

О. В. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.;
А. Ю. Савицький, асп.

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ ВОЛОЛОГОЧУТЛИВОГО МДН-ТРАНЗИСТОРА

Подано результати досліджень первинного перетворювача вологості на основі вологочутливого МДН-транзистора та радіовимірювального сенсора вологості на основі цього приладу. Розраховано теоретичну вольт-амперну характеристику сенсора вологості і експериментально підтверджено отримані результати.

Вступ

У час стрімкого розвитку науково-технічного прогресу, найгостріше стоїть питання підвищення якості і технологічності промислової продукції, а це в свою чергу підштовхує розвиток електроніки, як галузі, що створює апаратне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем у сферах виробництва, послуг, охорони здоров'я. Основними напрямками розвитку електроніки сьогодні є удосконалення процесу передачі, обробки і зберігання інформації з одного боку, і створення високоточної і надійної сенсорної техніки і автоматизованих систем з другого боку. Останній напрямок забезпечує поступовий розвиток і загальне удосконалення технології виробництва. Саме тому в процес дослідження і розробки методик і приладів перетворення неелектричних величин у електричні вкладається значна частина коштів і інтелектуальної діяльності.

Перспективним напрямком досліджень у цій галузі є розробка та створення первинних перетворювачів вологості, які реалізують принцип перетворення «вологість—частота», на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Це дозволяє виготовляти перетворювачі за інтегральною технологією, значно підвищити чутливість, розширити діапазон вимірюваних величин, поліпшити надійність і стабільність параметрів. Використання частоти за інформативний параметр виключає застосування аналого-цифрових перетворювачів для обробки інформації, знижує собівартість систем контролю та управління.

Метою статті є розробка і дослідження напівпровідникового сенсора вологості на основі транзисторних структур, активна і реактивна складова повного опору якого залежить від величини вологості навколишнього середовища [1, 2].

Структурна схема первинного перетворювача вологості

Авторами пропонується використовувати як первинний перетворювач вологочутливу МДН-структуру. Структура такого перетворювача зображена на рис. 1 [4].

З метою вивчення властивостей і реакції цього перетворювача вологості на зміни вимірювального параметра, а також створення його математичної моделі, було розроблено його еквівалентну схему (рис. 2).

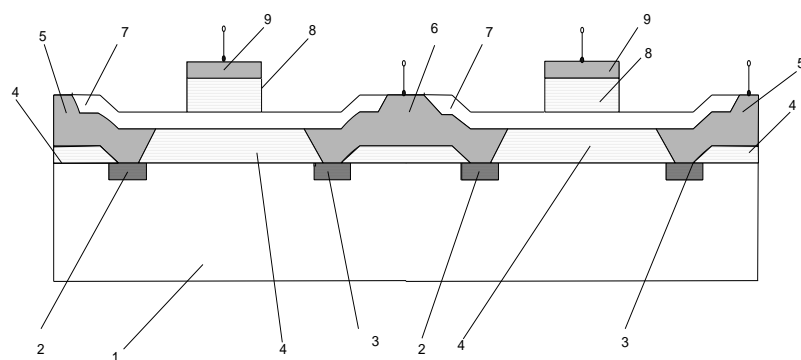


Рис. 1. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі: 1 — підкладка; 2 — області витоку; 3 — область стоку; 4 — плівка SiO_2 ; 5 — провідні плівки; 6 — суміщена стоково-витокова плівка; 7 — плівкові затвори; 8 — чутливі шари з пористого SiO_2 ; 9 — керувальні електроди

