. Ruser, H.-R. Tränkler. Smart Power Management for Home Applications // International Conference Micro System Technologies 2003 (Microtec), 7–8 October 2003, München, S. 245–250. 7. H. Ruser, L. Borodulkin, H.-R. Tränkler. Multiβmodal “smart-

βhome” wer interfase // Int. Conf. Signals, System, Decision and Information Technologz, SSD’03, 26-28 March, 2003, Sousse, Tunesien. 8. L. Borodulkin, H. Ruser, H.-R. Tränkler. 3D Virtual “Smart-Home” User interfase // IEEE International Symposium on Virtual and Intelligent Measurement System, Alyska Resort, AK, USA, 19-20 May 2002. 9. H.-R. Tränkler, O. Kanoun. Sensor Systems in Intelligent Buildings // Beitrag im Buch “Sensor in Intelligent Buildings”, Chapter 6, Wiley – Vch Verlag. 10. А.П. Дранезо, В.А. Ярмолович, А.Г. Павлович. Измерительная информационная система “Дельта” // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Датчик-2001. Сборник материалов XIII научно-технической конференции. – 2001. – С. 135–136. 11. Патент 2141626 RU. Устройство контроля жилищно-коммунальной информации. 12. С.В. Голубович, В.А. Ференец. Комплекс квартирных унифицированных расходомеров-счетчиков тепла, холодной и горячей воды. // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Датчик-2001. Сборник материалов XIII научно-технической конференции. – 2001. – С. 136–139. 13. Петришин И.С., Славский В.Я., Руденко М.В. Метрологическое обеспечение счетчиков газа типа РГ в эксплуатации // Метрологическая служба в СССР – 1991. – №9. – С. 33–38. 14. Ярин Л.П. и др. Термоанемометрия газовых потоков. – Ленинград, 1983. 15. Хинце И.О. Турбулентность, ее механика и теория. – М., 1963. 16. Еремин Т.П., Кондратенко В.Г. – Влияние температуры газового потока на погрешность определения его скорости. // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. – 1975. – т. XVIII. – №6. – С. 122. 17. Марченко А.Н. Управляемые полупроводниковые резисторы. – М., 1978. 18. Іванченко О.В., Скрипник Ю.О. Дослідження процесу виділення тепла в колекторному переході транзисторного сенсора. // Зб. наук. праць “Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини”. – Вип. 5. – Київ. – Фада Лтд. – 1999. – С. 113–118. 19. Василюк В.М. Принципи побудови високоточних температурних сенсорів на основі р-п-переходу // Вимірювальна техніка та метрологія, 1998, №53. – С. 70-75. 20. В. Яцук, Ю. Яцук. Метод покращання характеристик напівпровідникових сенсорів на основі р-п-переходу // Вимірювальна техніка та метрологія, 2002, №59. – С. 90-95. 21. Kanoun O., Tränkler H.-R. Kalibrationsfreie Temperaturmessung durch Parameterextraktion aus der Strom-Spannungskennlinie von pn-Übergängen // Technisches Messen. – 2003. – Vol. 68, №9. – P.442–448. 22. Столярчук П., Яцук В., Яцук Ю. Уніфікація параметрів напівпровідникових сенсорів // Вимірювальна техніка та метрологія, 2002, № 9. – С. 65-69.