

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА ЗОНДУЮЧИХ ІМПУЛЬСІВ
НАДШИРОКОСМУГОВИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОЛОКАТОРІВ ІЗ
ПОКРАЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

В статті наведені результати математичного моделювання генератора зонduючих імпульсів надширокоосмугових мобільних радіолокаторів із покращеними характеристиками, що дозволяє підвищити ефективність імпульсних передавальних пристроїв. Досліджено структурну та електричну схему генератора зонduючих імпульсів надширокоосмугових мобільних радіолокаторів з оптимізованою системою електроживлення із використанням блоку суперконденсаторів. Досліджено вплив блоку послідовно з'єднаних суперконденсаторів на вихідну потужність, тривалість фронту і спаду зонduючих імпульсів. Проведено математичне моделювання нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора в широкому діапазоні частот для різних напруг заряду та розряду.

Ключові слова: генератор зонduючих імпульсів надширокоосмугових мобільних радіолокаторів, математична модель, суперконденсатор, еквівалентна схема заміщення, параметри, характеристики.

D. A. MAKARYSHKIN, R.V. SOROKATUY, K.I. LYBENCHYK
Khmelnitsky national university

MATHEMATICAL MODEL OF ULTRA WIDEBAND RADARS DIRECT PULSE GENERATOR WITH IMPROVED CHARACTERISTICS

The paper presents results of mathematical modeling of direct pulse generator of ultra wideband radars with the improved characteristics, that allows to promote efficiency of impulsive transmission devices. The block diagram and schematic are investigated for direct pulse generator of ultra wideband radars with the optimized system of power supply by using supercapacitors. Influence of block of the consistently united supercapacitors of the improved schematic of direct pulse generator of ultra wideband radars are investigated on the output power, the pulse arising and dropping time. The mathematical modeling of nonlinear equivalent circuit for a supercapacitor is conducted in the wide frequency range for different charging voltage.

Key words: direct pulse generator of ultra wideband radars, mathematical model, supercapacitor, equivalent circuit, electric parameters, characteristic.

Вступ

Розвиток радіолокації є надзвичайно важливим для обороноздатності, суверенітету та економіки України. Спектр практичного застосування радіолокації є дуже широким. Найбільш важливі задачі радіолокації пов'язані із її застосуванням у військовій техніці для виявлення ворожих літаків, ракет та рухомих наземних об'єктів. Сучасний розвиток надширокоосмугових мобільних радіолокаторів спрямований на розробку та вдосконалення їх окремих елементів, вузлів, блоків, апаратних засобів та підсистем [1,2]. В надширокоосмугових мобільних радіолокаторах в якості зонduючих імпульсів, які дозволяють реалізувати надшироку смугу, використовується два види сигналів від 1 нс до 5 нс. До таких сигналів відносяться відео імпульси та короткі відрізки синусоїди, які складаються з одного або двох періодів коливальних. Використання надширокоосмугових сигналів та надкоротких імпульсів дозволяє суттєво покращити характеристики мобільних радіолокаторів та розпізнати об'єкти в укриттях та під землею, а також розрізнати об'єкти за видами матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз типової структурної схеми надширокоосмугового мобільного радіолокатора показує, що генератори зонduючих імпульсів надширокоосмугових мобільних радіолокаторів будуються по схемі релаксаційних генераторів із зовнішнім збудженням і складаються із формувача імпульсів та підсилювача потужності надвисокої частоти (рис.1) [3,4].

Втрати енергії на внутрішньому активному опорі літій-іонної батареї спричиняють зменшення напруги літій-іонної батареї $U_{БЗМ}$, яка поступає на підсилювач потужності надвисокої частоти генератора зонduючих імпульсів надширокоосмугового мобільного радіолокатора.

Зменшення напруги літій-іонної батареї $U_{БЗМ}$ призводить до зменшення вихідної потужності сигналу, зміни положення робочої точки активного елемента підсилювача потужності надвисокої частоти, спотворення форми вихідного сигналу та зменшення його коефіцієнта корисної дії майже на 17% в порівнянні із живленням від ідеального джерела, для якого значення активного внутрішнього опору $R_{вн}=0$ Ом.

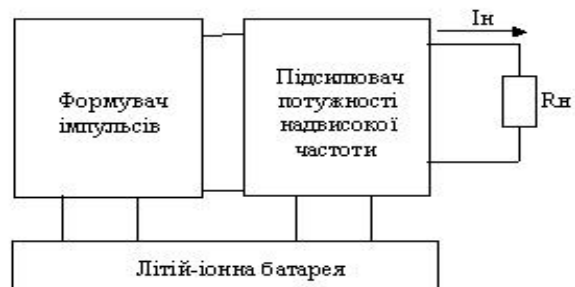


Рис. 1. Типова структурна схема генератора зонduючих імпульсів надширокоосмугових мобільних радіолокаторів

Математична модель генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів

Для подолання цього недоліку використовують [5,6] вдосконалену структурну схему генератора зонduючих імпульсів із використанням блоку суперконденсаторів (рис. 2).

