

В.М. Теслюк, д.т.н., професор, НУ “Львівська Політехніка”, Львів,
А.І. Пукач, аспірант НУ “Львівська політехніка”, Львів,
Р.-А. Д. Іванців, к.т.н., доцент, НУ “Львівська Політехніка”, Львів,
М.В. Лобур, д.т.н., професор, НУ “Львівська Політехніка”, Львів.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ВЕЛИЧИН ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

Abstract. The developed schematic model, algorithm and functional model of measuring system for solving the problem of measuring small quantities of electrical resistance, using technologies of microelectromechanical systems (MEMS).

Актуальність

Активне впровадження у всі сфери повсякденного життя пристроїв побудованих на основі технологій мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [1-5] зумовлене рядом їх беззаперечних переваг, а саме: мікронними розмірами, функціональністю, надійністю, малим енергоспоживанням, простотою інтегрування та іншими. Застосування МЕМС технологій потребує розроблення ефективних методів вимірювання малих змін величини електричного опору, які притаманні саме цим інтегральним пристроям, адже розміри компонентів, виготовлених з допомогою МЕМС, є надзвичайно малими.

Аналіз проблеми

В ряді робіт наведено методи [11] вимірювання величини невідомого опору електричного кола, а також їх основні переваги та недоліки. Зокрема метод вольтметра-амперметра. Цей метод [6, 7] найбільш простий і легко може бути пристосований для фіксації швидких змін електричного опору. При аналізі обох різновидів методу не враховується опір з'єднувальних проводів і перехідні опори контактів, а це є суттєвим недоліком при застосуванні даного методу для вимірювання опорів у пристроях, виготовлених за МЕМС-технологіями. Мостові методи вимірювання електроопору [6, 8, 9] призначені для точних вимірювань електричних опорів і являють собою технічну реалізацію одного з варіантів методу зрівноважувального перетворення. Дають змогу компенсувати вплив контактних площадок та з'єднувальних провідників, основним їх недоліком є велика вимогливість до стану рівноваги електричного моста, що рівносильно точності вимірювання. Компенсаційний метод [6, 8] ґрунтується на порівнянні падіння напруги на зразку і еталонному або зразковому резисторі. Компенсаційний метод вимірювання найдоцільніше застосовувати для вимірювань опорів з високою точністю тоді, коли треба усунути вплив з'єднувальних провідників. Широке його застосування в МЕМС-технологіях обмежується складністю реалізації, а також впливом нестабільності струмів,

яка особливо відчутна при вимірюванні низькоомних опорів. Вимірювання електричного опору безконтактними [10] методами. (метод трансформатора, метод вихрових струмів, метод, що базується на відбиванні енергії надвисокочастотних коливань) є надзвичайно високоточними методами, проте їх схемна реалізація обмежує широке використання у MEMC. Вимірювання електричного опору за допомогою електронних (цифрових) омметрів [11] (електронні омметри, цифрові омметри, диференційний метод вимірювання електричного опору, компенсаційний метод побудови цифрових омметрів), як і попередні, являються високоточними та надзвичайно добре автоматизованими методами, проте і їх схемна реалізація є надзвичайно складною для використання в MEMC технологіях.

Отже, в результаті проведеного огляду й аналізу існуючих методів і схем вимірювання значення величини невідомого опору електричного кола були наведені основні переваги та недоліки кожної групи методів і обрано мостові методи як найбільш придатні для використання у MEMC-технологіях, адже вони володіють рядом переваг, зокрема: дають змогу усунути вплив опору з'єднувальних провідників на результат вимірювання, є простими в реалізації, володіють широким діапазоном вимірюваних значень, а також при використанні цифрового порозрядного урівноваження мостової схеми дають змогу значно знизити похибку вимірювання (до декількох тисячних долей відсотка).

Розроблення схемної моделі системи вимірювання малих величин електричного опору

Нижче на рис. 1 зображена схемна модель вимірювальної системи, побудованої на основі мостової схеми і призначеної для вимірювання малих величин електричного опору.