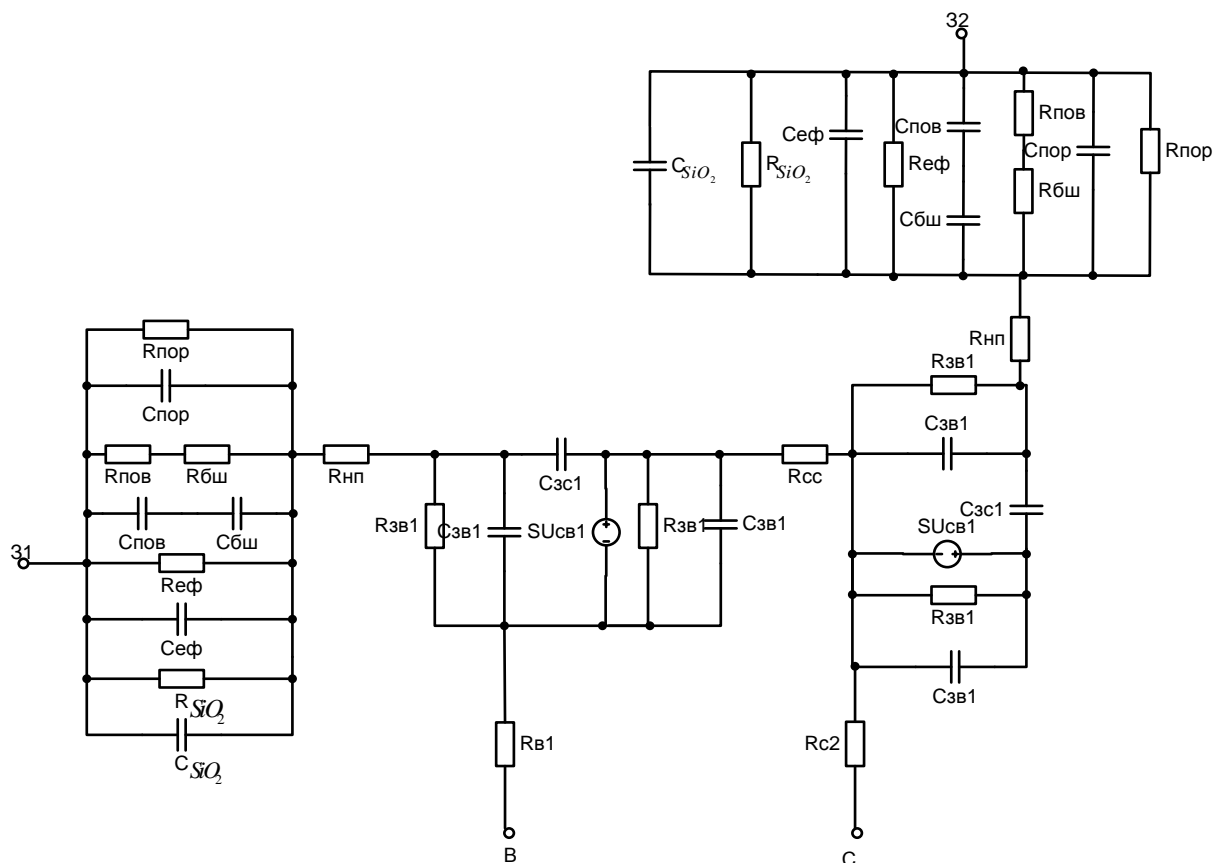


Рис. 2. Еквівалентна схема вологочутливого двозатворного МДН-транзистора

Елементи схеми описуються такими параметрами: $SU_{св1}$, $SU_{св2}$ — струми, які протікають через канали двозатворного МДН-транзистора, фактично є добутками напруг $U_{св1}$, $U_{св2}$, які падають на каналах транзистора, на крутизну характеристики транзистора; $R_{св}$ — опір стік-витік; $R_{зв}$ — опір затвор-витік; $R_{сс}$ — загальний опір стоку-витоку другого затвора двозатворного польового транзистора; $C_{пор}$ — ємність стінок пор чутливого елемента; $C_{бш}$ — опір бар'єрного шару; $C_{пов}$ — ємність повітря в порах чутливого елемента; $R_{пор}$ — опір стінок пор; $R_{пов}$ — опір повітря в порах чутливого шару; $R_{бш}$ — опір бар'єрного шару; $R_{с1}$, $R_{в1}$ — опір стоку і витоку, відповідно.

