

КРОПИВ'ЯНСЬКИЙ ЄВГЕНІЙ

Вінницький національний технічний університет
e-mail: machete325@gmail.com

ЗВ'ЯГІН ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-5386-6057>
e-mail: zviahin86@gmail.com

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ НА БАЗІ ПЕРВИННОГО СЕНСОРА YL-69

Розроблено радіовимірювальний перетворювач вологості ґрунту з вологочутливим резистивним елементом YL-69 на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Визначено аналітичний вираз для функції перетворення РПВГ. Проведено комп'ютерне моделювання роботи радіовимірювального перетворювача в середовищі OrCAD. Отримано експериментальну функцію перетворення РПВГ на базі первинного сенсора YL-69.

Ключові слова: Моніторинг ґрунту, вимірювання вологості, від'ємний опір, автогенератор, сенсор, функція перетворення.

KROPYVIANSKYI YEVHENII, ZVIAHIN OLEKSANDR
Vinnytsia National Technical University

RADIO-MEASURING SOIL MOISTURE CONVERTER BASED ON PRIMARY SENSOR YL-69

Soil moisture monitoring in agriculture is becoming an integral part of ensuring optimal conditions for plant growth and achieving high yields, as well as an important environmental aspect for preserving natural resources and ecosystems. The increasing popularity of wireless sensor networks for measuring soil moisture underscores the need for the development of modern technologies in this field. This enables a continuous flow of real-time data on soil conditions, which is crucial for effective agricultural management and ecological balance. The paper presents the development of a radio-based soil moisture transducer with a moisture-sensitive resistive element based on a transistor structure with negative resistance. The YL-69 resistive sensor was utilized as the primary soil moisture sensor. An analytical expression for the conversion function of the radio-based soil moisture transducer is determined. Computer simulation of the transducer's operation was conducted in the OrCAD environment, resulting in a family of current-voltage characteristics for the investigated radio-based transducer. A region with negative differential resistance is observed on the current-voltage characteristics. An experimental conversion function of the radio-based soil moisture transducer based on the YL-69 primary sensor was obtained. From the conversion function, it is evident that as soil moisture increases in the range from 0% to 50%, the frequency of the output signal of the radio-based soil moisture transducer decreases from 680 kHz to 452 kHz. The highest sensitivity value of the radio-based soil moisture transducer is achieved in the soil moisture measurement range from 20% to 45% and is 8.7 kHz/%. The operation of radio-based soil moisture transducers is based on the functional dependence of semiconductor device impedance on soil moisture, which opens up wide prospects for improving agricultural technologies and preserving the environment. This transducer can be used for measuring soil moisture in agriculture, which can be utilized to create automatic systems for monitoring soil moisture and watering plants.

Keywords: Soil monitoring, moisture measurement, negative resistance, autogenerator, sensor, conversion function.

Вступ

Вимірювання вологості ґрунту визначається як ключовий аспект для забезпечення оптимальних умов для росту рослин та збільшення урожаїв у сільському господарстві. Окрім того, контроль за вологою ґрунту відіграє значну роль у збереженні екологічної рівноваги та підтримці екосистем. В умовах зміни клімату та зростання населення, важливість моніторингу вологості ґрунту ще більше зростає. Використання бездротових сенсорних мереж для цієї мети стає все більш популярним, оскільки це забезпечує постійний потік даних у реальному часі, що є важливим для ефективного сільського господарства та екологічного управління, тому зростає потреба в розробці точних та завадостійких датчиків для вимірювання вологості ґрунту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток сучасних сенсорів вимірювання вологості ґрунту відіграє ключову роль у цьому процесі, дозволяючи збирати точні дані про вологість та передавати їх бездротово, що в свою чергу забезпечує ефективне управління ґрунтовими ресурсами та максимізує врожайність. Вибір надійних методів вимірювання вологості ґрунту, створення точних вимірювальних пристроїв і вивчення впливу різних факторів на результати вимірювань стають ключовими завданнями. Робота радіовимірювальних перетворювачів ґрунту базується на функціональній залежності імпедансу напівпровідникових приладів від вологості ґрунту, що відкриває широкі перспективи для покращення сільськогосподарських технологій та збереження навколишнього середовища [1].

