

*Застосування вейвлет-перетворення для аналізу електромагнітних процесів в системах електропостачання / Вісник Приазовського ДТУ. "Енергетика" – Маріуполь, 2005. – Вип. 15. – Част.2. – С. 92–95. 7. Włodzimierz WAŃKO, Petro STOLARCZUK "Badania wahań powolnych napięcia sieci elektrycznej bazujące się na nowoczesnych metodach matematycznych opracowania sygnałów" // XL International symposium on electrical machines «SME 2004», Hajnywka, Poland, Conference Proceedings, 15-18 June 2004. – P. 234–236. 8. Наконечний А.Й. Теорія малохвильового перетворення та її застосування. – Л., 2001. 9. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М., 2005. 10. Białasiewicz J.T. Falki i aproksymacje. – Warszawa, 2004.*

УДК 621.317.73

**М.О. Гаврилюк, В.В. Хома\***

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра автоматики та телемеханіки,

\*Політехніка Опольська, інститут автоматики і інформатики

## **АКТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ "ІМІТАНС–НАПРУГА", ІНВАРІАНТНІ ДО ВПЛИВУ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПІД'ЄДНУВАЛЬНИХ ПРОВОДІВ**

© Гаврилюк М.О., Хома В.В., 2006

**Розглядається використання операційних підсилювачів для зменшення впливу паразитних параметрів комутаційних елементів та під'єднувальних проводів у перетворювачах "імітанс–напруга". Описано два варіанти побудови перетворювачів імітансу багатополюсних об'єктів – із п'яти- та шестизатискною схемою підключення. Наведено також схему перетворювача імітансу для автоматичних багатодіапазонних приладів.**

**The employment of operational amplifiers for decrease parasitic impedance of switching units and connector cable in immitance to voltage converters are considered. Two versions of multipoint object immitance converters design are description. The immitance converter circuit for an automatic multirange devices is also presentation.**

**1. Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і мета статті.** В останні десятиліття в електровимірювальній техніці сформувався новий напрямок – прикладне вимірювання імітансу. В цих застосуваннях різні фізичні величини, часто неелектричної природи, досліджують за допомогою непрямих сукупних вимірювань, що ставить низку додаткових вимог до засобів вимірювання імітансу.

Об'єкти, імітанс яких підлягає вимірюванню, підключаються до приладу за допомогою з'єднувальних екранованих проводів вхідного кабелю, а в автоматичних багатодіапазонних приладах чи вимірювачах багатополюсних об'єктів додатково використовують ще й комутаційні пристрої. Паразитні параметри згаданих елементів такі, як опір проводів та ємність "екран–провід" вхідного кабелю, залишкові опори контактів замкненого електронного ключа чи скінченне їхнє значення у розімкненому стані, негативно позначаються на метрологічних властивостях вимірювальних перетворювачів імітансу у напругу. Застосування операційних підсилювачів (ОП) у поєднанні із багатопровідними багатозатискними схемами підключення контрольованого об'єкта до вимірювального приладу дає змогу зменшити вплив згаданих паразитних факторів на результати вимірювання [1, 2]. Застосування операційних підсилювачів у перетворювачах "імітанс–напруга" має ще один позитивний аспект – забезпечує вищу чутливість та дає змогу створити на об'єкті контролю (ОК) режим заданого струму при вимірюванні імпедансу чи режим заданої напруги при вимірюванні адмітансу.

На рис. 1, а наведено схему активного перетворювача “імітанс–напруга” (АПН) при дистанційному підключенні багатополосного об’єкта, а на рис. 1, б – еквівалентну схему для оцінки впливу паразитних параметрів.

Вимірювання імітансу потребує підключення двох полюсів об’єкта контролю до входу приладу, тому при дослідженні багатополосних об’єктів вибір певної пари полюсів здійснюється багатоконтактними аналоговими комутаторами. Під час вимірювання через досліджуваний об’єкт та під’єднувальні проводи протікає струм, за яким контролюють імітанс. Аби усунути вплив опору під’єднувальних проводів та замкнених контактів комутаторів на результати вимірювання імітансу низькоомних об’єктів, контакт із кожним полюсом забезпечується двома проводами – струмовим  $I$  та потенціальним  $U$  (рис.1, а). Якщо струмовий провід підключається до джерела тестової напруги, то його називають струмовим проводом  $Ih$  високого рівня, а якщо до інвертувального входу операційного підсилювача ОП, – то струмовим проводом  $II$  низького рівня.