Враховуючи, що типова літій-іонна батарея створює напругу $U_B=3,6V$, а робоча напруга одного суперконденсатора складає $U_{СК}=2,75V$, пропонується застосувати послідовне з'єднання двох суперконденсаторів у блок суперконденсаторів із загальною робочою напругою $U_{БСК}=5,5V$. Це підвищить потужність генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів та призведе до покращення їх технічних характеристик.

Для перетворення постійної напруги літій-іонної батареї $U_B=3,6V$ в постійну напругу блоку суперконденсаторів $U_{БСК}=5,5V$ використовується перетворювач постійної напруги. Вдосконалена електрична схема генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів із використанням блоку суперконденсаторів зображена на рис. 3.[5, 6].



Рис. 2 Вдосконалена структурна схема генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів

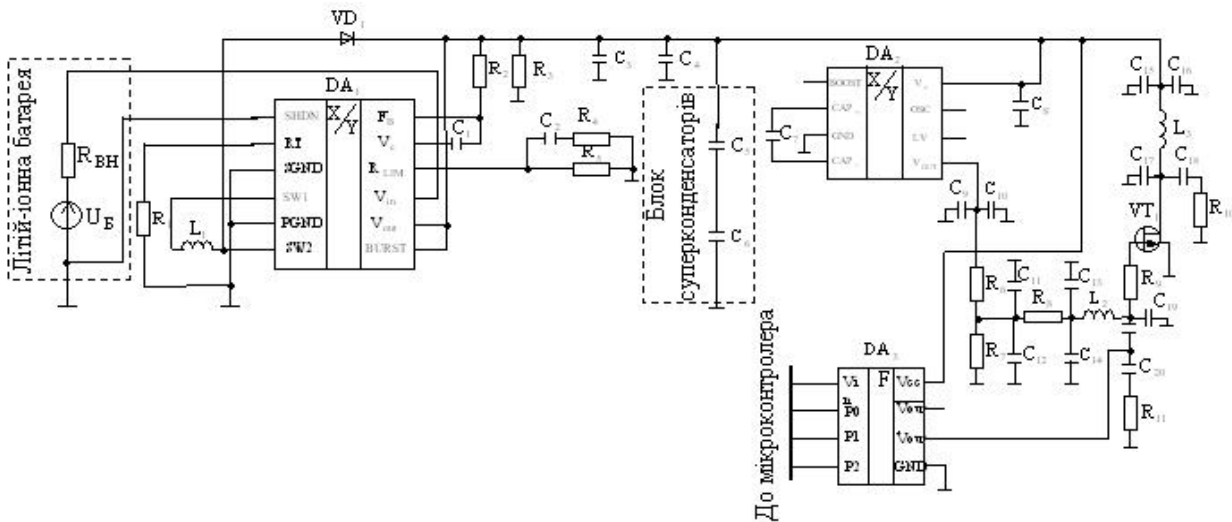


Рис. 3. Вдосконалена електрична схема генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів

В запропонованій схемі використовуються типові елементи: літій-іонна батарея напругою $U_B=3,6V$, перетворювач постійної напруги DA_1 типу LTC3442 фірми Linear Technology для перетворення постійної напруги літій-іонної батареї $U_B=3,6V$ в постійну напругу блоку суперконденсаторів C_5 та C_6 $U_{БСК}=5,5V$.

Також в схемі використовується програмований формувач імпульсів DA_3 типу DS1040 фірми Dallas Semiconductor, який може формувати зонduючі імпульси тривалістю 5 нс та 50 нс в залежності від вхідного кодового слова.

Для підсилення потужності зонduючих імпульсів використовується потужний надвисокочастотний польовий транзистор VT_1 типу P121 фірми PolyFET RF Devices. Також в схемі використані допоміжні елементи, які забезпечують режим роботи польового транзистора.

Для забезпечення максимального коефіцієнта корисної дії генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів використовується ключовий режим роботи потужного надвисокочастотного польового транзистора [5]. Розглянемо вихідну вольтамперну характеристику польового транзистора P121 рис. 4 [5].

Проаналізуємо вплив блоку суперконденсаторів на збільшення потужності генератора зонduючих імпульсів надширококумгуових мобільних радіолокаторів. Для цього на вихідній характеристиці задамо максимальний струм стоку $I_{Cmax}=2A$ та проведемо дві лінії навантаження, які відповідають випадку при зменшенні напруги літій-іонної батареї внаслідок спаду напруги на внутрішньому опорі батареї $U_{БЗМ}=U_B-I_{Cmax}R_{вн.}=3V$ та напрузі блоку суперконденсаторів $U_{БСК}=5,5V$.

Аналіз вихідної вольтамперної характеристики польового транзистора P121 показує, що при використанні блоку суперконденсаторів лінія навантаження перетинає криву насичення при більшому значенні струму стоку $I_{СБСК}\approx 1,2A$ ніж при використанні лише літій-іонної батареї без блоку суперконденсаторів, тоді $I_{СБЗМ}\approx 0,9A$.

Також необхідно відмітити, що при збільшенні напруги між виводами польового транзистора

покращуються також його динамічні параметри [5].