Отже, розробка та практичне застосування таких пристроїв є актуальною задачею.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Мета дослідження: розробка пристрою з частотним вихідним сигналом для вимірювання вологості ґрунту на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

На рис.1. представлено запропоновану схему РПВГ.

Схема радіовимірювального перетворювача вологості складається з р-п-р-біполярного транзистора і двозатворного n-канального МДН-транзистора, живлення яких здійснюють джерела постійної напруги U_1 і U_2 , пасивної індуктивності L , подільника напруги R_1 та R_2 , конденсатора C і чутливого елемента – первинного сенсора для вимірювання вологості YL-69 (R_w) [2].

Робота радіовимірювального перетворювача вологості відбувається таким чином: спочатку зміна вологості не впливає на вологочутливий елемент R_w . Підвищення напруги від управляючих джерел U_1 і U_2 до певного рівня призводить до появи від'ємного опору на електродах колектора - стік біполярного транзистора VT_1 і польового транзистора VT_2 , що спричиняє виникнення електричних коливань у контурі. Даний контур формується послідовним з'єднанням повного опору з ємнісною складовою на електродах колектора - стік транзисторів VT_1 і VT_2 , а також індуктивного опору пасивної індуктивності L . Конденсатор C перешкоджає протіканню змінного струму через керуюче джерело напруги U_2 . При подальших змінах вологості ґрунту опір R_w змінюється, що призводить до зміни ємнісної складової повного опору на електродах колектора - стік транзисторів VT_1 і VT_2 , це призводить до зміни резонансної частоти коливального контуру [3, 4].

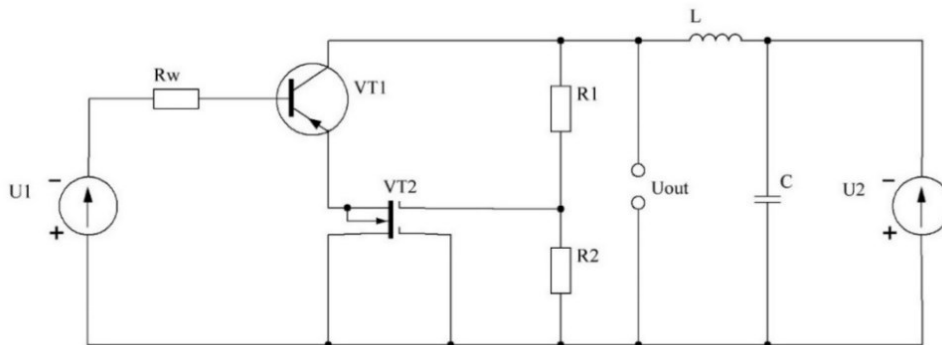


Рис. 1. Електрична схема радіовимірювального перетворювача вологості ґрунту

На рис. 2 представлено залежність зміни опору первинного сенсора YL-69 від масової частки вологості для торф'яного, сульфідного та суглинного ґрунту [5, 6].

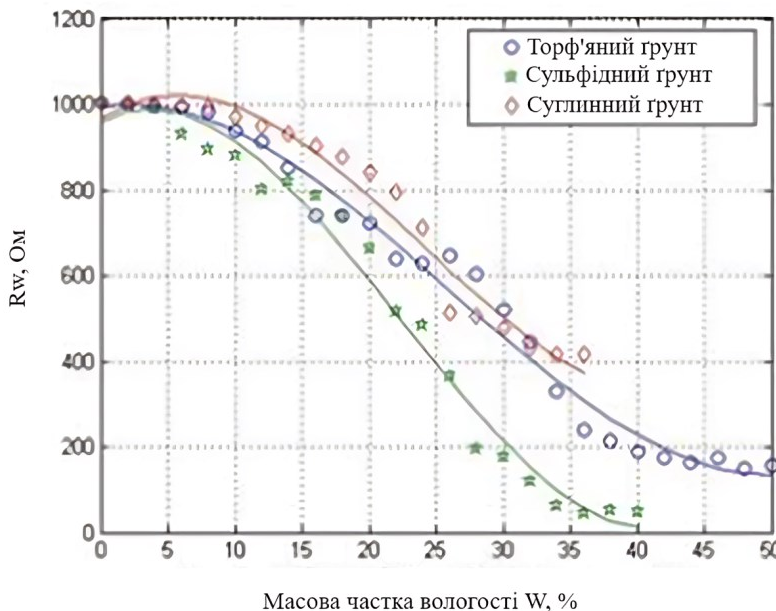


Рис. 2. Графік залежності опору первинного сенсора YL-69 від масової частки вологості ґрунту