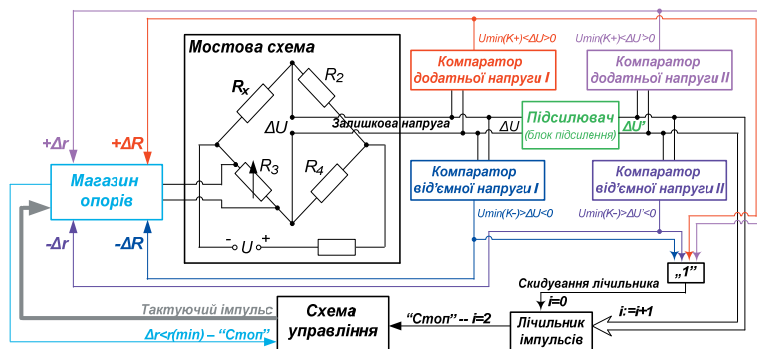


Рис. 1. Схемна модель системи вимірювання малих величин електричного опору

Розроблена схемна модель містить такі основні блоки: мостову схему, ряд компараторів додатньої та від'ємної напруг, підсилювач (блок підсилення), магазин опорів, лічильник імпульсів, логічний блок та схему

(блок) управління. Основне призначення мостової схеми полягає у виявленні залишкової напруги ΔU в околі точки рівноваги електричного моста. Компаратори додатної та від'ємної напруги призначені для фіксації залишкової напруги, її величини та полярності для подальшої зміни величини керованого опору R_3 з допомогою магазину опорів. У випадку, коли величина залишкової напруги ΔU є недостатньо великою для фіксації її першим каскадом компараторів (каскадом I), вона поступає на вхід підсилювача (блоку підсилення) із сталим і стабільним коефіцієнтом підсилення з метою подальшої фіксації одним із компараторів другого каскаду II. Якщо навіть після підсилення жоден із компараторів не зафіксував залишкової напруги ΔU , збільшується лічильник імпульсів, і при досягненні значення лічильника 2 робота вимірювальної системи завершується та відбувається підрахунок величини невідомого електричного опору R_x . Основне призначення схеми управління полягає в забезпеченні потактової роботи системи, зупинці вимірювального процесу при досягненні лічильником імпульсів значення 2, або при досягненні величини дискретизації керованого опору меншого за мінімальне $-\Delta r < r(\min)$.

Розроблення методу вимірювання малих величин електричного опору

Алгоритм функціонування вимірювальної системи зображений нижче на рис. 2.

В основі вимірювальної системи – схема одинарного електричного моста для вимірювання електричного опору, що містить 3 відомі електричні опори – R_2 , R_3 та R_4 (з яких R_3 є керованим – тобто може змінюватись в процесі вимірювання з метою врівноваження електричного моста), та невідомий (вимірюваний) електричний опір R_x . На попередньому етапі відбувається встановлення початкових значень параметрів схеми, а саме: величини керованого опору R_3 та лічильника $i=0$ – котрий відповідає за зупинку циклічного вимірювального процесу при досягненні стану рівноваги електричного моста. Після цього відбувається перший цикл роботи, котрий розпочинається із процесу вимірювання залишкової напруги ΔU в околі точки рівноваги електричного моста. У випадку, коли виявлена залишкова напруга додатна ($\Delta U > 0$) – відбувається збільшення керованого опору R_3 на величину ΔR , обнулення лічильника i , та перехід до наступного циклу. У випадку, коли виявлена залишкова напруга від'ємна ($\Delta U < 0$) – відбувається зменшення керованого опору R_3 на величину ΔR , обнулення лічильника i , та перехід до наступного циклу. У випадку, коли значення залишкової напруги ΔU недостатньо велике, щоб його вдалося зафіксувати на даному етапі вимірювання, відбувається його підсилення залишкової напруги ($\Delta U' = \Delta U * k$), і у випадку коли підсилена залишкова напруга додатна ($\Delta U' > 0$) – збільшення керованого опору R_3 на величину Δr , обнулення лічильника i , та перехід до наступного циклу; а у випадку коли підсилена залишкова напруга від'ємна ($\Delta U' < 0$) – відбувається зменшення керованого опору R_3 на величину Δr ,

обнулення лічильника i , та перехід до наступного циклу. У випадку коли значення підсиленої залишкової напруги $\Delta U'$ недостатньо велике, щоб його вдалося зафіксувати, відбувається збільшення лічильника i на 1 ($i:=i+1$) та його перевірка: якщо $i < 2$ — то відбувається перехід до наступного циклу, якщо ж лічильник $i=2$ – зупинка процесу вимірювання.