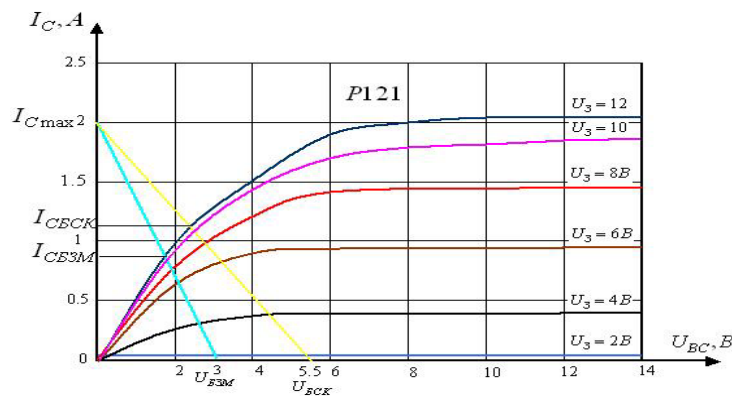


Рис. 4. Вихідна вольтамперна характеристика польового транзистора P121

Розглянемо математичну модель польового транзистора, використовуючи його еквівалентну схему заміщення для діапазону надвисоких частот рис.5а та схему його ввімкнення рис.5б [5].

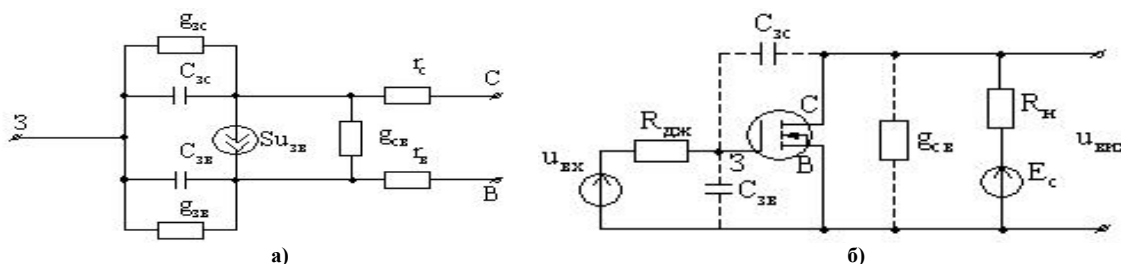


Рис. 5. Еквівалентна схема заміщення польового транзистора для діапазону надвисоких частот (а); схема ввімкнення польового транзистора (б)

В цих схемах використовуються провідності та ємності між затвором та стоком, а також затвором і витком g_{3c} , C_{3c} , g_{3b} та C_{3b} відповідно. Також в схемі використовується кероване джерело струму стоку Su_{3b} , вихідна провідність g_{3e} і вихідні об'ємні опори r_c та r_b .

Для лінійної ділянки вихідної вольтамперної характеристики польового транзистора струм стоку прямо пропорційно зростає відносно напруги між стоком і витком U_{CB} (1):

$$i_c \approx 2k(U_{II} - u_{3B})u_{CB}, \tag{1}$$

де k - постійний коефіцієнт, який залежить від конструкції транзистора;

U_{II} - порогова напруга (або напруга відсікання струму стоку);

u_{3B} - напруга між затвором та витком.

Потужність вихідного сигналу, яка виділяється на польовому транзисторі, визначається виразом (2):

$$P = u_{CB}i_c \approx 2k(U_{II} - u_{3B})u_{CB}^2 \tag{2}$$

Звідси можна визначити коефіцієнт збільшення потужності вихідного сигналу m_p , яка виділяється на польовому транзисторі при використанні блоку суперконденсаторів (рис.1) у порівнянні із схемою без блоку суперконденсаторів (рис.2) (3):

$$m_p = \frac{P_{БСК}}{P_{БЗМ}} \approx \frac{u_{БСК}^2}{(u_B - i_{CBЗМ}R_{ВН})^2} = \frac{5,5^2}{(3,6 - 0,9 \cdot 0,3)^2} = 2,73 \tag{3}$$

Використання блоку суперконденсаторів у вдосконаленій схемі генератора зондуєчих імпульсів надширококутєвих мобільних радіолокаторів дозволяє збільшити напругу між затвором і витком від величини $U_{3ВЗМ} = 3B$ до величини $U_{3ВБСК} = 5,5B$. Звідси коефіцієнт зменшення фронту та спаду зондуєчих імпульсів m_i визначається виразом (4):

$$m_i = \frac{\tau_{3ВЗМ}}{\tau_{3ВБСК}} \approx \sqrt{\frac{|U_{3ВБСК}|}{|U_{3ВЗМ}|}} = \sqrt{\frac{5,5}{3}} = 1,35 \tag{4}$$

Для дослідження впливу блоку суперконденсаторів на підвищення вихідного струму польового транзистора та зменшення фронту та спаду зондуєчих імпульсів надширококутєвих мобільних радіолокаторів необхідно розробити математичну модель суперконденсатора та його еквівалентну схему заміщення

Аналіз параметрів і характеристик суперконденсаторів показує, що спостерігається відхилення

експериментальних імпедансних спектрів від результатів їх апроксимації. Таке відхилення пояснюється наявністю фарадеївського струму саморозряду, який обумовлює викривлення експериментальних імпедансних спектрів суперконденсаторів.

Для підвищення точності математичного опису параметрів і характеристик суперконденсаторів автор пропонує [6] нелінійну еквівалентну схему заміщення суперконденсатора рис.6.

У цій нелінійній математичній моделі маємо наступні елементи: R_B - активний опір виводів, $R_E(u)$ - активний розподілений нелінійний опір електродів, L_E - розподілена індуктивність електродів, $R_\Phi(u)$ - активний розподілений нелінійний фарадеївський опір, $C_\Phi(u)$ - розподілена нелінійна фарадеївська ємність, $R_{\Phi CP}(u)$ - активний розподілений нелінійний фарадеївський опір саморозряду, $C_{ПЕШ}(u)$ - розподілена нелінійна ємність подвійного електричного шару та $R_{CP}(u)$ - активний розподілений нелінійний опір саморозряду.

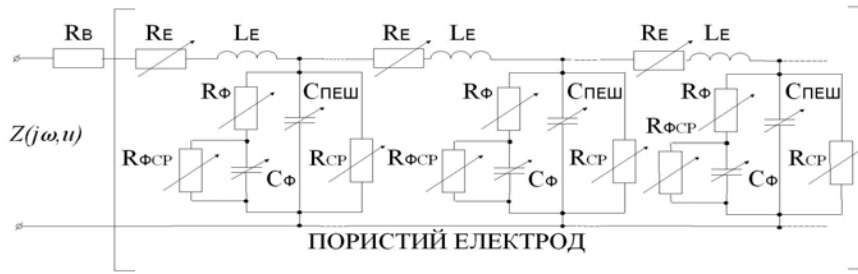


Рис. 6. Нелінійна еквівалентна схема заміщення суперконденсатора

У квадратні дужки взято фрагмент схеми, який відповідає еквівалентній схемі заміщення пористого електроду.

Математичною моделлю нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора є нелінійна функція комплексного опору $Z(j\omega, u, i)$. В загальному випадку нелінійна функція комплексного опору $Z(j\omega, u, i)$ є функцією трьох змінних: частоти зондуючого синусоїдального сигналу ω , напруги u на виводах суперконденсатора та струму i , який проходить через суперконденсатор.

Визначення комплексного опору нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора, здійснюється за допомогою гармонічного зондуючого сигналу у двох режимах:

- 1) потенціостатичному режимі, коли підтримується постійна напруга на виводах суперконденсатора $u = const$;
- 2) гальваностатичному режимі, коли підтримується постійний струм через суперконденсатор $i = const$.

Якщо амплітуди напруги U_m та струму I_m зондуючого синусоїдального сигналу набагато менші ніж відповідно постійна напруга на виводах суперконденсатора у потенціостатичному режимі ($U_m \ll u = const$) та постійний струм через суперконденсатор у гальваностатичному режимі ($I_m \ll i = const$), тоді для таких умов нелінійну еквівалентну схему заміщення суперконденсатора рис.6 можна вважати лінійною.

Функція комплексного опору нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора можна записати у вигляді [6] (5).

$$Z(j\omega, u) = R_B + \sqrt{\frac{R_E(u) + j\omega L_E}{1 + \frac{1}{R_\Phi(u) + \frac{1}{j\omega C_\Phi(u) + \frac{1}{R_{\Phi CP}(u)}}} + \frac{1}{R_{CP}(u) + j\omega C_{ПЕШ}(u)}}} \times \text{cth} \left[\sqrt{\left(R_E(u) + j\omega L_E \right) \left(\frac{1}{R_\Phi(u) + \frac{1}{j\omega C_\Phi(u) + \frac{1}{R_{\Phi CP}(u)}}} + \frac{1}{R_{CP}(u) + j\omega C_{ПЕШ}(u)} \right)} \right] \quad (5)$$

В запропонованій вдосконаленій структурній схемі генератора зондуючих імпульсів надширококутових мобільних радіолокаторів із використанням блока суперконденсаторів (рис. 2) використовується послідовне з'єднання двох суперконденсаторів для підвищення їх робочої напруги (рис.3).

Проведені автором експериментальні дослідження суперконденсаторів показують, що їх параметри і характеристики зразків одного типоміналу суттєво відрізняються. Якщо у при послідовному з'єднанні використовувати суперконденсатори одного типоміналу, але з великим відхиленням параметрів і характеристик, то швидкість їх заряджування буде різною.

Наслідком цього буде перевищення максимально допустимої напруги на одному із послідовно з'єднаних суперконденсаторів та недозаряджування другого послідовно з'єданого суперконденсатора. В результаті виникне електричний пробій першого суперконденсатора, а далі і другого тому, що до нього буде прикладено подвійну робочу напругу. Це призведе до пробою також другого суперконденсатора та вихід із ладу генератора зондуючих імпульсів і всього надширокопasmового мобільного радіолокатора.

Тому актуальною є задача визначення параметрів і характеристик суперконденсаторів та підбору для послідовного з'єднання суперконденсаторів із максимально подібними параметрами та характеристиками.

Для вирішення цієї задачі автор пропонує новий метод імпедансної параметризації, суть якого полягає в наступному:

1) визначення імпедансних спектрів суперконденсатора в широкому діапазоні частот для різних напруг заряду суперконденсатора;

2) апроксимація визначених імпедансних спектрів та визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення для кожного рівня напруги суперконденсатора;

3) отримання інтерполяційних функційних залежностей кожного параметра еквівалентної схеми заміщення від напруги заряду суперконденсатора.

Імпедансні спектри у вигляді діаграми Найквіста для суперконденсатора типу HE0120C-0027A на номінальну ємність 120Ф і напругу 2,7В південнокорейської фірми NESS Capacitor Co., Ltd. та результати їх апроксимації із використанням нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора зображено на рис.7а.

Результати аналізу показують, що спостерігається незначне відхилення експериментальних імпедансних спектрів від результатів їх нелінійної апроксимації в області ультранизких частот на вершині імпедансного спектру.

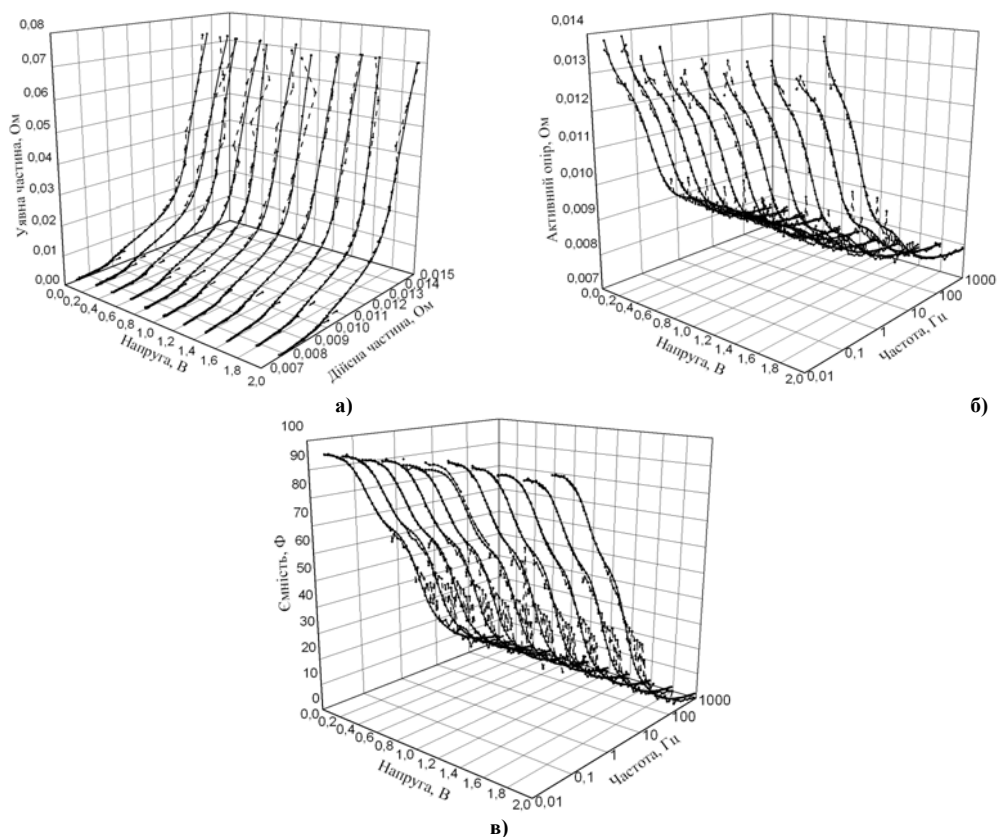


Рис. 7. Експериментальні (штрихова лінія) та розраховані (суцільна лінія) імпедансні спектри суперконденсатора (а); експериментальні (штрихова лінія) та розраховані (суцільна лінія) залежності еквівалентного активного опору суперконденсатора від частоти та напруги (б); експериментальні (штрихова лінія) та розраховані (суцільна лінія) залежності еквівалентної ємності суперконденсатора від частоти та напруги (в).

Із імпедансних спектрів суперконденсатора рис. 7а можна визначити значення активного опору та еквівалентної ємності суперконденсатора для діапазону частот від $f_{\min} = 1\text{МГц}$ до $f_{\max} = 10\text{кГц}$ та діапазону зарядних напруг від $U_{\min} = 0\text{В}$ до $U_{\max} = 2\text{В}$ (рис.7б та рис.7в).

В результаті нелінійної апроксимації експериментальних імпедансних спектрів суперконденсатора із використанням нелінійної математичної моделі можна отримати значення параметрів елементів нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора для різних зарядних напруг таблиця 1[6].

Таблиця 1

Параметри елементів для різних зарядних напруг суперконденсатора

U, В	C _{ПЕШ} , Ф	R _В , МОм	R _Е , МОм	R _Ф , МОм	C _Ф , Ф	R _{СР} , Ом	R _{ФСР} , Ом
0	62,781	7,499	4,147	32,605	31,793	4,959	31,749
0,2	63,968	7,561	4,119	34,633	30,987	4,463	29,155
0,4	63,071	7,541	4,131	32,068	31,656	5,651	157,666
0,6	63,454	7,606	3,899	31,892	31,876	4,382	38,402
0,8	63,694	7,404	4,545	33,302	31,452	9,301	144,067
1	62,781	7,499	4,147	32,605	31,793	4,959	126,694
1,2	65,194	7,405	4,565	33,588	32,619	6,82	169,877
1,4	65,831	7,439	4,904	34,813	31,339	4,831	164,508
1,6	63,933	7,497	4,931	31,842	32,175	4,704	100,033
1,8	64,417	7,793	5,145	33,732	31,349	12,978	154,637
2	66,402	7,808	5,542	34,013	31,799	4,273	148,904

Використовуючи параметри елементів вдосконаленої нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора можна побудувати графіки зміни цих параметрів від напруги заряду суперконденсатора та виконати їх апроксимацію.

Аналіз зміни ємності подвійного електричного шару $C_{ПЕШ}(u)$ від напруги заряду суперконденсатора показує, що при зростанні напруги ємність подвійного електричного шару також зростає. Це пояснюється більшою глибиною проникнення іонів електроліту в пори електроду в наслідок збільшення напруженості електричного поля між електродом та електролітом при зростанні зарядної напруги суперконденсатора.

Розглянемо зміну ємності подвійного електричного шару $C_{ПЕШ}(u)$ від напруги заряду суперконденсатора рис. 8 та апроксимуємо експериментальні дані прямою лінією, яка описується виразом (6).

$$C_{ПЕШ}(U) = 62,832 + 1,31U \quad (6)$$

По аналогії розглянемо зміну розподіленої нелінійної фарадеївської ємності нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора для різних зарядних напруг рис.9 та апроксимуємо експериментальні дані прямою лінією, яка описується виразом (7).

$$C_{Ф}(U) = 31,57 + 0,14U \quad (7)$$

Аналіз зміни фарадеївської ємності $C_{Ф}(u)$ від зарядної напруги суперконденсатора показує, що ця ємність змінюється набагато менше

ніж ємність подвійного електричного шару $C_{ПЕШ}(u)$. Такий характер зміни фарадеївської ємності $C_{Ф}(u)$ пояснюється тим, що ця ємність характеризує повільні види поляризації електроліту, які більш залежать від частоти вимірювального сигналу, а не від напруги заряду суперконденсатора.

Проаналізуємо залежність активного розподіленого нелінійного опору електроду $R_E(u)$ від зарядної напруги суперконденсатора рис.10 та апроксимуємо експериментальні дані прямою лінією, яка описується виразом (8).

$$R_E(U) = 3,85 + 0,7U \quad (8)$$

Аналіз розподіленого нелінійного опору електроду

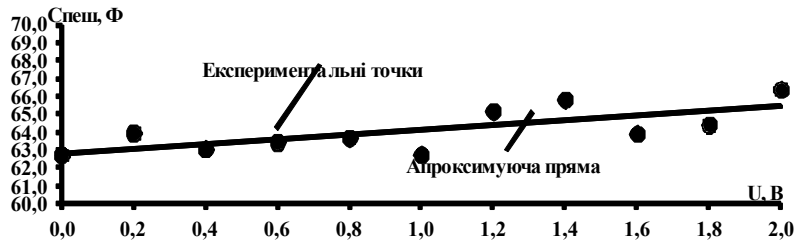


Рис. 8. Експериментальна та теоретична залежність ємності подвійного електричного шару $C_{ПЕШ}(u)$ від напруги заряду суперконденсатора

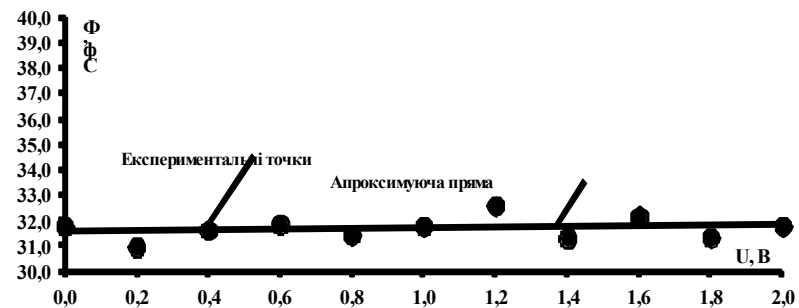


Рис. 9. Експериментальна та теоретична залежність фарадеївської ємності $C_{Ф}(u)$ від напруги заряду суперконденсатора

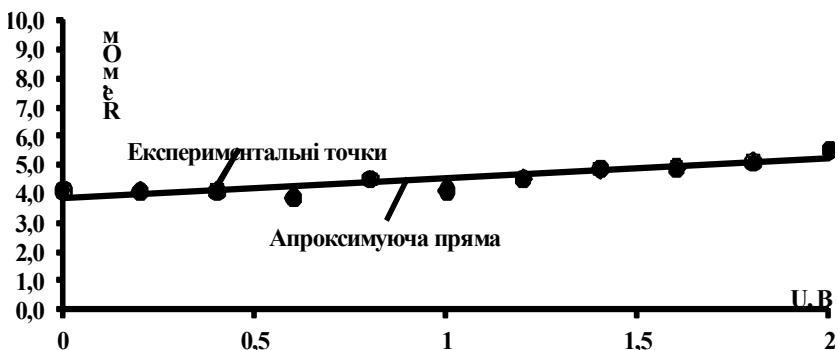


Рис. 10. Експериментальна та теоретична залежність активного розподіленого нелінійного опору електроду $R_E(u)$ від напруги заряду суперконденсатора

$R_E(u)$ показує, що при збільшенні напруги заряду суперконденсатора розподілений нелінійний опір електроду також збільшується. Це пояснюється збільшенням взаємодії між іонами електроліту та поверхнею електроду внаслідок збільшення електричного поля подвійного електричного шару.