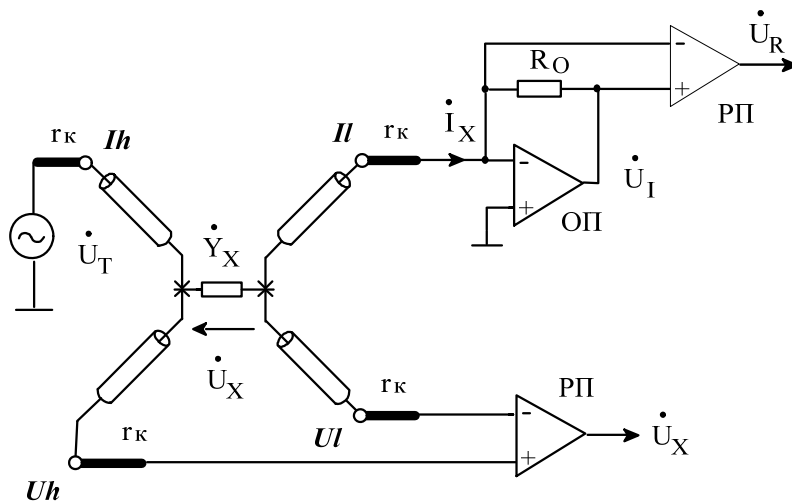
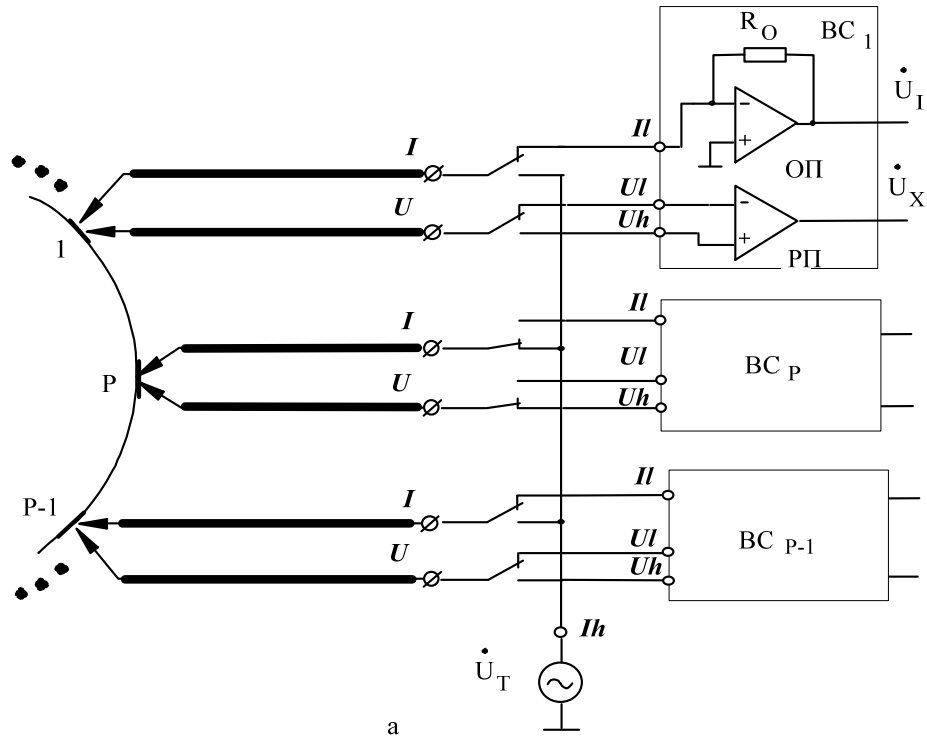


Рис. 1. Схема дистанційного підключення багатополюсних об'єктів (а)  
та еквівалентна схема для оцінки впливу паразитних параметрів (б)

Спад напруги  $\dot{U}_X$  на досліджуваному об'єкті контролюють окремими потенціальними про-  
водами високого  $Uh$  та низького  $Ul$  рівнів, що підключені відповідно до неінвертувального та  
інвертувального входів різницевого підсилювача (РП). При великому вхідному опорі РП його вихідна  
напруга відповідає різниці потенціалів полюсів  $h$  і  $l$  контрольованого об'єкта. Окрім спаду напруги,  
для визначення імітансу ОК потрібно вимірювати також струм  $\dot{I}_X$ , що протікає через нього. Взявши  
відношення  $\dot{Z}_X = \dot{U}_X / \dot{I}_X$ , визначають імітанс за послідовною ~~зразковою~~  $\dot{Z}_X = \text{Re}(\dot{Z}_X) + j\text{Im}(\dot{Z}_X)$  чи за  
паралельною  $\dot{Y}_X = \dot{I}_X / \dot{U}_X = \text{Re}(\dot{Y}_X) + j\text{Im}(\dot{Y}_X)$  схемами заміщення.