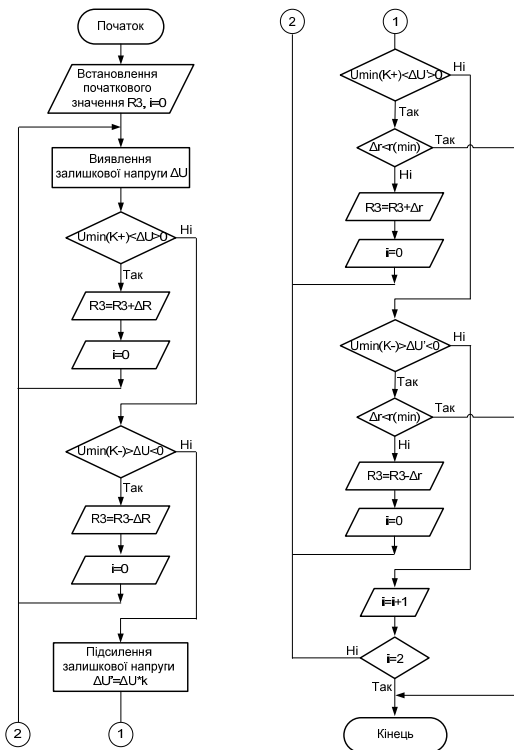


Рис. 2. Алгоритм реалізації методу

Після закінчення вимірювального процесу здійснюється розрахунок величини невідомого опору R_x та вивід результату.

Основна ідея методу полягає в автоматичному поетапному зрівноваженні мостової схеми на основі аналізу величини залишкової напруги в околі точки рівноваги електричного моста. Підсилення залишкової напруги в околі точки рівноваги електричного моста дає змогу фіксувати рівновагу електричного моста з більшою точністю, тим самим забезпечуючи покращання точності вимірювання малих величин електричного опору.

Розроблення моделі функціонування вимірювальної системи на основі кольорових мереж Петрі

Нижче на рис. 3 зображена модель функціонування вимірювальної

системи, побудована на основі кольорових Мереж Петрі.

Робота моделі розпочинається з встановлення початкових маркерів в ключових позиціях p1–p6. Позиція p1 відповідає за реалізацію умови, коли залишкова напруга ΔU — від’ємна ($U \min(K-) > \Delta U < 0$), а n1 — кількість випадків виконання цієї умови. Позиція p2 відповідає за виконання умови, коли залишкова напруга ΔU — додатня ($U \min(K+) < \Delta U > 0$), а n2 — кількість випадків виконання цієї умови. Позиція p3 відповідає за виконання умови, коли підсилена залишкова напруга $\Delta U'$ — від’ємна ($U \min(K-) > \Delta U' < 0$), а n3 — кількість випадків виконання даної умови. Позиція p4 відповідає за виконання умови, коли підсилена залишкова напруга $\Delta U'$ — додатня ($U \min(K+) < \Delta U' > 0$), а n4 — кількість випадків виконання цієї умови. Позиція p5 відповідає за виконання умови, коли величина дискретизації Δr керованого опору R3 більша (або рівна) мінімальної величини дискретизації $r(\min)$ при від’ємній підсиленій залишковій напрузі $\Delta U'$, а n5 — кількість випадків виконання даної умови. Позиція p6 відповідає за виконання умови, коли величина дискретизації Δr керованого опору R3 більша (або рівна) мінімальної величини дискретизації $r(\min)$ при додатній підсиленій залишковій напрузі $\Delta U'$, а n6 — кількість випадків виконання цієї умови.

Після встановлення усіх початкових маркерів у ключових позиціях відбувається запуск роботи моделі поміщенням маркера в позицію запуску p7. Спрацюванням переходу t1 відбувається встановлення початкових параметрів, величини керованого опору R3, та обнулення лічильника імпульсів i. Маркер переходить в позицію p8, яка завдяки зворотному зв’язку від переходу t2 забезпечує неперервну роботу моделі аж до досягнення маркером позиції кінця роботи p22. Активізацією переходу t2 відбувається запуск робочого циклу моделі і виявлення залишкової напруги ΔU .

Маркер переходить в позицію p10. Далі можливі три варіанти розвитку подій. При наявності маркера(-ів) в позиції p2 активізується перехід t5, маркер переходить в позицію p13, що відповідає за збільшення величини керованого опору на ΔR . Активізується перехід t7, відбувається збільшення величини керованого опору ($R3 = R3 + \Delta R$), маркер переходить в позиції p9 та p19 (причому з позиції p19 активізацією переходу t18 маркер може перейти в позицію p21 при відсутності маркера в позиції p18, або в позицію p20 активізацією переходу t17 при наявності маркера в позиції p18, таким чином обнулюючи лічильник імпульсів i), після чого відбувається наступний цикл роботи моделі. При наявності маркера(-ів) в позиції p1 активізується перехід t3, маркер переходить в позицію p11, що відповідає за зменшення величини керованого опору на ΔR . Активізується перехід t6, відбувається зменшення величини керованого опору ($R3 = R3 - \Delta R$), маркер переходить в позиції p9 та p19 (з позиції p19 — в позицію p21 або p20, відповідно), і

відбувається наступний цикл роботи моделі. При відсутності маркерів в позиціях p1 і p2 активізується перехід t4, маркер переходить в позицію p12, яка відповідає за підсилення залишкової напруги ΔU . Активізацією переходу t8 відбувається підсилення залишкової напруги: $\Delta U' = \Delta U * k$.