Моделювання радіовимірювального перетворювача вологості ґрунту

Для моделювання радіовимірювального перетворювача було використано пакет програм OrCAD X Professional. В якості біполярного транзистора виберемо транзистор марки BC857A, а в якості польового транзистора – BF998. На рис. 3 представлено схему досліджуваного радіовимірювального перетворювача вологості ґрунту в середовищі OrCAD X Professional [7, 8].

На рис. 4 представлено сімейство вольт-амперних характеристик досліджуваного радіовимірювального перетворювача, отриманих внаслідок комп'ютерного моделювання. ВАХ змінюються залежно від прикладеної напруги керування V_1 : нижня характеристика знята при $V_1=1,5$ В, далі напруга керування збільшувалась на 0,5 В до верхньої характеристики, яка була знята при $V_1=3,5$ В.

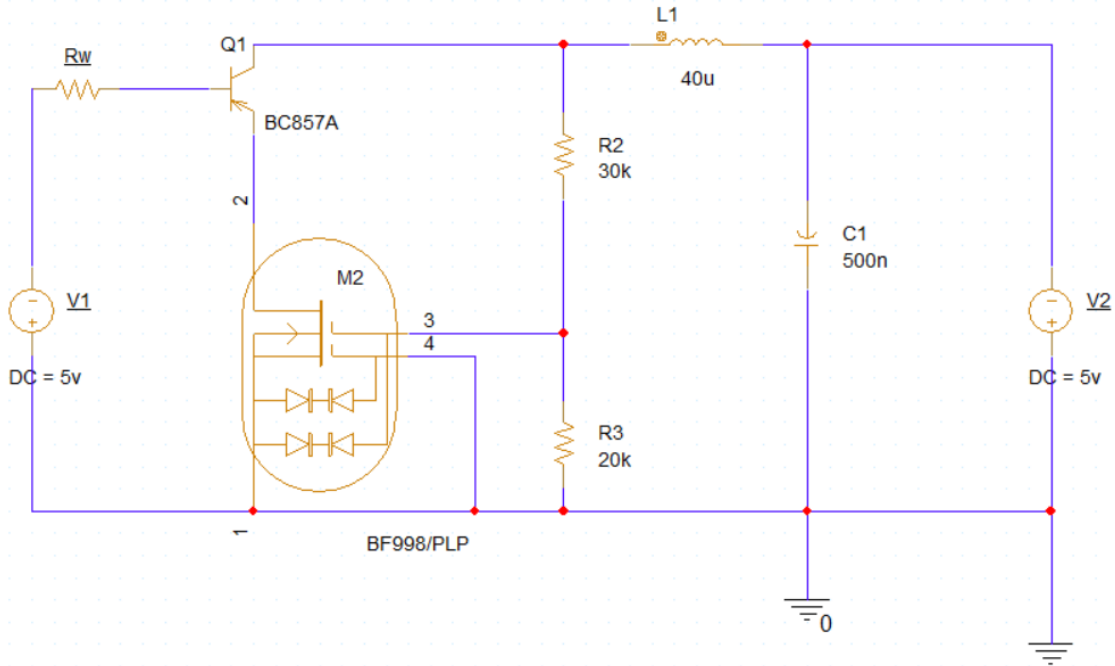


Рис. 3. Електрична схема перетворювача вологості, в середовищі OrCAD

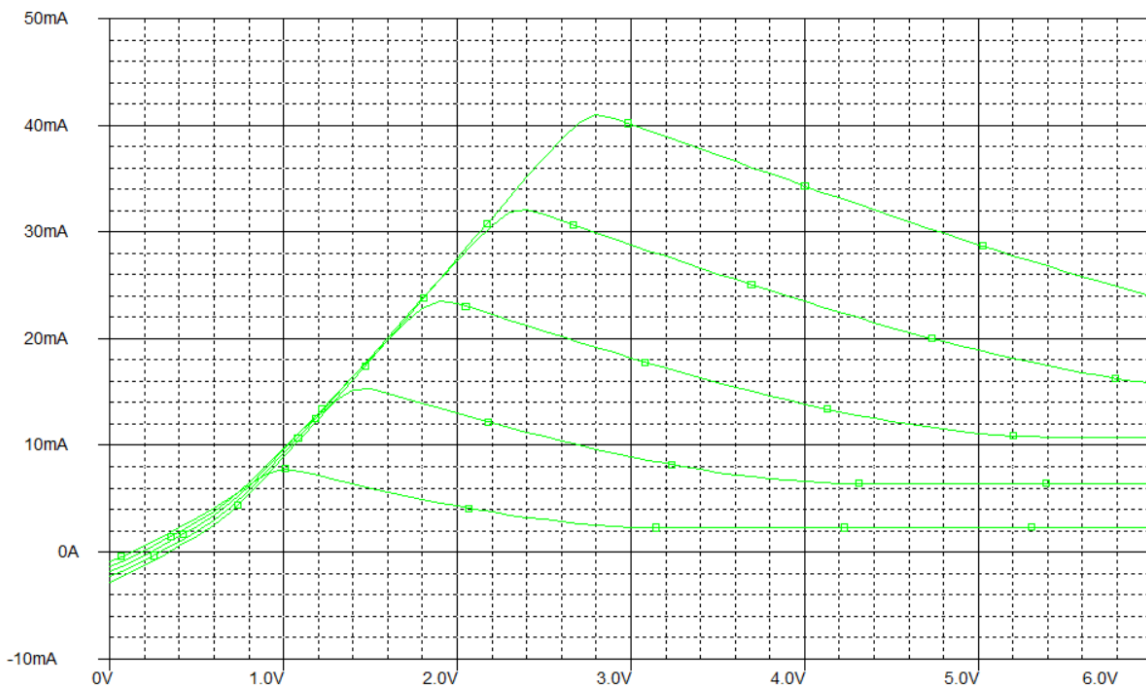


Рис. 4. Сімейство ВАХ перетворювача вологості при різних значеннях напруги керування

На рис. 5 представлено залежність зміни вихідного струму від часу для досліджуваного перетворювача вологості.

Спираючись на залежність опору первинного сенсора YL-69 від масової частки вологи ґрунту (рис. 2) було здійснене моделювання при значеннях вологості 15% та 30%.

На рис. 6 представлено залежність зміни вихідної напруги досліджуваного перетворювача вологості при рівні вологості ґрунту $W=15\%$. В результаті комп'ютерного моделювання отримано частоту генерації 671 кГц.

На рис. 7 представлено залежність зміни вихідної напруги досліджуваного перетворювача вологості при рівні вологості ґрунту $W=30\%$. В результаті комп'ютерного моделювання отримано частоту генерації 583 кГц.

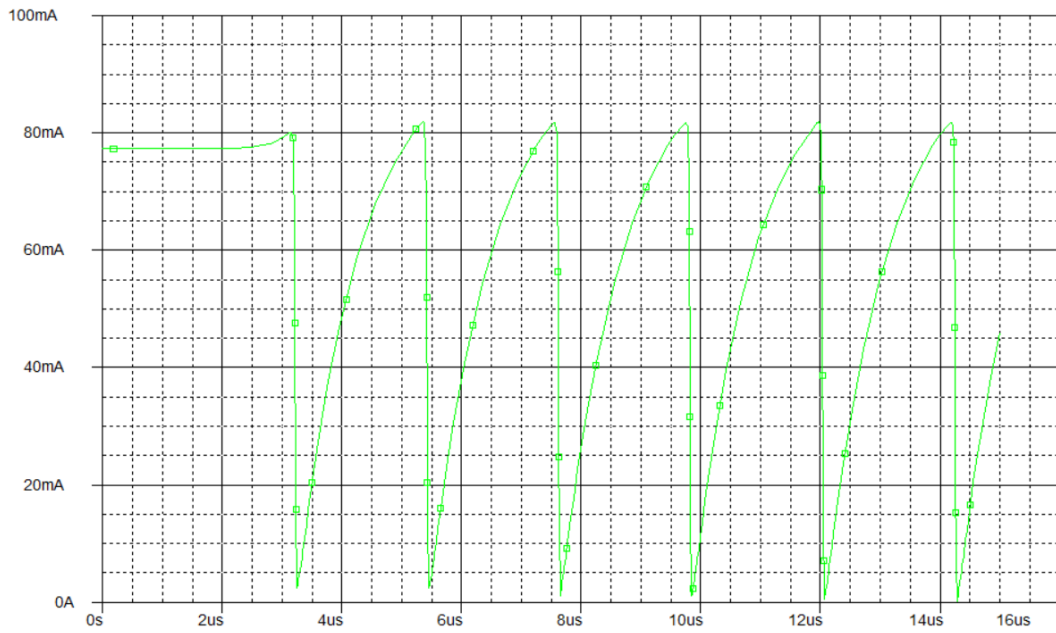


Рис. 5. Залежність зміни вихідного струму від часу

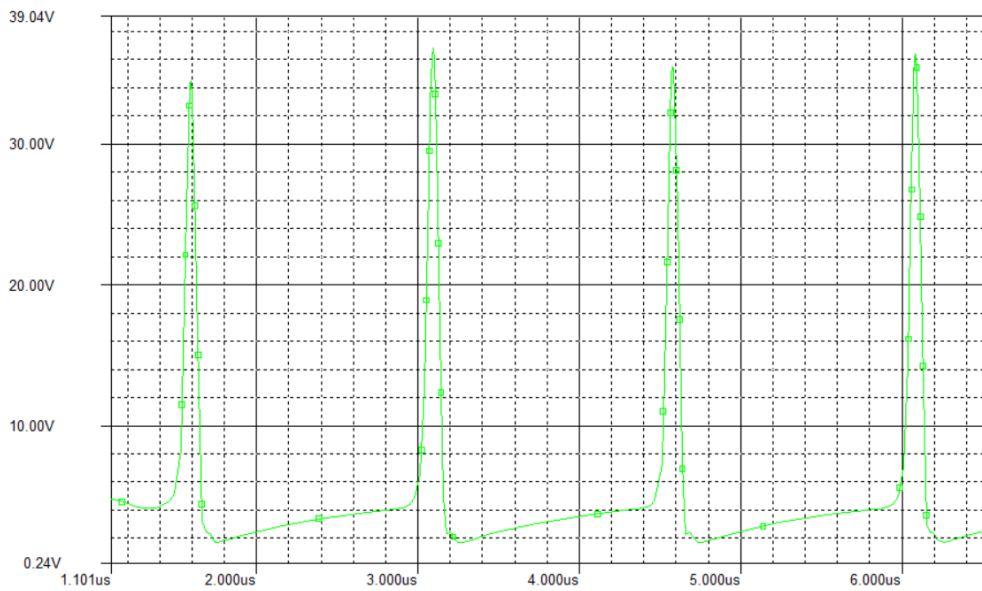


Рис. 6. Залежність зміни вихідної напруги від часу при рівні вологості ґрунту W=15%

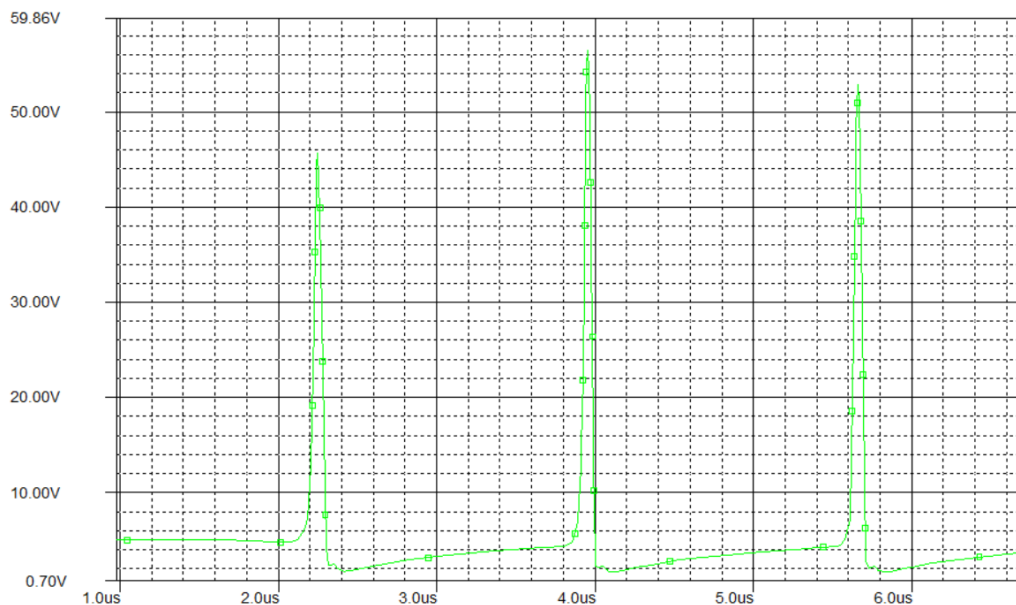


Рис. 7. Залежність зміни вихідної напруги від часу при рівні вологості ґрунту W=30%

Отже, моделювання радіовимірювального перетворювача вологості (рис. 3) в середовищі OrCAD довело можливість створення на практиці цього радіовимірювального перетворювача. Також завдяки проведеному моделюванню, стало зрозумілим, яку елементну базу краще використовувати.

Визначення функції перетворення радіовимірювального перетворювача вологості

Для моделювання радіовимірювального перетворювача вологості скористаємося методом контурних струмів. При проведенні досліджень властивостей цього перетворювача необхідно визначити повний опір на електродах колектор-стік (рис. 1). Повний опір Z визначається з перетвореної еквівалентної схеми радіовимірювального перетворювача, яку подано на рис. 8.

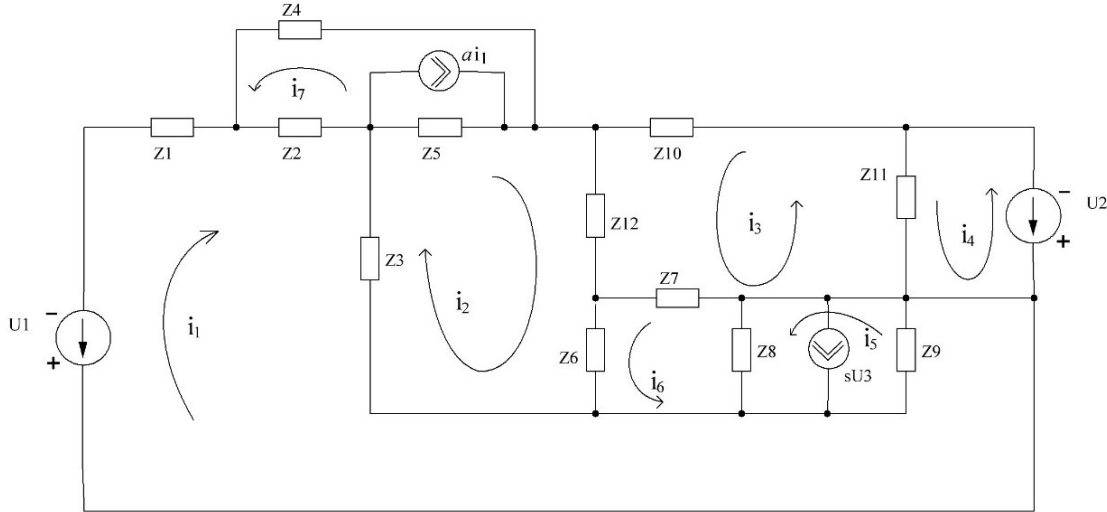


Рис. 8. Перетворена еквівалентна схема перетворювача вологості

Згідно з вибраними напрямками контурних струмів система рівнянь Кірхгофа має вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_9) \cdot i_1 + Z_2 \cdot i_7 - Z_3 \cdot i_2 + Z_9 \cdot i_5 + Z_9 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2, \\ 0 = (Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_{12}) \cdot i_2 - Z_3 \cdot i_1 - Z_5 \cdot a \cdot i_1 + Z_5 \cdot i_7 + Z_6 \cdot i_6 + Z_{12} \cdot i_3, \\ 0 = (Z_7 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12}) \cdot i_3 - Z_7 \cdot i_6 - Z_{11} \cdot i_4 + Z_{12} \cdot i_2, \\ U_2 = Z_{11} \cdot i_4 - Z_{11} \cdot i_3, \\ 0 = (Z_8 + Z_9) \cdot i_5 - Z_8 \cdot i_6 - Z_8 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2 + Z_9 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2 + Z_9 \cdot i_1, \\ 0 = (Z_6 + Z_7 + Z_8) \cdot i_6 + Z_6 \cdot i_2 - Z_7 \cdot i_3 - Z_8 \cdot i_5 + Z_8 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2, \\ 0 = (Z_2 + Z_4 + Z_5) \cdot i_7 + Z_2 \cdot i_1 + Z_5 \cdot i_2 - Z_5 \cdot a \cdot i_1, \end{cases} \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_w, Z_2 = R_b, Z_3 = \frac{R_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2} - j \frac{R_e^2 \omega C_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2}, Z_4 = \frac{1}{j \omega C_k}, Z_5 = R_k \\ Z_6 &= \frac{R_{gs}}{1 + (\omega C_{gs} R_{gs})^2} - j \frac{R_{gs}^2 \omega C_{gs}}{1 + (\omega C_{gs} R_{gs})^2}, Z_7 = \frac{R_2}{1 + (\omega C_{gd} R_2)^2} - j \frac{R_2^2 \omega C_{gd}}{1 + (\omega C_{gd} R_2)^2}, \\ Z_8 &= R_{ds}, Z_9 = \frac{1}{j \omega C_{ds}}, Z_{10} = j \omega L_1, Z_{11} = \frac{1}{j \omega C_1}, Z_{12} = R_1, \alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}. \end{aligned}$$

α – комплексне значення коефіцієнта передачі по струму, s – крутизна польового транзистора.

Для визначення функції перетворення потрібно встановити залежність частоти генерації від вологості ґрунту. Це можна зробити, розв'язавши систему рівнянь Кірхгофа, складену для змінного струму на основі еквівалентної схеми (рис. 8). Розв'язання системи рівнянь (1) дозволить знайти значення повного опору на електродах колектор-стік радіовимірювального перетворювача. При розкладанні повного опору на дійсну та уявну складові можна визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від вологості ґрунту. У такому випадку, розрахована функція перетворення буде мати наступний вигляд:

$$F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{R_{екв}(W) \cdot C_{екв}(W)} \sqrt{\frac{R_{екв}^2(W) \cdot C_{екв}(W)}{L} - 1} \quad (2)$$

На рис. 9 подано теоретичну та експериментальну залежності функції перетворення РПВГ, вологочутливим елементом якої є датчик вологості YL-69.

Висновки

Розроблено радіовимірювальний перетворювач вологості ґрунту на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Даний перетворювач може бути використаний для вимірювання вологості ґрунту у сільському господарстві, який можливо буде використати для створення автоматичних систем моніторингу вологості ґрунту та поливу рослин. В якості вологочутливого резистивного елементу було використано первинний сенсор YL-69. Визначено аналітичний вираз для функції перетворення РПВГ. Проведено комп'ютерне моделювання роботи радіовимірювального перетворювача в середовищі OrCAD. Отримано експериментальну функцію перетворення РПВГ.

