

радіовимірювальному тракту нелінійний пристрій дає значно кращі результати. Виграш у точності складає приблизно у 25-30 разів, особливо в усталеному режимі роботи, а апостеріорна імовірність аномальних похибок $p[\theta(k)=\sigma/Y_1^k]$, яка керує матричним коефіцієнтом передачі фільтра змінюється у часі так, як показано на рис. 11. При відсутності аномалій $p[\theta(k)=\sigma/Y_1^k]=0$ обидва фільтри мають однаковий механізм фільтрації і характеристики точності наближаються до теоретичної кривої.

Перспективи подальших досліджень. Аналіз отриманих результатів показує, що підвищення стійкості розроблених методів фільтрації до аномальних похибок кутових вимірювань потребує надмірності програмних засобів у вигляді додаткових обчислень у реальному часі порівняно з алгоритмом фільтра Калмана. Це призводить до надмірного завантаження обчислювальних засобів і при обмеженому часі обробки кутових даних може бути неприпустимим. Той факт, що за наявності аномальних похибок індикаторна змінна $\theta(k+1)$ приймає значення $\sigma \gg 1$ можна ефективно використати для побудови квазіоптимальних методів дискретної фільтрації також з підвищеною, але меншою порівняно з розглянутою, стійкістю до порушень працездатності кутомірного радіоканалу. Деякі з них будуть розглядатись у наступних публікаціях.

Література

1. O'keeffe H. B. The development of interscan – a new microwave approach and landing guarantee system for International Civil Aviation / H. B. O'keeffe, W. G. Feige // Proc. of IREE. – 1975. – Vol. 36. – P. 145–148.
2. Sanders L. Instrument Landing System / L. Sanders, V. Fritch, Jr. John // IEEE Trans. on Com. – 1973. – Vol. 21. – № 5. – P. 435–454.
3. Сосновский А. А. Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович. – М.: Машиностроение, 1987. – 256с.
4. Спецификация формата сигнала для системы сканирующего луча с отсчетом времени. Signal format specification for the time reference scanning beam / [Материалы FAA]. – 1975. – P. 233–261.
5. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. / М. С. Ярлыков. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.
6. Сантиметровые системы посадки самолетов / [В. М. Бенин, Е. И. Шолупов, В. А. Кожевников, И. А. Хаймович]. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
7. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс.; пер. с англ.; под ред. Б. Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
8. Зингер Р. А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Р. А. Зингер // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. – № 8. – С. 5 – 28.
9. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям. / Д. Бартон, Г. Бард.; пер. с англ.; под ред. М. М. Байсбейна. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.

Надійшла 14.4.2011 р.

УДК 621.317.73

О.М. ШИНКАРУК, В.Д. КОСЕНКОВ, В.В. МАРТИНЮК

Хмельницький національний університет

СИНТЕЗ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА НА ЗМІННОМУ СТРУМІ

Проведено аналіз еквівалентних схем заміщення суперконденсаторів на змінному струмі та розглянуто їх переваги і недоліки. Виконано синтез еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора на змінному струмі з урахування явища релаксації напруги СК після його заряду або розряду великим струмом.

The analysis of equivalent charts of substituting for supercondensers is conducted on an alternating current and their advantages and failings are considered. The synthesis of equivalent chart of substituting for a supercapacitor is executed on an alternating current from the account of the phenomenon of relaksacii of tension of SK after his charge or digit by a large current.

Ключові слова: суперконденсатор, схема заміщення.

Вступ

Проведені дослідження показують, що властивості, електричні параметри та характеристики суперконденсаторів (СК) суттєво відрізняються від традиційних конденсаторів [1]. Характерною особливістю (СК) є частотна дисперсія їх еквівалентної ємності та активного внутрішнього опору, яка пояснюється пористою структурою активованого вуглецевого матеріалу електродів (СК).

