

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ КИСЛОТНОСТІ ГРУНТУ НА БАЗІ ISFET-ТРАНЗИСТОРА

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено радіовимірювальний перетворювач кислотності ґрунту на базі ISFET-транзистора. Проведено схемотехнічне моделювання роботи пристрою в середовищі Altium. Отримано значення роздільної здатності радіовимірювального перетворювача кислотності ґрунту 0,004 pH що на порядок перевищує стандартні агротехнічні вимоги.

Ключові слова: моніторинг ґрунту, вимірювання кислотності ґрунту, параметри ґрунту, високий вхідний опір, сенсор..

Abstract

A radio measuring soil acidity converter based on an ISFET transistor has been developed. Circuit modeling of the device's operation has been performed in the Altium environment. The resolution value of the radio measuring soil acidity converter has been obtained to be 0.004 pH, which is an order of magnitude higher than standard agrotechnical requirements.

Keywords: soil monitoring, soil acidity measurement, soil parameters, high input resistance, sensor.

Вступ

Сучасні концепції точного землеробства та інтелектуального фермерства передбачають розгортання мереж автономних бездротових сенсорів для безперервного моніторингу кислотності ґрунту (pH). Показник кислотності є ключовим параметром, що визначає доступність поживних речовин для рослин та загальну родючість ґрунтів. Традиційні скляні електроди, попри високу точність, мають суттєві недоліки для польового використання, зокрема низьку механічну міцність та складність в обслуговуванні. Перспективною альтернативою є твердотільні іоноселективні польові транзистори (ISFET), зокрема з іоночутливим шаром на основі оксидів металів, таких як пентоксид танталу (Ta₂O₅). Такі сенсори вирізняються механічною міцністю, мініатюрністю та сумісністю з CMOS-технологіями виготовлення. Проте їх масове впровадження стримується складністю узгодження сигналу: надвисокий вхідний імпеданс, що зумовлює значну інерційність вхідного кола, та суттєва температурна залежність параметрів вимагають розробки спеціалізованих схемотехнічних рішень.

Більшість існуючих рішень для ISFET-сенсорів базуються на програмній температурній компенсації. Такий підхід передбачає постійні обчислення на стороні мікроконтролера, що збільшує загальне енергоспоживання системи, та часто призводить до неефективного використання динамічного діапазону АЦП. Крім того, робота з джерелами сигналу, опір яких перевищує 1 ГОм, робить систему вразливою до електромагнітних завад промислової частоти (50 Гц), що є критичним фактором для розподілених систем моніторингу в реальних польових умовах [1, 2].

Схема радіовимірювального перетворювача кислотності ґрунту

Ключовим компонентом розробленого пристрою є операційний підсилювач (ОП), що забезпечує узгодження з високим вхідним імпедансом ISFET-сенсора. Для реалізації вхідного каскаду обрано прецизійний підсилювач ОРА333, виконаний за КМОН-технологією. Вибір цієї мікросхеми зумовлений сукупністю технічних характеристик, критичних для прецизійного вимірювання. Зокрема, наднизький вхідний струм зміщення $I_{bias} \approx 70$ пА при роботі з джерелом сигналу, імпеданс якого становить 1 ГОм, створює систематичну похибку зміщення не більше 70 мВ, що піддається подальшому калібруванню. Використання технології Zero-Drift (автоматична корекція нульового зміщення) мінімізує температурний дрейф напруги зміщення до рівня 0.05 мкВ/°С. Це є

визначальним фактором для польових систем, де добові коливання температури ґрунту суттєво впливають на стабільність показів. Крім того, мале споживання (власний струм 17 мкА) дозволяє реалізувати концепцію енергоефективних вузлів моніторингу з тривалим терміном автономної роботи [3, 4].