Вологочутливі ємності первинного перетворювача визначаються за такими формулами:

$$C_{пор} = \frac{\epsilon_{aSiO_2} \epsilon_0 S (1 - \alpha)}{b} \text{ — ємність пор підзатворного діелектрика;}$$

$$C_{пов} = \frac{\epsilon_{aSiO_2} \epsilon_0 S \alpha}{l} \text{ — ємність конденсаторів, утворених стінками пор і повітряним простором у них;}$$

$C_{бш} = \frac{\epsilon_{aSiO_2} \epsilon_0 S}{b}$ — ємність бар'єрного шару, що виникає на границі окис кремнію-адсорбована волога,

де ϵ_0 — діелектрична проникність вакууму; ϵ_{aSiO_2} — діелектрична проникність аморфного двоокису кремнію; α — пористість матеріалу; b — товщина бар'єрного шару; l — довжина пор, на яких осідає конденсат; S — площа чутливого елемента.

З рівнянь випливає, що повну ємність структури в умовах присутності парів води можна представити як суму трьох доданків, які відповідають діелектричній проникності самого діелектричного шару окису кремнію з діелектричною проникністю ϵ_{SiO_2} , ємності пор заповнених повітрям

діелектричною проникністю $\epsilon_{\text{пов}}$, і ємності пор, заповнених водою, діелектричною проникністю $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ [1]:

$$C_{\text{max}} = \frac{S}{d_{\text{eff}}} \left[\epsilon_{\text{SiO}_2} (1 - P) + \epsilon_{\text{пов}} (Pk(1 - \eta) + P(1 - k)) + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} Pk\eta \right], \quad (1)$$

де η — ступінь заповнення пор водою; k — відношення площі доступних для води пор до їх загальної кількості; P — швидкість заповнення пор, яка визначається за рівнянням Кельвіна

$$p = p_0 \exp\left(\frac{2\sigma V_m}{rRT}\right), \quad (2)$$

де p_0 — тиск насичених парів при температурі T ; σ — коефіцієнт поверхневого натягу рідкої фази; V_m — молярний об'єм рідкої фази; r — радіус капіляра, від'ємний у випадку змочувальної рідини.

Повний опір еквівалентної схеми, зображеної на рис. 2, можна представити таким чином:

$$Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma}, \quad (3)$$

де R_{Σ} , X_{Σ} — активна та реактивна складові повного опору вологочутливої МДН-структури.

На основі отриманої математичної моделі, використовуючи пакет прикладних програм MathLab 5.2, отримано графіки залежностей активної і реактивної складових повного опору в залежності від вологості навколишнього середовища (рис. 3, 4).

Вимірювальна схема сенсора вологості

Вимірювальна схема запропонованого сенсора вологості складається з біполярного p - n - p транзистора $VT2$, вологочутливого двозатворного МДН-транзистора $VT1$, опорів навантаження $R1$, $R2$, індуктивності L , ємності C і джерел живлення і керування $U_{\text{кер}}$, $U_{\text{жив}}$ (рис. 5).

В початковий момент часу вологість навколишнього середовища діє на вологочутливий транзистор $VT1$. З підвищенням напруги на джерелах $U_{\text{кер}}$, $U_{\text{жив}}$ до величин, коли на виводах стік $VT1$ — колектор $VT2$ виникає від'ємний диференціальний опір, що спричиняє коливання електричного струму. Повний опір зазначеної ділянки кола характеризується вологочутливою ємністю, яка разом з індуктивністю L утворює коливальний контур. Конденсатор C запобігає проходженню змінного струму через керувальне джерело напруги $U_{\text{кер}}$. З подальшою зміною

відносної вологості на первинний перетворювач, його ємнісна складова повного опору змінюється, тим самим змінюючи резонансну частоту коливань електричної схеми [5].

Для аналізу цього кола створено еквівалентну схему запропонованого сенсора вологості, що зображена на рис. 6.

На основі еквівалентної схеми за методом контурних струмів складемо систему рівнянь Кірхгофа, розв'язок якої дасть залежність активної і реактивної складових повного опору схеми від рівня вологості навколишнього середовища.