Іншою особливістю (СК) є абсорбція електричного заряду [2, 3], яка спостерігається через відновлення напруги на їх виводах після швидкого заряду або розряду (СК) великими струмами протягом

короткого проміжку часу. Для моделювання вказаних особливостей (СК) необхідно виконати синтез еквівалентної схеми заміщення (СК) на змінному струмі. Виходячи з цього, задача синтезу еквівалентної схеми заміщення (СК) на змінному струмі є дійсно актуальною, а її вирішення дозволить здійснювати комп'ютерне моделювання пристроїв електротехніки та електроніки із використанням (СК) з більш високою точністю та достовірністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В літературних джерелах, які стосуються розробці, вимірюванню електричних параметрів та експлуатації (СК) приведено багато різних еквівалентних схем заміщення (СК). В більшості літературних джерел відмічається, що характерною особливістю, яка відрізняє (СК) від традиційних конденсаторів, є частотна дисперсія еквівалентної ємності та активного внутрішнього опору (СК). Для моделювання частотної дисперсії еквівалентної ємності та активного внутрішнього опору (СК) більшість відомих еквівалентних схем заміщення базуються на аналітичній моделі частотно-залежного розподіленого елемента.

Вперше аналітичну модель частотно-залежного розподіленого елемента у вигляді лінії передачі із розподіленими параметрами запропонував в 1899р. Е. Варбург [4]. Імпеданс Варбурга є математичною моделлю комплексного опору процесу дифузії розчину електроліту і описується виразом:

$$Z_w = (R_{D0} / l_e)(2\omega / D)^{-1/2}(1 - j), \tag{1}$$

де R_{D0} – дифузійний опір; l_e – товщина зони дифузії; D – коефіцієнт дифузії.

Еквівалентна схема заміщення імпедансу Варбурга має вигляд нескінченної RC лінії передачі із розподіленими параметрами, яка характеризується питомим опором і ємністю відповідно r та c рис. 1 [4]. Характерною особливістю імпедансу Варбурга є нахил діаграми комплексного опору відносно осі активного опору Z'' на кут, рівний $\varphi = 45^\circ$. Такий кут нахилу діаграми комплексного опору є характерним для процесу дифузії, але для (СК) кут нахилу діаграми комплексного опору може мати різні значення. Тому використання імпедансу Варбурга в якості еквівалентної схеми заміщення (СК) призводить до значних похибок.

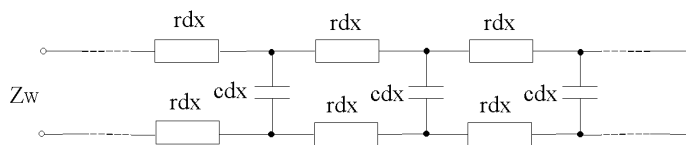


Рис. 1. Еквівалентна схема заміщення імпедансу Варбурга

Наступним кроком у розробці еквівалентної схеми заміщення (СК) було створення Р. де Лев'є у 1965 р. еквівалентної схеми заміщення пористого електрода (рис. 2), пори якого мають вигляд V – подібних жолобків [5].

Діаграма комплексного опору пористого електрода із V – подібними порами може мати кут нахилу від $\pi/2$ до $\pi/4$ і описується виразом (2).

$$Z = (\rho / tg\beta) J_0(\lambda) / \lambda J_1(\lambda), \tag{2}$$

де ρ – питомий опір електроліту; β – кут між сторонами пористого електрода; $J_0(\lambda)$, $J_1(\lambda)$ – функції Беселя 1-го та 2-го порядку; $\lambda = 2\sqrt{\rho l j \omega C / \sin \beta}$; l – довжина електрода; ω – кутова частота; C – питома ємність електрода.

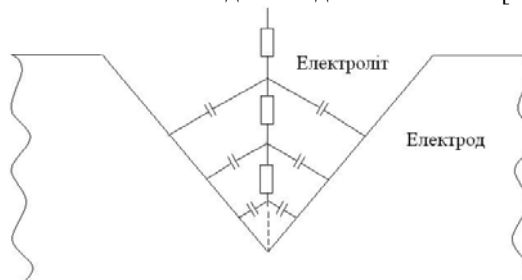


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення пористого електрода із V – подібними порами

Недоліки еквівалентної схеми заміщення Р. де Лев'є полягають у її недостатній точності та використанні геометричних параметрів пористого електрода, а саме його довжини l і кута між сторонами пор β . З точки зору користувачів (СК) використання електрохімічних та геометричних параметрів електродів є недоцільним, тому що ці параметри не характеризують їх застосування у різних схемах пристроїв електротехніки та електроніки.