Використовуючи вирази апроксимації для інших параметрів елементів нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора побудуємо теоретичну імпедансну поверхню суперконденсатора від напруги заряду рис. 11а.

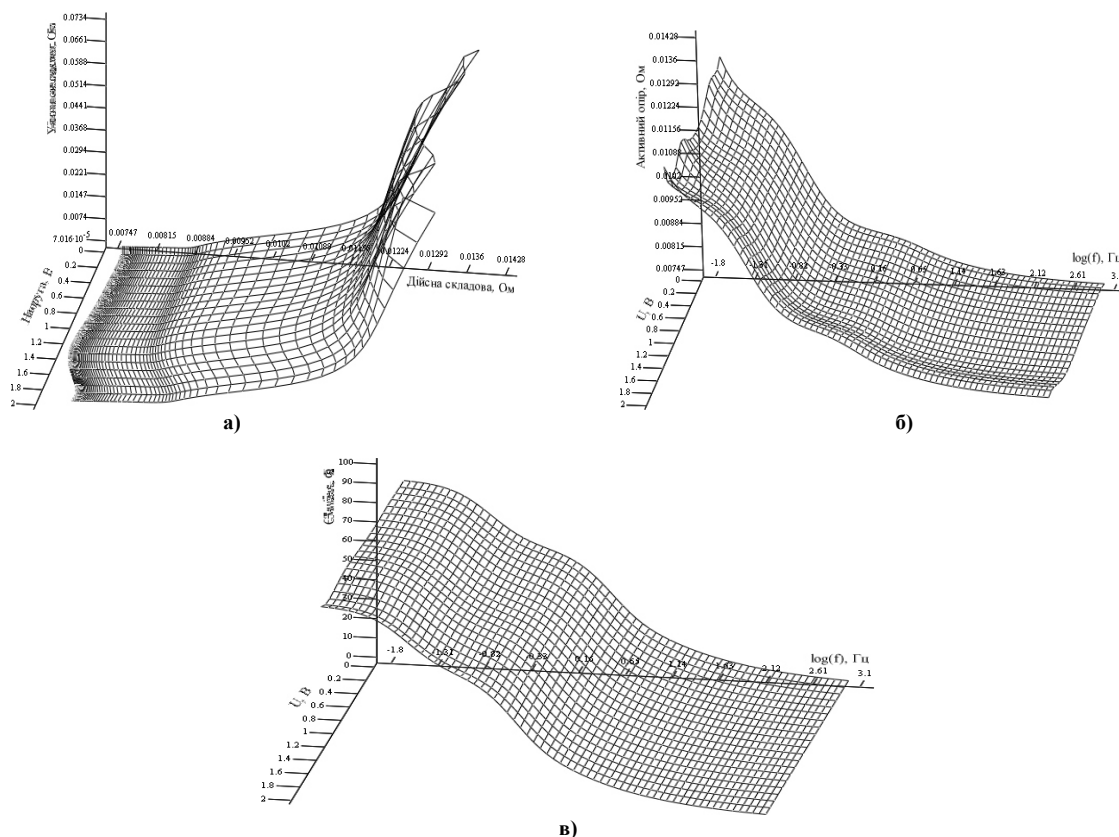


Рис. 11. Теоретична імпедансна поверхня суперконденсатора (а); теоретична поверхня еквівалентного активного опору (б); теоретична поверхня еквівалентної ємності суперконденсатора (в).

Теоретична імпедансна поверхня суперконденсатора дозволяє визначити активну та реактивну складову комплексного опору для будь якої частоти та напруги заряду суперконденсатора в заданому діапазоні частот і напруг. Використовуючи ці значення побудуємо теоретичну поверхню еквівалентного активного опору рис. 11б та еквівалентної ємності суперконденсатора рис. 11в.

Отримані значення еквівалентного активного опору та еквівалентної ємності суперконденсатора дозволяють здійснювати математичне моделювання процесу роботи запропонованої автором електричної схеми генератора зондуючих імпульсів надширококутових мобільних радіолокаторів із використанням блоку суперконденсаторів (рис. 2).

Аналізуючи теоретичну поверхню еквівалентного активного опору рис. 11а та еквівалентної ємності суперконденсатора рис. 11в можна визначити мінімальне та максимальне значення еквівалентного активного опору $R_{екв\ min} = 7,43\ мОм$ і $R_{екв\ max} = 13,6\ мОм$ відповідно, а також мінімальне та максимальне значення еквівалентної ємності $C_{екв\ min} \approx 5\ Ф$ і $C_{екв\ max} \approx 90\ Ф$.