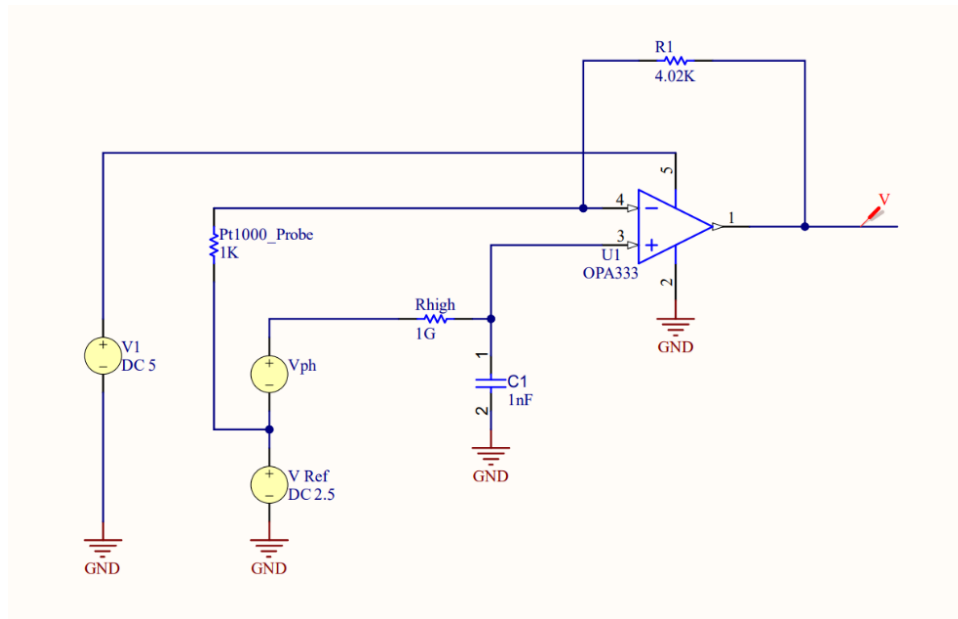


Рис. 1. Електрична схема радіовимірювального перетворювача кислотності ґрунту

Моделювання радіовимірювального перетворювача вологості ґрунту

Для верифікації запропонованого схемотехнічного рішення проведено серію комп'ютерних симуляцій у середовищі SPICE. Моделювання виконувалося для умов «найгіршого випадку» з урахуванням внутрішнього імпедансу джерела сигналу $R_{source} = 1 \text{ ГОм}$ та паразитної ємності монтажу. Такий підхід дозволив оцінити стабільність роботи схеми за максимальної часової затримки сигналу, зумовленої реактивним характером вхідного кола. Моделювання підтвердило лінійність перетворення сигналу ISFET-сенсора (pH 0–12) з вихідною напругою 0,66–4,22 В. Як видно з рис. 2, залежність V_{out} від V_{ph} має лінійний характер ($R2 > 0.99$) із крутизною $S \approx 297 \text{ мВ/рН}$. Це забезпечує роздільну здатність 0,004 рН у межах динамічного діапазону АЦП без ризику насичення підсилювача OPA333. Робоча точка при pH 7 відповідає напрузі 2,144 В.

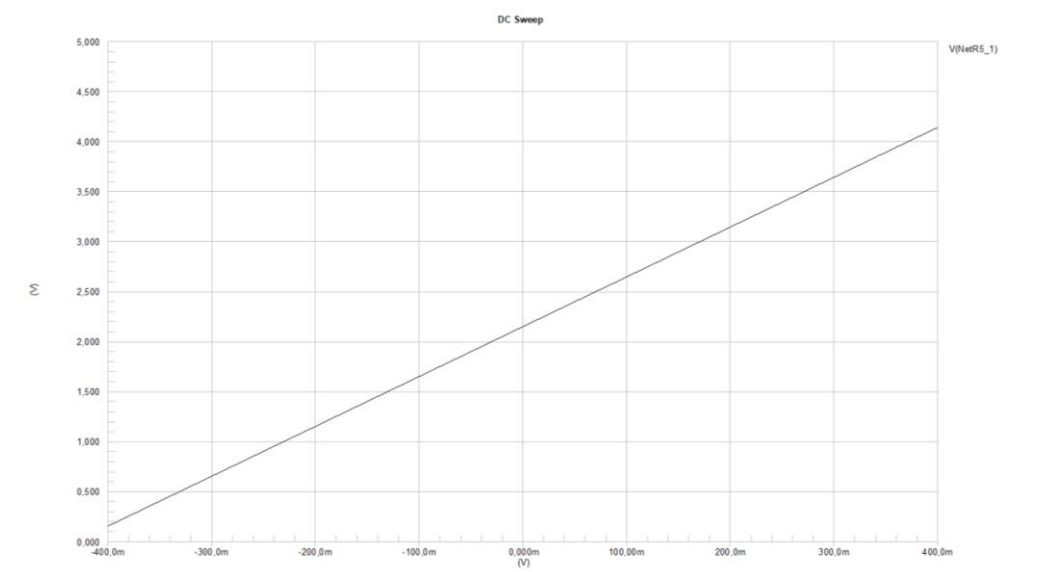


Рис. 2. Залежність вихідної напруги V_{out} від вхідного потенціалу V_{ph}

На рисунку 3 представлено сімейство характеристик автоматичного регулювання підсилення в діапазоні температур 0–50°C, що підтверджує ефективність обраної стратегії апаратної термокомпенсації за допомогою резистора Pt1000 у колі зворотного зв'язку. Результати моделювання наочно демонструють стабільність вихідної напруги в ізопотенціальній точці при $V_{in} \approx 0$, де вплив температурних чинників на точність вимірювання нівелюється згідно з рівнянням Нернста. Таке схемотехнічне рішення дозволяє адаптивно коригувати крутизну характеристики в аналоговій формі, забезпечуючи високу метрологічну стабільність системи без залучення додаткових обчислювальних ресурсів мікроконтролера.