Спроба переходу від електрохімічних та геометричних параметрів електродів до топології еквівалентної схеми заміщення (СК) зроблена Масаюкі Ітагакі та ін. у [6]. У цій роботі було проведено аналіз комплексного опору частини пористого електрода повторюваної структури із циліндричними макро-, мезо- та мікропорами (рис. 3, а) та наведено його еквівалентну схему заміщення (рис. 3, б).

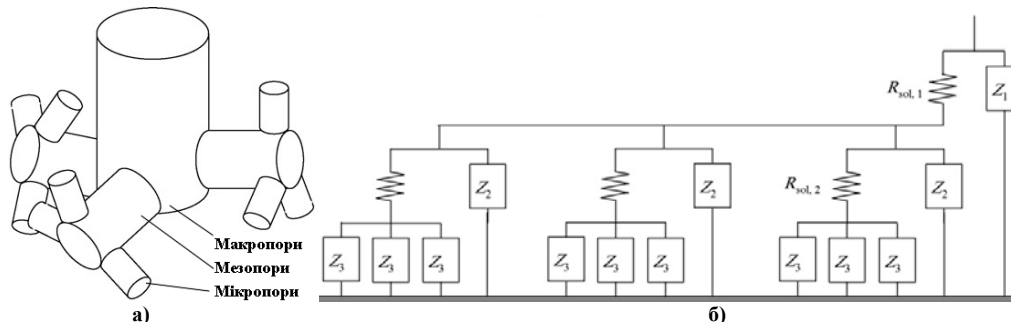


Рис. 3. Частина пористого електрода повторюваної структури із циліндричними порами (а) та його еквівалентна схема заміщення (в)

На основі проведеного аналізу частини пористого електроду та його еквівалентної схеми заміщення зроблено висновок, що макропорам відповідає комплексний опір Z_1 , мезопорам відповідає комплексний опір Z_2 , а мікропорам – комплексний опір Z_3 .

Враховуючи відповідну кількість гілок мезо- та мікропорів усього пористого електроду повторюваної структури із циліндричними порами в роботі [6] наведено вираз загального комплексного опору Z_{total} (СК):

$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{R_{sol1} + 1/(b_1((1/Z_2) + (1/(R_{sol2} + b_2 Z_3))))}, \quad (3)$$

де Z_1 , Z_2 та Z_3 – комплексні опори макро-, мезо- та мікропорів; R_{sol1} та R_{sol2} – активні внутрішні опори електроліту в мезо- та мікропорах; b_1 та b_2 – відповідна кількість гілок мезо- та мікропорів.

Наступний підхід до розробки еквівалентної схеми заміщення (СК) базується на принциповій конструктивній відмінності (СК) від традиційних конденсаторів, яка полягає у відсутності діелектрика між електродами (СК). Електрична ємність (СК) забезпечується подвійним електричним шаром (ПЕШ), який виникає на межі поділу електрод/електроліт і був відкритий Г. фон Гельмгольцем на металевих електродах у 1853р [7].

Конструктивно (СК) складається із двох пористих електродів, сепаратора та електроліту, який заповнює внутрішній об'єм конструктивного простору (СК). В першому наближенні конструкція (СК) подібна до конструкції кондуктометричної комірки, яка призначена для вимірювання опору електроліту [8].

Подібно до (СК), кондуктометрична комірка складається з двох електродів та електроліту, який заповнює її внутрішній об'єм. Відомо, що еквівалентною схемою заміщення кондуктометричної комірки є схема Ершлера-Рендлса, яка зображена на рис. 4 [8] і складається із ємності ПЕШ електродів $C_{ПЕШ}$, опору електроліту R_X , власної (геометричної) міжелектродної ємності комірки C_F , ємності провідників $C_{ПР}$, та активного опору і ємності переносу заряду відповідно R_S і C_S , що відповідають редокс-реакції. У цій схемі комплексний опір електродів кондуктометричної комірки позначено через Z_e .