У першому наближенні струм  $\dot{I}_X$  можна контролювати за вихідною напругою  $\dot{U}_I$  операційного  
підсилювача. Проте, щоб виключити похибку статизму активного перетворювача “струм–напруга”,  
використовують ще один різницевий підсилювач, як показано на рис.1, б. Отже, напруга  $\dot{U}_R$  при  
відомому значенні опору зразкового резистора  $R_0$  однозначно відповідає струмові  $\dot{I}_X = \dot{U}_R / R_0$ .

Недоліком наведеної вимірювальної схеми є перетворення контрольованого імітансу у  
відношення комплексних напруг, а не просто у напругу. Використання таких активних перетво-  
рювачів “імітанс–напруга” можливе лише у двоканальних логотричних структурах вимірювачів  
імітансу прямої дії, а у автокомпенсаційних пристроях накладає значні обмеження на вибір  
зворотного перетворювача [1–3].

Тому метою статті є опис нових способів побудови активних перетворювачів, що забезпечують  
перетворення параметрів імітансу в пропорційну комплексну напругу та є інваріантними до впливу  
паразитних параметрів комутаційних елементів та під'єднувальних проводів.

**2. Активний перетворювач “імітанс–напруга” з чотирипровідною п'ятизатискною схемою  
підключення.** Щоб забезпечити безпосереднє перетворення параметрів імітансу у напругу, а не у  
відношення напруг, авторами запропонована схема АПН, що зображена на рис.2, а, завдяки  
властивостям операційного підсилювача [4, 5], нехтовно мале значення опору  $r_n$  потенціального  
проводу  $Uh$  та замкненого контакту комутатора  $r_k$  на тлі диференціального вхідного опору  $Z_d$   
операційного підсилювача ОП<sub>1</sub> ( $Z_d \gg r_n + r_k$ ) дає змогу точно підтримувати потенціал полюса  $h$   
контрольованого об'єкта, таким, що дорівнює  $\dot{U}_T$ , незважаючи на спад напруги на струмовому  
проводі  $Il$

$$\dot{U}_h = \dot{U}_T [1 + (r_n + r_k) / Z_d] \approx \dot{U}_T$$

З іншого боку, ОП<sub>2</sub> через провід  $Ul$  у першому наближенні забезпечує еквіпотенціальність його  
інвертувального входу і полюсу  $l$  ОК. Вплив проводу  $Il$  та похибки статизму одночасно зменшуються  
завдяки використанню різницевого підсилювача. Отже, за спадом напруги на зразковому резисторі  
можна безпосередньо контролювати значення провідності досліджуваного об'єкта.

У АПН (рис.2, а) контрольований об'єкт підключений за п'ятизатискною схемою, що окрім  
затискачів  $Il, II, Uh, Ul$ , передбачає п'ятий затискач  $E$ , до якого під'єднують екрани всіх чотирьох  
проводів. Заземлення екранів усуває паразитний вплив міжпровідної ємності пар кабелів високого  $h$   
та низького  $l$  потенціалів. Проте у п'ятизатискній схемі з'являється інший паразитний фактор –  
ємність  $C_k$  “провід–екран” вхідного кабелю (див. рис.2, б).

Зазначимо, що застосування операційних підсилювачів істотно послаблює дестабілізуючий вплив  $C_K$ , оскільки ємності кабелів на затискачах  $Ih$  і  $Uh$  є просто додатковим навантаженням джерела тестового сигналу, а ємності кабелів на затискачах  $II$  та  $UI$  увімкнуті між двома екіпотенціальними входами ОП<sub>2</sub>. Із урахуванням зазначеного рівняння перетворення цієї схеми АПН набуває вигляду

$$\dot{U}_X \approx - \frac{\dot{U}_T R_O}{1 + (\dot{Y}_X R_O + \omega_0 C_K R_O) / \dot{A}} \dot{Y}_X,$$

де  $\omega_0$  – частота тестового сигналу.