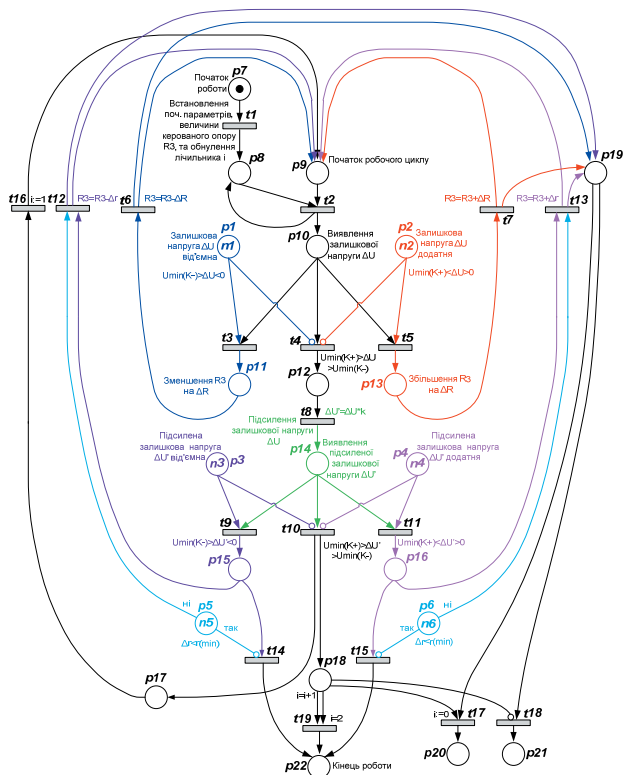


Рис. 3. Модель функціонування вимірювальної системи на основі кольорової мережі Петрі

Маркер переходить в позицію p14, що відповідає за виявлення підсиленої залишкової напруги $\Delta U'$. Далі можливі три варіанти розвитку подій.

При наявності маркера(-ів) в позиції p4 активізується перехід t11 і маркер переходить в позицію p16. Після цього в залежності від наявності (відсутності) маркера(-ів) в позиції p6 можливе спрацювання одного із переходів t13 (при наявності маркера(-ів) в позиції p6) або t15 (при відсутності маркера(-ів) в позиції p6). При активізації переходу t13 відбувається збільшення величини керованого опору на Δr ($R3 = R3 + \Delta r$), маркер переходить в позиції p9 та p19 (а з p19 — в p21 або p20, відповідно), і

відбувається наступний цикл роботи моделі. У випадку відсутності маркера(-ів) в позиції р6 активізується перехід t15, маркер переходить в позицію р22 — позицію завершення роботи моделі.

При наявності маркера(-ів) в позиції р3 активізується перехід t9 і маркер переходить в позицію р15. Після цього в залежності від наявності (відсутності) маркера(-ів) в позиції р5 можливе спрацювання одного із переходів t12 (при наявності маркера(-ів) в позиції р5) або t14 (при відсутності маркера(-ів) в позиції р5). При активізації переходу t12 відбувається зменшення величини керованого опору на Δr ($R3 = R3 - \Delta r$), маркер переходить в позиції р9 та р19 (а з р19 — в р21 або р20, відповідно), і відбувається наступний цикл роботи моделі. У випадку відсутності маркера(-ів) в позиції р5 активізується перехід t14, маркер переходить в позицію р22 — позицію завершення роботи моделі.

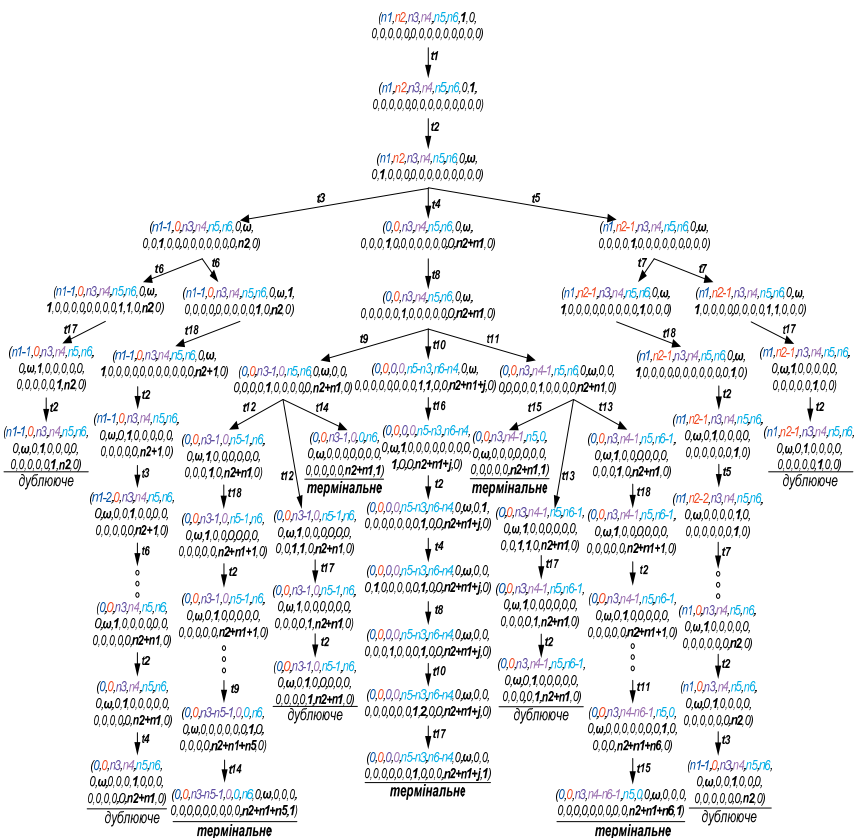


Рис. 4. Граф досяжності станів кольорової мережі Петрі моделі функціонування виміральної системи

При відсутності маркерів в позиціях p3 і p4 активізується перехід t10 і маркер переходить в позиції p17 та p18. У випадку, коли в позиції p18 вже був 1 маркер — спрацьовує перехід t19 і маркер переходить в позицію p22 — позицію завершення роботи моделі. У випадку, коли в позиції p18 не було жодного маркера, активізується перехід t16 маркером з позиції p17, лічильник імпульсів $i=1$, маркер переходить в позицію p9 і відбувається наступний цкл роботи моделі.

На рисунку (рис. 4) зображено граф досяжності станів для кольорової мережі Петрі моделі функціонування вимірювальної системи.

Висновки

Розроблено схемну модель, яка дає змогу вимірювати малі величини електричного опору з більшою точністю з допомогою додаткових функціональних елементів, а саме — компараторів додатньої та від'ємної напруги, блоку підсилення та спеціальної схеми управління, призначеної для синхронізації роботи моделі. Розроблено метод на основі алгоритму та моделі функціонування, який дає змогу підвищити точність вимірювання малих величин електричного опору за рахунок використання ефективного механізму автоматизації процесу вимірювання.

1. *Kruglick J. J. EFAB Technology and Applications / J. J. Kruglick, A. Cohen, C. Bang // MEMS: Design and Fabrication / [Mohamed Gad-el-Hak, ed.]. — 2nd ed.— Boca Raton: CRC Press, 2006.— 664 p.*
2. *Колпаков Ф. Ф. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций : [учеб. пособие] / Ф. Ф. Колпаков, Н. Г. Борзяк, В. И. Кортунов.— Харьков : НАУ ХАИ, 2006.— 82 с.*
3. *Minhang Bao Analysis and Design Principles of MEMS Devices, — 1st edition: Elsevier Science, 2005 — 328 p.*
4. *James J. Allen Micro Electro Mechanical System Design, — 1st edition: CRC Press, 2005 — 496 p.*
5. *Marc J. Madou Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, — 2nd edition: CRC Press, 2002 — 752 p.*
6. *Журавлёв Л.Г., Филатов В.И. Физические методы исследования металлов и сплавов: Учебное пособие для студентов металлургических специальностей. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. - 157 с.*
7. *Кузнецов В.А. Измерения в электронике. Справочник. — Москва: Энергоатомиздат, 1987. — 509с.*
8. *Поліщук Е.С. Електричні вимірювання електричних і неелектричних величин./Під ред. Е.С. Поліщука. — К.: Вища школа. —352с. 1978.*
9. *Городовский А.Ф. Мосты постоянного тока. — Москва: Энергия, 1964. — 87с.*
10. *Р.Ринкунас, С. Кускявичюс. Бесконтактный метод измерения сопротивления// Журнал технической физики. — 2009, том 79, вып. 1. — с.134-139.*
11. *Пукач А., Іванців Р., Теслюк В. Методи та схеми вимірювання значення невідомого опору електричного кола. Технічні вісті: Науково-публіцистичний часопис "Львівська політехніка". Львів: Видавництво НУ"Львівська політехніка". - 2010 - С. 160 - 163.*

Поступила 29.02.2012р.