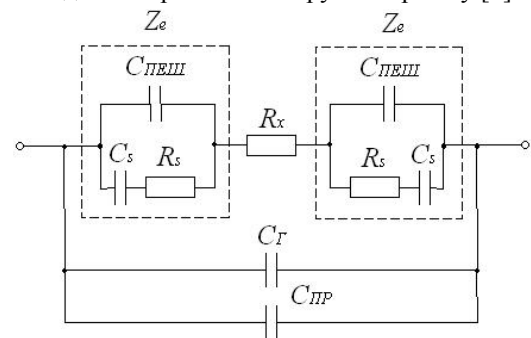


Рис. 4. Еквівалентна схема заміщення Ершлера-Рендлса

Усі розглянуті еквівалентні схеми заміщення певною мірою відображають частотну дисперсію еквівалентної ємності та активного внутрішнього опору (СК), тому що з точки зору теорії лінійних електричних кіл моделлю (СК) виступає пасивний багатоелементний RC двополюсник (ПБД), якому відповідає велика кількість еквівалентних схем заміщення із різною топологією. Для систематизації відомих еквівалентних схем заміщення (СК) розглянемо загальний підхід до синтезу їх еквівалентної схеми заміщення на змінному струмі.

Методика синтезу еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора на змінному струмі

Задача синтезу електричних кіл за заданими частотними або часовими характеристиками є однією із найважливіших задач теорії кіл. Процес синтезу електричних кіл складається з двох етапів. На першому етапі синтезу розв'язується задача апроксимації заданої частотної або часової характеристики математичною функцією, яка задовольняє умовам фізичної реалізації електричного кола. На другому етапі синтезу розв'язується задача реалізації, яка полягає у знаходженні топології електричного кола та визначенні параметрів елементів з яких складається коло.

Вихідними даними синтезу еквівалентної схеми заміщення (СК) на змінному струмі є його частотна характеристика, яка отримана в результаті вимірювання комплексного опору (СК) і задана у вигляді таблиці значень активної та реактивної складових його комплексного опору та відповідних їм частот вимірювання.

З теорії синтезу лінійних електричних кіл [7] відомо, що операторні вхідні функції двополюсника $Z(p)$ або $Y(p)$ мають вигляд відношення двох поліномів (4) із цілими степенями p та дійсними коефіцієнтами чисельника $M(p)$ і знаменника $N(p)$.

$$Z(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0} = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{1}{Y(p)}, \quad (4)$$

де a_i та b_i – дійсні коефіцієнтами чисельника та знаменника відповідно; n та m – степені поліномів чисельника та знаменника відповідно.

Процес синтезу еквівалентної схеми заміщення СК на змінному струмі виконується шляхом апроксимації його частотної характеристики функцією комплексного опору двополюсника $Z(p)$ (4). Встановлено, що використання поліномів функції комплексного опору двополюсника $Z(p)$ із порядками $n=m > 4$ не приводить до значного зменшення похибки апроксимації.

Після знаходження коефіцієнтів a_i і b_i комплексного опору двополюсника $Z(p)$ визначається

топологія еквівалентної схеми заміщення СК та знаходяться її параметри елементів.

На теперішній час розроблена велика кількість методів синтезу пасивних електричних кіл, але найбільшого поширення набули два основних методи: метод розкладання вхідної функції на суму найпростіших складових (метод послідовного виділення полюсів та постійної складової) та метод представлення вхідної функції у вигляді неперервного дробу.

Суть методу послідовного виділення полюсів та постійної складової полягає в розкладанні функції комплексного опору двополюсника $Z(p)$ на прості дробові складові (5), які відповідають простим ланкам еквівалентної схеми заміщення СК.

$$Z(p) = \frac{k_0}{p} + \sum_{i=1,3,5,\dots}^m \frac{k_i}{p + \sigma_i} + H, \quad (5)$$

де k_0 – лишок в полюсі $p = 0$; k_i – лишки в полюсах $p = \sigma_i$; H – лишок в полюсі $p = \infty$.

Функції комплексного опору двополюсника $Z(p)$ у вигляді суми простих дробових складових (5) відповідає перша форма Фостера, яка зображена на рис. 5 (а) [2].

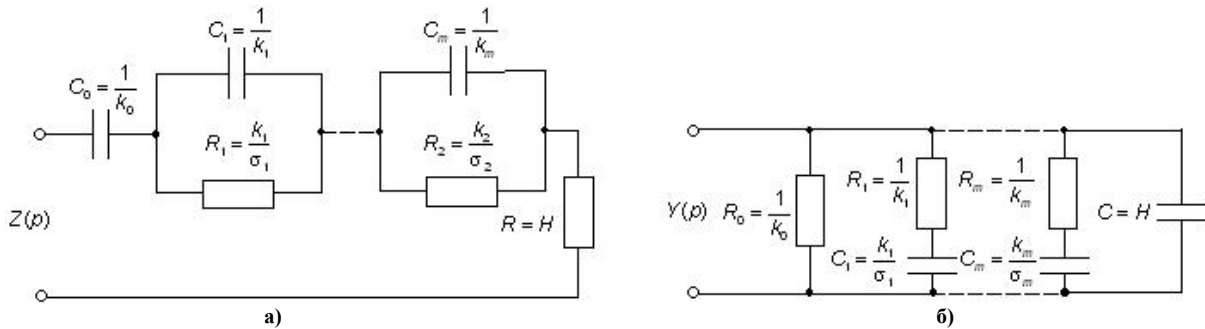


Рис. 5. Перша (а) та друга (б) форми Фостера

Апроксимація частотної характеристики СК функцією комплексної провідності двополюсника $Y(p) = 1/Z(p)$ та розкладання її на прості дробові складові (6) дозволяє отримати еквівалентну схему заміщення СК у вигляді другої форма Фостера (рис. 5 (б)) [2].

$$Y(p) = k_0 + \sum_{i=2,4,6,\dots}^m \frac{k_i \cdot p}{p + \sigma_i} + H \cdot p, \quad (6)$$

де $k_0 = Y(0)$; k_i – лишки в полюсах $p = \sigma_i$; H – лишок в полюсі $p = \infty$.

Метод представлення вхідного комплексного опору СК $Z(p)$ у вигляді неперервного дробу (7) дозволяє виконати синтез еквівалентної схеми заміщення СК у вигляді першої форма Кауера, яка зображена на рис. 6 (а) [7]. Апроксимація частотної характеристики СК функцією комплексної провідності двополюсника $Y(p) = 1/Z(p)$ та представлення її у вигляді неперервного дробу (7) дозволяє отримати еквівалентну схему заміщення СК у вигляді другої форма Кауера (рис. 6 (б)) [2].

$$Z(p) = R_1 + \frac{1}{pC_1 + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{pC_2 + \dots + \frac{1}{R_m + \frac{1}{pC_m}}}}}; \quad Y(p) = pC_1 + \frac{1}{R_1 + \frac{1}{pC_2 + \frac{1}{R_2 + \dots + \frac{1}{pC_m + \frac{1}{R_m}}}}} \quad (7)$$

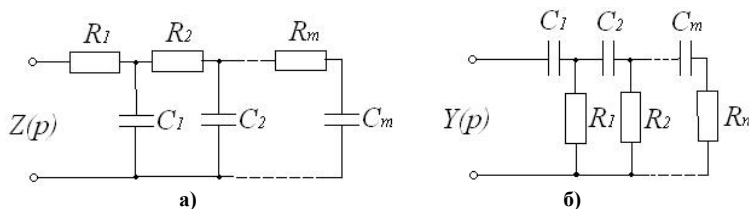


Рис. 6. Перша (а) та друга (б) форми Кауера

Результати експериментальних досліджень

З метою синтезу еквівалентної схеми заміщення СК на змінному струмі авторами проведені вимірювання значень комплексного опору СК південнокорейської компанії NESS Capacitor Corporation типу HE0120C-0027A номінальною ємністю 120Ф та робочою напруги 2,7В в діапазоні вимірювальних частот від $f_{\min}=23\text{мГц}$ до $f_{\max}=1\text{кГц}$.

За результатами експериментальних досліджень побудовано діаграму комплексного опору СК в

комплексній площині (рис. 7) для експериментальної та апроксимуючої дробово-раціональної функції четвертого порядку (8).

$$Z(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4}, \quad (8)$$

де $p = j\omega$ – комплексна частота; a_0, a_1, \dots, a_4 – коефіцієнти полінома чисельника; b_0, b_1, \dots, b_4 – коефіцієнти полінома знаменника.

За результатами апроксимації визначені наступні значення поліномів чисельника і знаменника апроксимуючої дробово-раціональної функції (8): $a_0=5,492$; $a_1=11,293$; $a_2=4,552$; $a_3=0,286$; $a_4=1,487 \cdot 10^{-3}$; $b_0=1$; $b_1=520,405$; $b_2=446,462$; $b_3=33,912$; $b_4=0,195$.

Для синтезу еквівалентної схеми заміщення СК на змінному струмі виконаємо розкладання апроксимуючої дробово-раціональної функції (8) в неперервний дріб (9):

$$Z(p) = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_0} + pC_1 + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{pC_2 + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{pC_3 + \frac{1}{R_4 + \frac{1}{pC_4}}}}}}}} \quad (9)$$

На основі отриманого неперервного дроби (2) синтезовано еквівалентну схему заміщення СК на змінному струмі у вигляді першої форми Кауера, яку доповнено паралельно з'єднаним активним опором R_0 (рис. 8) для врахування явища релаксації напруги СК після його заряду або розряду великим струмом.

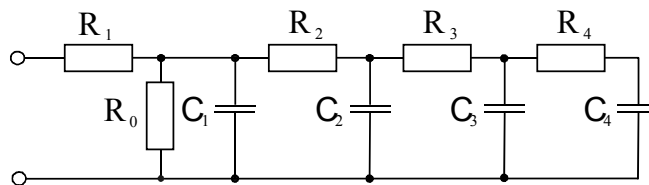


Рис. 9. Еквівалентна схема заміщення СК на змінному струмі

Висновки

1. За результатами синтезу еквівалентної схеми заміщення СК на змінному струмі отримані наступні значення її параметрів елементів: $R_0=5,5\text{Ом}$; $R_1=7,6\text{Ом}$; $C_1=7,1\text{Ф}$; $R_2=1,1\text{мОм}$; $C_2=35,6\text{Ф}$; $R_3=4,8\text{мОм}$; $C_3=27,9\text{Ф}$; $R_4=41,3\text{мОм}$; $C_4=24,1\text{Ом}$.

2. Аналіз експериментальних досліджень параметрів та характеристик СК показує, що спостерігається частотна дисперсія їх внутрішнього активного опору і ємності, що є наслідком повільних та швидких електрохімічних процесів накопичення електричного заряду ПЕШ.

3. Отримано аналітичний вираз комплексного опору СК та визначено параметри елементів його схеми шляхом апроксимації експериментальної кривої комплексного опору, достовірність якого підтверджується збіжністю експериментальних та теоретичних даних.

Література

1. Shynkaruk O. Supercapacitor modeling and Testing for Hybrid Vehicle / O. Shynkaruk, V. Martynyuk // Proceedings of the IXth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2008), Lviv-Slavsko, Ukraine, February 19-23, 2008, pp. 497-499.
2. Матханов П.Н. Основы синтеза линейных электрических цепей / П.Н. Матханов. – М.: Высшая школа, 1976. – 238с.
3. Мартинюк В.В. Вимірювання та моделювання імпедансних спектрів електрохімічних суперконденсаторів / В.В. Мартинюк // Вісник технологічного університету Поділля. – Том 2. – Хмельницький. – 2003. – № 3. – С.185-188.
4. Warburg E. Uber das Verhalten sogenannter unpolarisierbarer Electroden gegen Wechselstrom. / Warburg E // Ann. Phys. Chem. – 1899. – V.67. – P.493– 499.
5. De Levie R. Electrochemical Response of Porous and Rough Electrodes. / de Levie R // Advances in

6. Masayuki Itagaki. Impedance analysis on electric double layer capacitor with transmission line model. / Masayuki Itagaki, Satoshi Suzuki, Isao Shitanda, Kunihiro Watanabe, Hiroshi Nakazawa // Journal of Power Sources. – 2007. – V.164. – P.415– 424.

7. Мартинюк В.В. Методи та апаратура вимірювання параметрів електрохімічних суперконденсаторів / Мартинюк В.В // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Хмельницький. – 2007. – № 3. – С.182-184.

8. Грилихес М.С. Контактная кондуктометрия: Теория и практика метода / М.С. Грилихес, Б.К. Филановский. – Л.: Химия, 1980. – 176с.

Надійшла 12.4.2011 р.

УДК: 621.586.776: 621.382

В.С. ОСАДЧУК, О.В. ОСАДЧУК, О.М. ІЛЬЧЕНКО
Вінницький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ МДН-ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ ТА З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Показана можливість перетворення оптичного випромінювання на основі автогенераторного пристрою, який містить МДН-транзисторну структуру з від'ємним опором та активний індуктивний елемент, і в якому фоточутливим елементом є сонячний елемент. Отримано аналітичну залежність вольт-амперної характеристики. Похибка розробленої математичної моделі становить $\pm 5\%$.

In article the opportunity of transformation of optical radiation is shown on the basis of the self-oscillator which consist of MDS-transistor structure with negative resistance and an active inductive element, and which also contains the solar cell as photosensitive element. Analytical dependence of current-voltage characteristic are received. The divergence of theoretical and experimental results is $\pm 5\%$.

Ключові слова: оптичне випромінювання, сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, від'ємний опір.

Вступ

Технологія виробництва фотоелектричних перетворювачів є однією з найбільш швидко зростаючих технологій зі щорічним приростом в 40 % [1]. Адже фотоелектрична енергетика займає особливе місце завдяки здатності фотоелектричних приладів напряму перетворювати сонячне світло в електричні сигнали без шкоди для навколишнього середовища. Зокрема, сонячні батареї є надійним і економічним джерелом струму, що доводить їх актуальність [2].

Сьогодні ефективно вирішити проблему перетворення сонячної енергії в енергію електричного поля, яку потрібно передавати на відстань, можна завдяки використанню напівпровідникових приладів з від'ємним опором, які входять до складу сучасних інформаційних систем для сприймання, обробки, зберігання і передачі вимірної інформації на відстань [3]. Тому автори статті поставили задачу дослідити характеристики радіовимірювального оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою з від'ємним опором, в якому вихідним сигналом є частота.

Постановка задачі досліджень

Метою роботи є визначення вольт-амперної характеристики перетворювача на основі еквівалентної схеми шляхом розв'язку складених рівнянь Кірхгофа, що дає можливість вибрати робочу точку і тим самим досягнути стійкості роботи автогенератора перетворювача.

Математична модель

Схема радіовимірювального оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів з чутливим елементом – кремнієвим сонячним елементом розміром 5x10 мм та з активним індуктивним елементом показана на рис. 1. Роль індуктивної складової виконує біполярний транзистор VT3 з RC-колом, утвореним конденсатором C2 та резистором R2. Таким чином, коливальний контур утворено ємнісною складовою повного опору на електродах стік-стік МДН-транзисторів VT1 та VT2 та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT3.

Для визначення вольт-амперної характеристики складено еквівалентну схему по постійному струму (рис. 2).

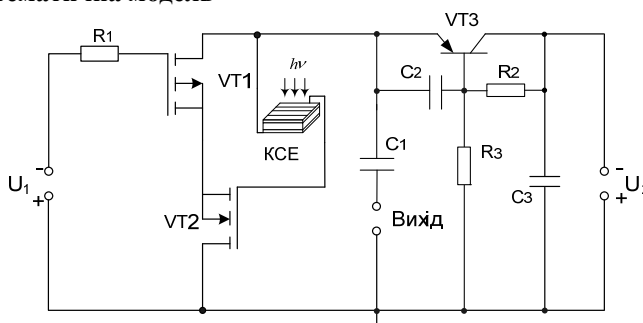


Рис. 1 Схема радіовимірювального оптичного перетворювача:

U_1 – напруга керування, U_2 – напруга живлення