Отже, з точністю до  $1/\dot{A}$  (де  $\dot{A}$  – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача без зворотного зв'язку) схема АПН забезпечує інваріантність результатів вимірювання до паразитних параметрів вхідного кабелю та комутувальних елементів.

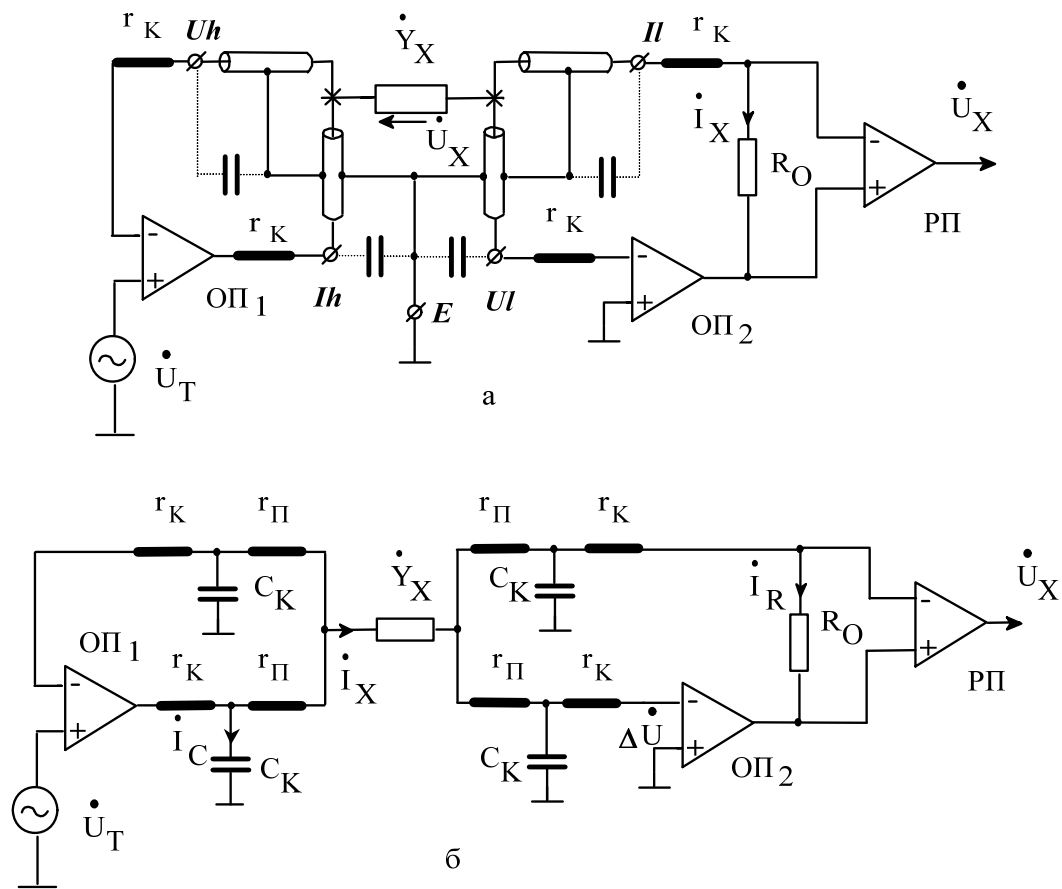


Рис. 2. Чотирипровідна п'ятизатискна схема підключення ОК (а) і еквівалентна схема для оцінки дестабілізуючого впливу ємності "провід-екран" (б)

Шунтування диференціального опору операційного підсилювача ємністю  $C_K$  негативно позначається на динамічних властивостях АПН із п'ятизатискною схемою підключення ОК, зорема, зменшує запас стійкості [6, 7]. Щоб запобігти цьому, використовують шестизатискну схему підключення об'єкта.

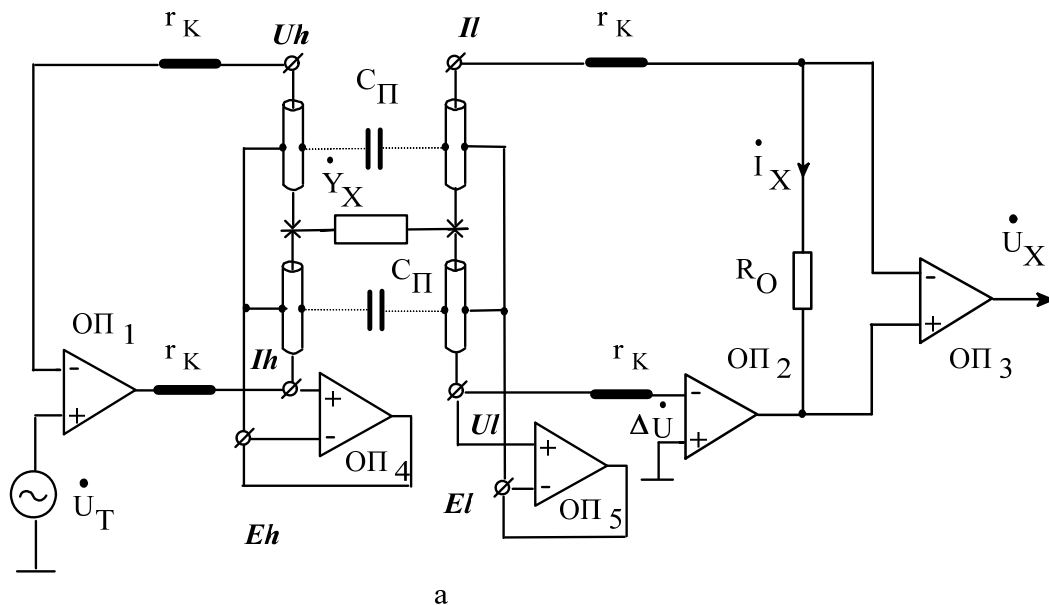
**3. Активний перетворювач “імітанс–напруга” з чотирипровідною шестизатискною схемою підключення.** Особливістю АПН із чотирипровідною шестизатискною схемою підключення об’єкта контролю (рис.3, а) є використання окремих затискачів *Eh* і *El* для екранів проводів відповідно високого та низького рівнів. Повторювачі напруги на ОП<sub>4</sub> і ОП<sub>5</sub> підтримують еквіпотенціальність проводів та екранів, що не дає проявитися ємності “провід–екран”. Однак платою за це є паразитна міжпровідна ємність  $C_{\Pi}$  (рис.3, б), яка впливає на результат вимірювання

$$\dot{U}_X = -\frac{\dot{U}_T R_o}{1 + (\dot{Y}_X R_o) / \dot{A}} (\dot{Y}_X + \omega_0 C_{\Pi})$$

Аддитивний характер похибки, зумовленої паразитною ємністю  $C_{\Pi}$ , дає змогу просто її усунути за допомогою корекції нуля вимірювального каналу на вибраному піддіпазоні вимірювання. Після корекції нуля на результат вимірювання має вплив лише похибка статизму, відносно значення якої можна оцінити виразом

$$\delta = \frac{(\dot{Y}_X R_o) / \dot{A}}{1 + (\dot{Y}_X R_o) / \dot{A}} = \frac{\dot{Y}_X R_o \left( \frac{1}{A_0} + j \frac{f}{f_T} \right)}{1 + \dot{Y}_X R_o \left( \frac{1}{A_0} + j \frac{f}{f_T} \right)},$$

де  $A_0$  – коефіцієнт підсилення ОП без зворотного зв’язку на постійному струмі;  $f_T$  – частота одиничного підсилення ОП.



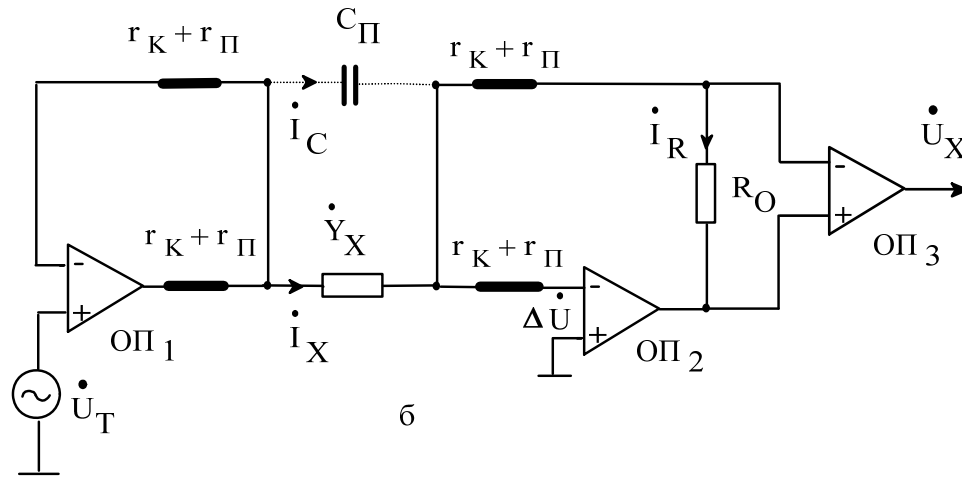


Рис. 3. Чотирипровідна шестизатискна схема підключення ОК (а)  
та еквівалентна схема для оцінки впливу паразитної ємності кабелю (б)

#### 4. Активні перетворювачі “імітанс–напруга” для багатодіапазонних вимірювачів імітансу.

Існує ще один важливий аспект зменшення впливу паразитних параметрів комутаційних елементів. При роботі засобів вимірювання імітансу в складі комп’ютеризованих систем контролю необхідно автоматизувати операції вибору характеру схеми заміщення комплексного об’єкта, піддіапазонів вимірювання, допоміжні операції корекції нуля і калібрування вимірювального каналу за зразковими елементами [4]. Розглянемо зміст згаданих вимірювальних операцій на прикладі універсальної схеми АПН із оберненою функцією перетворення (рис. 4).

На наведеній схемі набір ключів  $S_1 \dots S_n$  слугує для перемикання границь вимірювання, перемикачі  $SP_1$  і  $SP_2$  змінюють конфігурацію вимірювальної схеми залежно від необхідного представлення результатів контрольованого імітансу, а за участю ключів  $S_0$  і  $S_K$  здійснюють відповідно компенсацію дрейфу нуля та калібрування вимірювального каналу [5]. Якщо як комутувальні елементи застосовують швидкодіючі безконтактні ключі, то внаслідок доволі великих значень опору замкнених контактів таких ключів (близько 100 Ом) виникають недопустимі похибки, особливо при контролі низькоомних об’єктів. Із урахуванням такого впливу вихідна напруга перетворювача визначається за формулою:

– при представленні імітансу як комплексного опору  $\dot{Z}_x$

$$\dot{U}_x = -\dot{U}_o \frac{\dot{Z}_x + r}{R_o + 2r} = -\dot{U}_o \frac{\dot{Z}_x}{R_o} (1 + \delta_z);$$

– при представленні імітансу як комплексної провідності  $\dot{Y}_x$

$$\dot{U}_x = -\dot{U}_o \frac{(R_o + 2r)}{(1/\dot{Y}_x + r)} = -\dot{U}_o R_o \dot{Y}_x (1 + \delta_y)$$

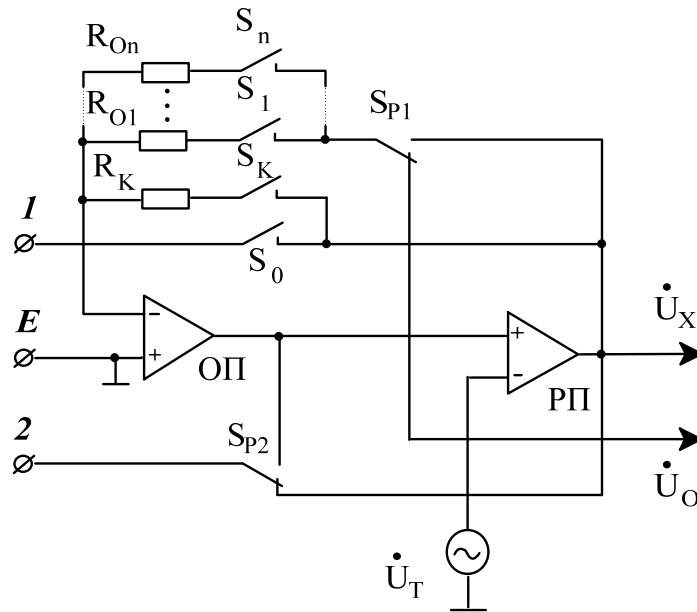


Рис. 4. Активний перетворювач імпедансу в напругу для систем автоматичного контролю

Як впливає із наведених виразів, похибка вимірювання залежить від співвідношення опорів замкнених контактів  $r$ , зразкового резистора  $R_0$  та вимірюваного імпедансу. Це накладає обмеження на розширення границь вимірювання і робить неможливими операції самоконтролю вимірювального каналу.

На рис.5 наведена схема перетворювача, у якій вищевказані недоліки подолано [4, 6]. Для цього вводять спарені ключі (керуються одним сигналом одночасно), які забезпечують чотиризаписне підключення зразкових опорів і вимірюваного об'єкта, що дає змогу уникнути впливу опорів ключів на результат вимірювання в режимі самоконтролю. У такому разі опір одного із контактів ключів додається до вихідного опорів операційних підсилювачів ОП<sub>1</sub> і ОП<sub>2</sub>, а вплив опорів іншого контакту тих самих ключів істотно зменшується завдяки великому вхідному опорів ОП<sub>2</sub> та вузлів подальшого перетворення напруг  $\dot{U}_X, \dot{U}_O$ .

При достатньо високому коефіцієнті підсилення різницевого підсилювача забезпечується рівність напруг

$$\dot{U}_T \approx \dot{U}_O$$

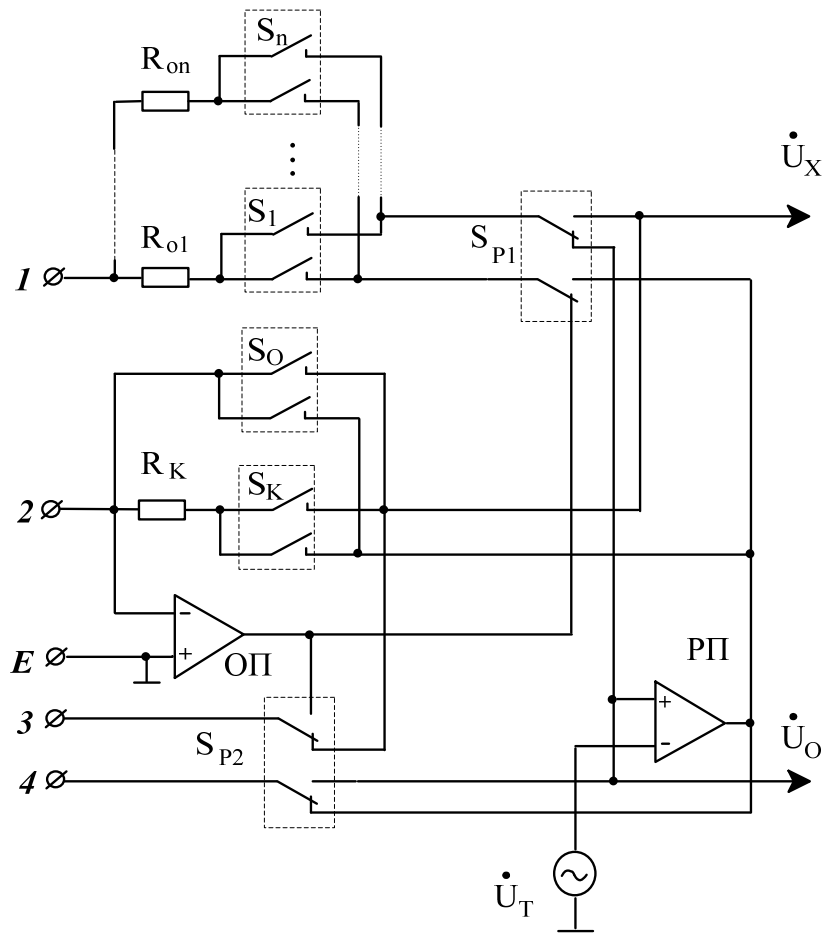


Рис. 5. Схема увімкнення комутаційних пристроїв, що забезпечує інваріантність до залишкових опорів

**5. Висновки.** Застосування операційних підсилювачів у перетворювачах “імітанс – напруга” має такі позитивні аспекти:

- 1 дає змогу створити на об’єкті контролю режим заданого струму (при вимірюванні імпедансу) чи режим заданої напруги (при вимірюванні адмітансу), що спрощує реалізацію вимірювального тракту із оброблення вихідної напруги перетворювача;
- 2 забезпечується вища чутливість перетворювача і збільшується відношення “сигнал/шум”;
- 3 зменшується дестабілізуючий вплив на результати вимірювання паразитних параметрів під’єднувальних проводів та комутаційних елементів.

На відміну від відомих, використання запропонованих схем активних перетворювачів можливе в одноканальній структурі вимірювача імітансу прямої дії, тобто не вимагає структурної чи часової надлишковості. Проте у чотирипровідній п’ятизатискній схемі (рис. 2) паразитна ємність “провід–екран” під’єднувального кабелю зумовлює появу додаткових полюсів на амплітудно-частотній характеристиці перетворювача, що негативно позначається на запасі стійкості. Тому використання цієї схеми накладає обмеження на довжину під’єднувального кабелю та діапазон вимірювань [6, 7].

Перетворювач “імітанс–напруга” із чотирипровідною шестизатискною схемою підключення об’єкта (рис. 3) володіє необхідним запасом стійкості завдяки створенню режиму однакових потенціалів на проводі та екрані під’єднувальних кабелів. Однак виникає потреба у корекції нуля, яку треба здійснювати на кожному піддіапазоні вимірювання. Така корекція, а також калібрування каналу, вимагає використання додаткових комутаційних пристроїв. Наведена на рис. 5 схема



перетворювача імітансу в напругу дає змогу автоматизувати вибір режиму і піддіапазонів вимірювання, корекції нуля та калібрування завдяки використанню кодокерованих напівпровідникових ключів. Конфігурація схеми і спосіб розміщення ключів в операційній схемі забезпечують зменшення дестабілізуючого впливу їхніх паразитних параметрів на результати перетворення імітансу в напругу.

1. Гаврилюк М.А., Соголовский Е.П. *Электронные измерители CLR*. – Львов, 1978.
2. Лихтциндер Б.Я. *Автоматизация поэлементного контроля многополюсных электрических цепей // Измерения, контроль, автоматизация*. – 1983. – №3. – С. 14–24.
3. Гаврилюк М.А., Соголовский Е.П., Походьло Е.В., Хома В.В. *Электронный цифровой измеритель CLR типа Е7-13 // Приборы и системы управления*. – 1990. – №8. – С. 18–20.
4. Гаврилюк М.О., Хома В.В. *Про спосіб структурної компенсації похибок вимірювання імітансу // Вісник ДУ “Львівська політехніка”*. 1998. – №348. – С.24–30.
5. Гаврилюк М.О., Походьло Е.В., Хома В.В. *Перетворювач імітансу для систем автоматичного контролю // Вимірювальна техніка та метрологія*. – 1995. – Вип. 51. – С. 96–97.
6. Гаврилюк М.О., Хома В.В. *Вплив ємності вхідного кабелю на стійкість активного перетворювача імітанс–напруга // Вимірювальна техніка та метрологія*. – 1995. – Вип. 51. – С. 49–50.
7. Хома В.В. *Оптимізація динамічних властивостей активних вимірювальних перетворювачів ємності в напругу // Методи та прилади контролю якості*. – 1999. – №4. – С. 72–75.

УДК 536.532

В.І. Лозбін<sup>1</sup>, В.О. Яцук<sup>2</sup>, В.П. Столярчук<sup>2</sup>, Т. Зиска<sup>1</sup>

1) <sup>1</sup>Любельська політехніка, Люблін, вул. Надбистричка, 38А, Польща,

<sup>2</sup>Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

## РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПІДСТАВ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТУВАННЯ ТЕРМОПАР ЗА ДОПОМОГОЮ НАГРІВУ СТРУМОМ

© Лозбін В.І., Яцук В.О., Столярчук В.П., Зиска Т., 2006

**Проаналізовано теплові стани термопар при пропусканні струмів. За допомогою математичного моделювання отримано співвідношення для обчислення чутливості термопар. Встановлено головні впливні ефекти та метод їхнього експериментального визначення. Запропонована схема експерименту та співвідношення для опрацювання його результатів.**

**The thermocouple thermal conditions under external direct current flowing are established in this paper. The thermocouple sensitivity correlation founded by mathematical modelling mode is proposed too. The main influence benefits on thermocouple are founded in this paper also. The experimental scheme and experimental results processing correlation are proposed.**

**1. Вступ.** Не втратила актуальності проблема діагностування характеристик засобів вимірювання температури – термометрів опору [1] та термопар (ТП) [2, 3] – в процесі їхньої експлуатації. Це зумовлено важливістю достовірної інформації про фізичну величину, деколи особливістю технологічних процесів, що не дають змогу припинити їхній перебіг, а також суто економічними міркуваннями.

**2. Аналіз останніх публікацій.** В багатьох публікаціях [3–6], зокрема і авторів цієї статті [4–6], були зроблені спроби розв’язати цю задачу для термопар. Запропоновано різноманітні методи