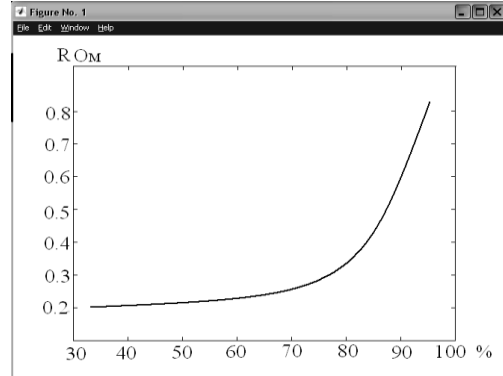


Рис. 3. Теоретична залежність активної складової повного опору двозатворного вологочутливого МДН-транзистора від вологості

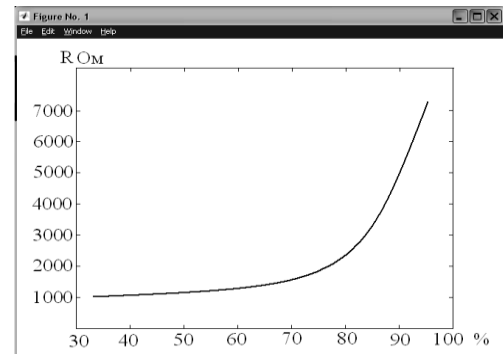


Рис. 4. Теоретична залежність реактивної складової повного опору двозатворного вологочутливого МДН-транзистора від вологості

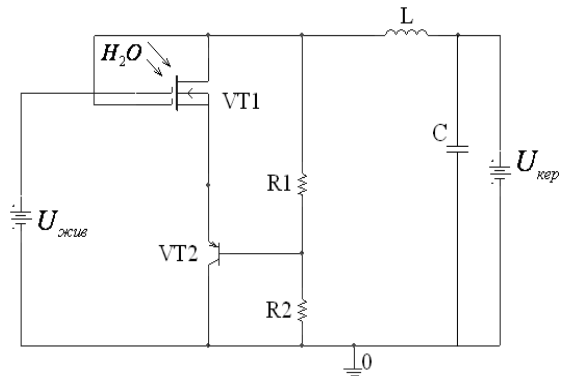


Рис. 5. Радіовимірювальний сенсор вологості

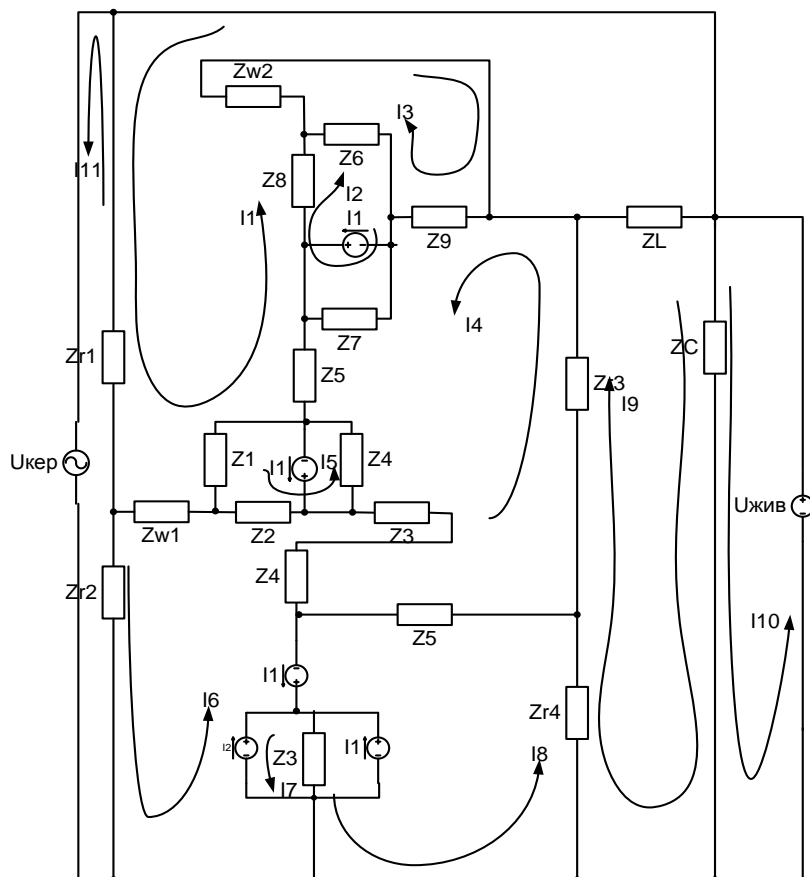


Рис. 6. Еквівалентна схема радіовимірювального сенсора вологості: Z_{r1}, Z_{r2} — повні опори