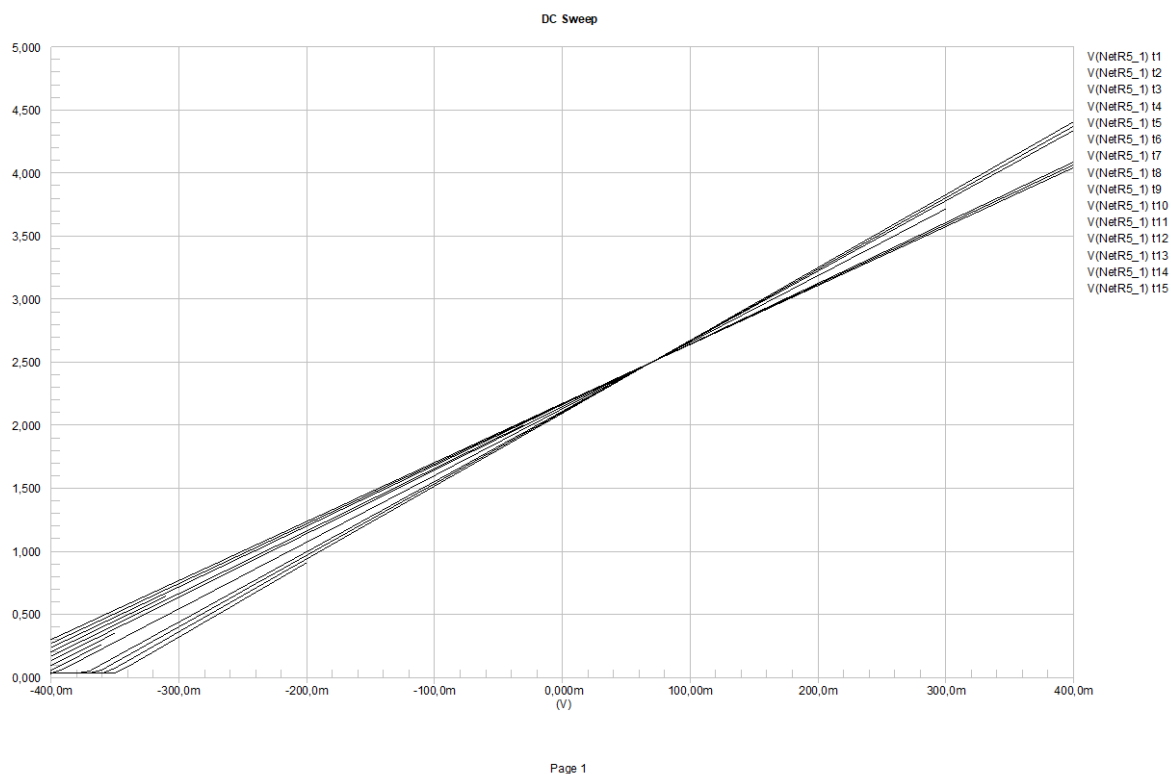


Рис. 3. Сімейство характеристик автоматичного регулювання підсилення

Таблиця 1. Калібрувальна характеристика розробленого датчика кислотності

Рівень кислотності (pH)	ΔрН від нейтралі	Розрахункова напруга V_{out} (В)
0 (Кислота)	+7	4.223
2	+5	3.629
4	+3	3.035
6	+1	2.441
7 (Нейтральне середовище)	0	2.144
8	-1	1.847
10	-3	1.253
12 (Луг)	-5	0.659

Як свідчать дані таблиці 1, вихідний сигнал змінюється в межах 0.659...4.223 В. Це гарантує стабільну роботу операційного підсилювача ОРА333 у лінійному режимі без ризику входження у стан насичення, оскільки вихідна напруга не наближається до рівнів шин живлення 0 В та +5 В ближче ніж на 0.6 В, що відповідає технічним вимогам до динамічного діапазону обраної мікросхеми.

Висновки

Розроблено радіовимірювальний перетворювач кислотності ґрунту на основі ISFET-транзистора. Даний перетворювач може бути використаний для вимірювання кислотності ґрунту у сільському господарстві. У роботі спроектовано радіовимірювальний перетворювач на базі ISFET-сенсора та ОП ОРА333, що забезпечує вхідний імпеданс до 1 ГОм. За результатами SPICE-моделювання підтверджено лінійність характеристики ($R_2 > 0,99$) у діапазоні pH 0–12 із роздільною здатністю 0,004 pH. Впроваджена апаратна термокомпенсація (0–50°C) та пасивна фільтрація (придушення завад -50 дБ) гарантують стабільність сигналу при мінімальному енергоспоживанні аналогового тракту — лише 0,62 мВт. Це становить менше 1% енергобалансу LoRaWAN-вузла, що робить пристрій оптимальним для автономного моніторингу на базі акумуляторів 18650.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Найновіші технології в області pH-метрів: від ручних до лабораторних [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://simvolt.ua/nainovishi-tekhnohii-v-oblasti-ph-metriv-vid-ruchnykh-do-laboratorykh/>.
2. Riedel, V., Hinck, S., Peiter, E., & Ruckelshausen, A. (2024). Concept and Realisation of ISFET-Based Measurement Modules for Infield Soil Nutrient Analysis and Hydroponic Systems. *Electronics*, 13(13), 2449.
3. Sinha, S., Sahu, N., Bhardwaj, R., & Shekhar, C. (2020). Modeling and simulation of temporal and temperature drift for the development of an accurate ISFET SPICE macromodel. *Journal of Computational Electronics*, 19(1), 214-227.
4. Chung, W. Y., Cruz, F. R., Yang, C. H., Jarosewicz, B., & Pijanowska, D. G. (2010). CMOS Readout Circuit Developments for Ion Sensitive Field Effect Transistor Based Sensor Applications. In *Ion-Selective Electrodes*, 239-266.

Савицький Антон Юрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, ВНТУ, Вінниця, e-mail: savitskyant@gmail.com

Кропив'янський Євгеній Олександрович — аспірант, факультет інформаційних електронних систем, ВНТУ, Вінниця, e-mail: machete325@gmail.com

Savitsky Anton Y. — Cand. Sc., Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, VNTU, Vinnytsia, email: savitskyant@gmail.com

Kropyvianskyi Yevhenii O. — postgraduate, faculty of information electronic systems, VNTU, Vinnytsia, e-mail: machete325@gmail.com