Використовуючи ці дані можна визначити мінімальне та максимальне значення активної потужності на еквівалентному активному опорі суперконденсатора вираз (9) та вираз (10) відповідно.

$$P_{втрат\ min} = 7,43 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 14,86\ мВт \quad (9)$$

$$P_{втрат\ max} = 13,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 27,2\ мВт \quad (10)$$

Звідси можна визначити коефіцієнт втрат потужності вираз у порівнянні із втратами потужності на внутрішньому активному опорі літій-іонної батареї:

$$m_{втрат\ max} = \frac{P_{втрат\ Б}}{P_{втрат\ max}} \approx \frac{2 \cdot 0,3}{2 \cdot 27,2 \cdot 10^{-3}} \approx 11. \quad (11)$$

Висновки

1. Запропоновано вдосконалену структурну та електричну схему генератора зондуючих імпульсів

надширококуглових мобільних радіолокаторів, яка дозволяє збільшити потужність вихідного сигналу у $m_p = 2,73$ рази.

2. Досліджено вплив блоку послідовно з'єднаних суперконденсаторів вдосконаленої схеми генератора зондуєчих імпульсів надширококуглових мобільних радіолокаторів на тривалість фронту і спаду зондуєчих імпульсів і встановлено, тривалість фронту і спаду при використанні блоку послідовно з'єднаних суперконденсаторів зменшується в $m_i = 1,35$ раз.

3. Для визначення параметрів елементів нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсаторів запропонований метод імпедансної параметризації, перевагою якого є визначення їх параметрів і характеристик в широкому діапазоні частот для різних напруг заряду та розряду.

4. Встановлено, що параметри і характеристики суперконденсаторів суттєво відрізняються для зразків одного типоміналу, тому необхідно здійснювати підбір суперконденсаторів за максимально подібними параметрами та характеристиками.

5. Визначено, що при використанні блоку послідовно з'єднаних суперконденсаторів максимальна потужність втрат енергії на суперконденсаторі складає $P_{втрat\max} = 27,2\text{ мВт}$ і менша за втрати на активному опорі літій-іонної батареї в $m_{втрat\max} \approx 11$ разів.

Література

Иммореев И.Я. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи совместная работа в общей полосе частот / Иммореев И.Я., Судаков А.А. // Электроника: Наука, Технология. – 2003. – № 2 – С. 34 – 37.

Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / Дьяконов В.П. – Издательство: Л.: Энергия, 2009. – 384 с.

Шинкарук О.М. Підвищення ефективності генераторів коротких імпульсів надширококуглових мобільних радіолокаторів / Шинкарук О.М., Мартинюк В.В., Макаришкін Д.А. // Збірник наукових праць національної академії Державна прикордонної служби України, ім. Б. Хмельницького. – Частина 2. – №48/1– 2009. – С.83 – 86.

Макаришкін Д.А. Математична модель генератора зондуєчих імпульсів із використанням суперконденсаторів для надширококуглових мобільних радіолокаторів / Макаришкін Д.А. // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Том 3. – Хмельницький. – 2009. – №3. – С.245 – 249.

Тугов М.Н. Полупроводниковые приборы / Тугов М.Н., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

V. Martynyuk Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors / V. Martynyuk, D. Makaryshkin, J. Boyko // Proceedings of the 15th IMEKO TC-4 International Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentations. – Iasi. – 2007 – Volume II.– P. 357 – 361.

References

1. Immoreev I.YA. Sverxshirokopolosny'e i uzkopolosny'e sistemy svyazi sovmestnaya rabota v obchey poloshe chastot / Immoreev I.YA., Sudakov A.A. // Elektronika: Nayka, Texnologiya – 2003. – № 2 – p. 34 – 37.

2. D'yakonov V.P. Generaciya i generatory / D'yakonov V.P. - Izdatel'stvo: L.: Energiya, 2009. – 384 p.

3. Shinkaruk O.M. Pidvy chennya effecty vnosti generatoriv korotky x impulsiv nadshy rokosmugovy x mobil'ny x radiolokatoriv / Shinkaruk O.M., Martynjuk V.V., Makaryshkin D.A. // Zbirnyk naukovy x prac' nacional'noji akademiji Dergavna prykordonnoji sluzby' Ukrainy, im. Bogdana Xmel'ny c'kogo. - Chasty na 2. - №48/1– 2009. – p.83 – 86.

4. Makaryshkin D.A. Matematy'chna model' generatora zondujuchy x impulsiv iz vykory'stannnyam superkondencatoriv dlya nadshy rokosmugovy x mobil'ny x radiolokatoriv / Makaryshkin D.A./ Visnyk Xmel'ny c'kogo nacional'nogo universy tetu. – Texnichni nauky. – Tom 3. - Xmel'ny c'kij. - 2009. – №3. – p.245 – 249.

5. Tugov M.N. Poluprovodnikoy e pribory / Tugov M.N., Glebov B.A., Charykov N.A. – M.: Energoatomizdat, 1990. – 576p.

6. V. Martynyuk Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors / V. Martynyuk, D. Makaryshkin, J. Boyko // Proceedings of the 15th IMEKO TC-4 International Symposium on Novelties in Electrical Measurements and Instrumentations. – Iasi. – 2007 – Volume II.– P. 357 – 361.

Рецензія/Peer review : 20.7.2014 р.

Надрукована/Printed : 12.7.2014 р.