резисторів навантаження, $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, $Z_L = j\omega L$ — ємнісний та індуктивний опори коливального контуру

$$\begin{cases}
 i_1 (Z_{r1} + 2Z_{W1} + Z_1 + Z_5 + Z_9 + Z_L) + Z_{W2}i_2 + Z_8i_3 - (Z_5 + Z_{W2})i_4 - Z_1i_5 + Z_{W1}i_9 - Z_Li_{13} = \\
 = -Z_1I_1 - Z_8I_2; \\
 Z_{W1}i_1 + (Z_{W1} + Z_9 + Z_6)i_2 - Z_6i_3 + Z_9i_4 = Z_6I_2; \\
 Z_8i_1 - Z_6i_2 + (Z_8 + Z_7 + Z_6)i_3 + Z_7i_4 = -Z_6I_2 - Z_8I_2 + Z_7I_2; \\
 -(Z_5 + Z_{W2})i_1 + Z_9i_2 + Z_7i_3 + i_4 (Z_{r1} + 2Z_{W1} + Z_2 + Z_4 + 2Z_9 + Z_7 + Z_{r3}) - (Z_2 + Z_4)i_5 - \\
 - Z_9 \cdot i_6 + Z_6 \cdot i_7 + Z_{W1} \cdot i_8 - (Z_9 + Z_{W1} + Z_2) \cdot i_9 + Z_{r3} \cdot i_{12} = Z_8I_2 + Z_4I_1 - Z_2I_1 + Z_6I_1; \\
 - Z_1i_1 - (Z_3 + Z_4)i_4 + (Z_4 + Z_1 + Z_2)i_5 + Z_2i_9 = Z_1I_1 + Z_2I_1 - Z_4I_1; \\
 -Z_9i_4 + (Z_3 + Z_5 + Z_4 + Z_9 + Z_7 + Z_{r2})i_6 + Z_7i_6 + (Z_6 + Z_8 + Z_7)i_7 - Z_8i_8 = Z_4I_2 - Z_7I_1; \\
 Z_{W2}i_4 + Z_5i_6 - Z_8i_7 + (Z_{r4} + 2Z_{W2} + Z_1 + Z_5 + Z_8)i_8 - (-Z_{W2} + Z_1 + Z_5 + Z_8)i_9 - \\
 - Z_1i_{10} - Z_{W2}i_{11} + Z_{r4}i_{12} = -Z_7I_1 + Z_6I_1 + Z_8I_1; \\
 Z_{W1}i_1 - (Z_{W1} + Z_9 + Z_2)i_4 + Z_2i_5 + (Z_5 + Z_7 + Z_9)i_6 + Z_7i_7 + (Z_1 + Z_5)i_8 + \\
 + (Z_2 + 2Z_{W2} + Z_1 + Z_5 + Z_7 + Z_9)i_9 - Z_1i_{10} - Z_{W1}i_{11} = -Z_1I_2 - Z_8I_1; \\
 Z_4i_6 - Z_1i_8 - Z_1i_9 + (Z_1 + Z_2 + Z_4)i_{10} - Z_2i_{11} = Z_1I_2 + Z_2I_2 - Z_4I_2; \\
 Z_3i_6 - Z_{W2}i_8 - Z_{W2}i_9 - Z_2i_{10} + (Z_2 + Z_2 + Z_{W2})i_{11} = Z_2I_2; \\
 -Z_Li_1 + Z_{r3}i_4 + Z_{r4}i_8 + (Z_{r4} + Z_{r3} + Z_L)i_{12} = 0; \\
 Z_Ci_{12} + Z_Ci_{13} = -U_{Z2},
 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{де } Z_1 = \frac{(R_{зв1} - j\omega R_{зв1}^2 C_{зв1})}{\omega^2 R_{зв1}^2 C_{зв1}^2 + 1}; Z_2 = j\omega C_{зс1}; Z_3 = R_{в1}; Z_4 = \frac{(R_{св1} - j\omega R_{св1}^2 C_{св1})}{\omega^2 R_{св1}^2 C_{св1}^2 + 1}; Z_5 = R_{сс};$$