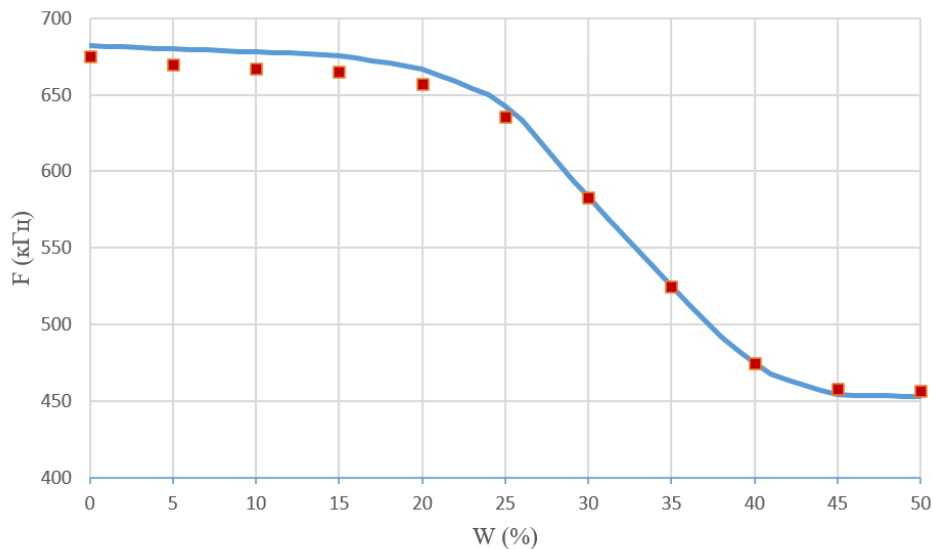


Рис. 9. Теоретична та експериментальна залежності частоти генерації від вологості ґрунту

Література

1. Розробка системи віддаленого спостереження стану ґрунту [Електронний ресурс]. Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41993>.
2. Newly calibrated analytical models for soil moisture content and pH value by low-cost YL-69 hygrometer sensor [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026322411831008X>.
3. Controlled Microwave Autogenerator on a Complementary Pair of Mosfet Transistors [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9840980>.
4. Осадчук О. В. Мікроелектронний засіб для вимірювання вологості нафтопродуктів / О. В. Осадчук, О. С. Звягін, А. Ю. Савицький. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – №2. – С. 218–222.
5. Sudha, L. K., & Sinha, A. (2015). Effect of moisture content in the sandy, clay and loamy soil using humidity sensor YL-69. *International Journal of Scientific Research*, 6, 107–110.
6. Ekwue, E., & Bartholomew, J. (2011). Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. *Biosystems Engineering*, 108(2), 95–103.
7. Preliminary design and soil moisture sensor yl-69 calibration for implementation of smart irrigation [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/341728115_Preliminary_design_and_soil_moisture_sensor_yl-69_calibration_for_implementation_of_smart_irrigation.
8. Осадчук О. В. Математичне моделювання пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, Я. О. Осадчук, О. С. Звягін. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2021. – №3. – С. 124–130.

References

1. Rozrobka systemy viddalenooho sposterihennya stanu grunty [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41993>.
2. Newly calibrated analytical models for soil moisture content and pH value by low-cost YL-69 hygrometer sensor [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026322411831008X>.
3. Controlled Microwave Autogenerator on a Complementary Pair of Mosfet Transistors [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9840980>.
4. Osadchuk O. V. Mikroelektronnyy zasib dlya vimiryuvannya volohosti naftoproductiv / O. V. Osadchuk, O. S. Zvyahin, A. Yu. Savytskyy. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2014. – №2. – S. 218–222.
5. Sudha, L. K., & Sinha, A. (2015). Effect of moisture content in the sandy, clay and loamy soil using humidity sensor YL-69. *International Journal of Scientific Research*, 6, 107–110.
6. Ekwue, E., & Bartholomew, J. (2011). Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. *Biosystems Engineering*, 108(2), 95–103.
7. Preliminary design and soil moisture sensor yl-69 calibration for implementation of smart irrigation [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: https://www.researchgate.net/publication/341728115_Preliminary_design_and_soil_moisture_sensor_yl-69_calibration_for_implementation_of_smart_irrigation.
8. Osadchuk O. V. Matematychno modelyuvannya prystroyu z chastotnym vykhodom dlya vimiryuvannya volohosti / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, Ya. O. Osadchuk, O. S. Zvyahin. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2021. – №3. – S. 124–130.