$$Z_6 = \frac{(R_{зв2} - j\omega R_{зв2}^2 C_{зв2})}{\omega^2 R_{зв2}^2 C_{зв2}^2 + 1}; Z_7 = \frac{(R_{св2} - j\omega R_{св2}^2 C_{св2})}{\omega^2 R_{св2}^2 C_{св2}^2 + 1}; Z_8 = j\omega C_{зс2}; Z_9 = R_{с2}.$$

Розв'язок цього рівняння дає змогу побудувати вольт-амперну характеристику приладу. На рис. 7 подано теоретичну і експериментальну вольт-амперні характеристики розробленого сенсора вологості. Як випливає з рисунку, графіки функцій мають спадну ділянку, що говорить про існування від'ємного диференціального опору. Тобто схема є генератором. Частота електричних коливань такого генератора залежить від вологості навколишнього середовища.

Розв'язавши систему рівнянь (4), побудовано графік вольт-амперної характеристики радіовимірювального сенсора вологості на основі двозатворного вологочутливого МДН-транзистора, показаний на рис. 7

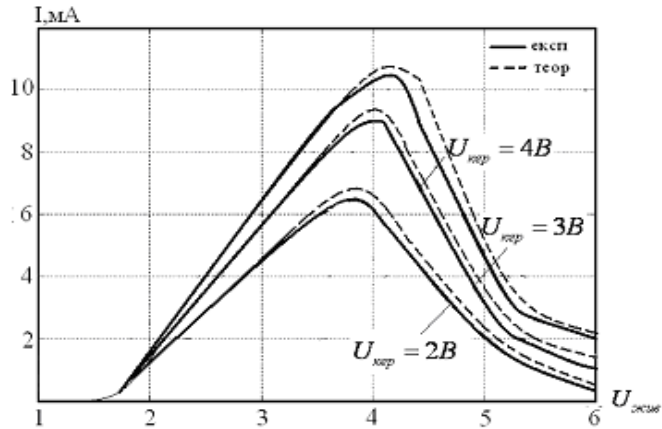


Рис. 7. Вольт-амперна характеристика радіовимірювального сенсора вологості

Висновки

У статті описані результати фізичного і математичного моделювання радіовимірювального сенсора вологості на основі вологочутливого двозатворного МДН-транзистора. За допомогою метода контурних струмів було розв'язано систему рівнянь, яка описує еквівалентну схему розробленої схеми, що дало змогу отримати аналітичне значення вольт-амперної характеристики даної схеми. В результаті фізичного моделювання отримано експериментальну вольт-амперну характеристику. Розбіжності між отриманими теоретичними і експериментальними даними знаходяться в межах похибки і доводить адекватність розробленої моделі приладу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Равновесные и неравновесные электродные процессы на пористом кремнии / [Е. А. Тутов, М. Н. Павленко, Е. Е. Тутов, и др.] // Письма в ЖТФ. — 2006. — № 13. — С. 6—11.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / [З. Ю. Готра, О. М. Мельник, В. Вуйцік та інші]. — Львів : Ліга-Прес, 2002. — 422 с.
3. Влияние процессов адсорбции воды на вольт-фарадные характеристики гетероструктур с пористым кремнием / [Е. А. Тутов, М. Н. Павленко, Е. Е. Тутов, и др.] // Письма в ЖТФ. — 2003. — № 11. — С. 83—89.
4. Патент України № 40955, кл. G01N 21/53. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, А. Ю. Савицький. — 27.04.09, Бюл. № 8.
5. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 208 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 30.03.11
Рекомендована до друку 12.04.11

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри, **Савицький Антон Юрійович** — аспірант.

Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця