

DOI: 10.18372/2310-5461.55.16905

УДК 621.395.721.5

О. Г. Плющ, д-р техн. наук, доц.
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
orcid.org/0000-0001-5310-0660
e-mail: opliusch@yahoo.com;

А. С. Савченко, д-р техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-8205-8852
e-mail: a.s.savchenko@ukr.net

О. П. Нечипорук, д-р техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-8407-8648
e-mail: olena.nechyporuk@npp.nau.edu.ua

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ШТУЧНОЇ ЗАРЯДНОЇ ДОВГОЇ ЛІНІЇ ТИПУ С НА ОСНОВІ НЕЯВНОГО АЛГОРИТМУ ЕЙЛЕРА

Вступ

Штучні зарядні довгі лінії широко використовуються в різних радіотехнічних застосуваннях. Хоча їх найбільш помітна роль є та, що вони відіграють в імпульсних модуляторах підсилювачів та автогенераторів потужності, ці лінії використовуються також в устаткуванні теоретичної фізики тощо.

При розробці штучних зарядних довгих ліній постає проблема вибору методу за яким проводиться оцінка її характеристик. Основним методом визначення характеристик таких ліній вважається натурний експеримент з використанням повно-розмірної або зменшеної в масштабі її моделі. Але такий підхід має ряд суттєвих недоліків, до яких не в останню чергу належить відсутність гнучкості та чуттєві матеріальні та часові витрати на проведення дослідження. Альтернативним методом є проведення аналітичних розрахунків, які передбачають знаходження коренів комплексних поліномів високої ступені, що значно ускладнює отримання належного результату та піддає сумніву його достовірність.

В ряді останніх робіт пропонується використовувати імітаційне комп'ютерне моделювання штучної зарядної довгої лінії. Цей підхід вигідно відрізняється тим, що він має малу вартість, є достатньо гнучким та багатофункціональним. Всі ці імітаційні комп'ютерні моделі передбачають створення системи диференційних рівнянь, що описує штучну зарядну довгу лінію, з наступним переходом до системи рівнянь різниці. Значений перехід є критично важливим для за-

безпечення адекватності моделі і не є достатньо вивченим. Існує багато правил та алгоритмів здійснення переходу від системи диференційних рівнянь до системи рівнянь різниці; найбільш відомими серед них є явний алгоритм Ейлера, неявний алгоритм Ейлера та метод трапецій. Зазвичай розробники та дослідники прагнуть використовувати явний метод Ейлера виходячи з того, що він є простий і призводить до достатньо нескладної системи рівнянь різниці. Але є також добре відомими і його недоліки, до яких слід віднести накопичення помилок при невдалому виборі кроку налаштування та відсутність аналітичних критеріїв обрахунку того, коли ці помилки виникають. Тому розробники імітаційних комп'ютерних моделей змушені застосовувати і інші правила та алгоритми переходу від системи диференційних рівнянь до системи рівнянь різниці, зокрема неявний алгоритм Ейлера.

Виходячи з цього, робота присвячена проведенню синтезу імітаційної комп'ютерної моделі для штучної зарядної довгої лінії типу С, для якої раніше було отримано імітаційну комп'ютерну модель за допомогою явного алгоритму Ейлера, з використанням саме неявного алгоритму Ейлера. Це дає змогу порівняти результати досліджень двох імітаційних комп'ютерних моделей, і алгоритмів Ейлера, та підтвердити достовірність отриманих раніше результатів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Джерела [1; 2; 3] приділяють велику увагу тому, як імпульсні модулятори, елементом яких є

штучні зарядні довгі лінії, використовуються для формування сигналів з великою потужністю на радіочастоті. Робота [1] розглядає фундаментальні основи побудови імпульсних модуляторів та пояснює в подробицях базові процеси що відбуваються в штучних зарядних довгих лініях. При цьому джерела [2; 3] мають трохи іншу направленість і зосереджуються на розгортанні імпульсних модуляторів в підсилювачах потужності на радіочастоті та СВЧ. Недоліком цих робіт є те, що вони не торкаються методів розробки штучних зарядних довгих ліній та не звертають увагу на застосування для цих цілей імітаційного комп'ютерного моделювання.

Робота [4] має чітко виражену практичну направленість та представляє змістовну класифікацію штучних зарядних довгих ліній. При цьому, поруч з типовими параметрами елементів зарядних ліній, це джерело презентує результати випробувань певних натурних зразків. Ці вироби, по-суті вже можуть бути використані для певних типів радіотехнічних пристроїв. Наочним недоліком цієї роботи є відсутність інформації щодо того, як ці штучні зарядні довгі лінії були розроблені та за якими формулами відбувався розрахунок їх елементів. Звичайно, при наявності основної уваги до натурних зразків, джерело [4] не розглядає методи імітаційного комп'ютерного моделювання штучних зарядних довгих ліній.

Джерела [5; 6] вмішують велику кількість інформації щодо застосування імпульсних модуляторів зі штучними зарядними довгими лініями в радіолокації. При цьому головний акцент робиться на тому, як характеристики цих ліній і, відповідно, імпульсних модуляторів, впливають на кінцеві параметри радіолокаційного обладнання. Як результат, ці роботи не приділяють належну увагу розробці штучних зарядних довгих ліній з необхідними параметрами і використанню імітаційного комп'ютерного моделювання для контролю процедури їх синтезу.

В роботах [7; 8; 9] автори зосередилися на різних технологіях та методах, що застосовуються в радіочастотних підсилювачах потужності, які, як відомо, живляться від імпульсних модуляторів зі штучними зарядними довгими лініями. Але, як недолік, потрібно зазначити, що питанням побудови та отриманню параметрів штучних довгих ліній ці джерела не приділяють уваги, так само як і не розглядають методи імітаційного комп'ютерного моделювання.

Автори джерела [10] розглядають фундаментальні аспекти процесів в натуральних довгих лініях і, що є особливо важливим, наочно демонструють як можливо перейти від натуральної довгої лінії з розподіленими параметрами до

штучної довгої лінії з зосередженими параметрами. Не зважаючи на це, ця робота, хоча і пояснює багато різних застосувань штучних та натуральних довгих ліній, не розглядає штучні зарядні довгі лінії і не торкається використання імітаційного комп'ютерного моделювання для їх дослідження.

Робота [11] є фундаментальною щодо побудови імітаційних комп'ютерних моделей радіотехнічних ланцюгів з типових радіоелементів. Вона представляє різні співвідношення між струмами та напругами на цих типових елементах і надає багато прикладів побудови моделей систем, не оминаючи проблеми з алгоритмами та правилами переходу від систем диференціальних рівнянь до систем рівнянь різниці. Нажаль, ця робота не розглядає використання штучних довгих ліній в якості зарядних, та, відповідно, не наводить підходи до застосування імітаційного комп'ютерного моделювання цих ліній. Автори джерела [12] наводять змістовну та вичерпну класифікацію штучних зарядних довгих ліній які є основою імпульсних модуляторів в радіолокації. До того ж, ця робота представляє детальну, покрокову процедуру розробки неоднорідних штучних зарядних довгих ліній що забезпечують необхідну форму імпульсу на виході імпульсного модулятора. Тим не менш, проблеми цієї праці полягають в не опрацьованні методів простої оцінки форми вихідного сигналу лінії, окрім аналітичного, який є дуже складним та не гнучким.

Джерела [13; 14; 15] наочно демонструють переваги імітаційного комп'ютерного моделювання в різних застосуваннях телекомунікацій та радіотехніки. Наприклад, праця [15] переконливо демонструє як імітаційне комп'ютерне моделювання штучних зарядних довгих ліній може використовуватися для оцінки параметрів таких ліній при їх синтезі та удосконаленні. Але в [15] при побудові імітаційної комп'ютерної моделі використовується явний алгоритм Ейлера, який, як відомо, може накопичувати помилки та втрачати адекватність.

Виходячи з розгляду позитивних та негативних сторін наведених джерел, автори цієї роботи вбачають недостатнім вивчення використання різних алгоритмів переходу від систем диференціальних рівнянь до систем рівнянь різниці і вважають за необхідне продовжити дослідження перспективних методів імітаційного комп'ютерного моделювання з використанням неявного алгоритму Ейлера. Ці зусилля направляються для проведення порівняльного аналізу імітаційних моделей штучної зарядної довгої лінії представленої в [15].

Постановка завдання

Штучні зарядні довгі лінії, як компоненти імпульсних модуляторів, потребують додаткових досліджень саме методами імітаційного комп’ютерного моделювання. Імітаційні комп’ютерні моделі зазвичай створюються з застосуванням явного алгоритму Ейлера, який має певні недоліки, такі як накопичення помилок та відсутність чіткого критерію їх виникнення. В роботі [15] отримані обнадійливі результати щодо перевірки коректності процедури синтезу штучної зарядної довгої лінії за допомогою саме такої імітаційної комп’ютерної моделі. Виходячи з цього, важливими і на часі є питання застосування неявного алгоритму Ейлера для побудови імітаційних комп’ютерних моделей штучних довгих ліній як загалом, так і для штучної зарядної лінії дослідженої в [15].

В даній роботі зроблена спроба вирішити ці нагальні потреби.

Мета статті

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу імітаційної комп’ютерної моделі отриманої в [15] з застосуванням явного алгоритму Ейлера з моделлю на основі неявного алгоритму Ейлера, який автори прагнуть розробити в цій роботі. Цей порівняльний аналіз надасть можливість перевірити коректності раніше зроблених висновків і визначити подальші перспективи застосування цих імітаційних моделей.

Для досягнення поставленої мети розв’язуються наступні наукові задачі:

- розробка імітаційної комп’ютерної моделі на основі неявного алгоритму Ейлера для штучної зарядної довгої лінії типу С наведеної в [15];
- проведення порівняльного аналізу двох імітаційних моделей з різними алгоритмами Ейлера та формування висновку щодо коректності умов та результатів отриманих в [15];
- формулювання пропозицій щодо подальшого використання розроблених імітаційних моделей при проведенні досліджень штучних зарядних довгих ліній. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Виклад основного матеріалу

Методика дослідження

Виходячи з недоліків застосування аналітичних методів дослідження та проведення натурного експерименту, автори вважають за доцільне використовувати для дослідженні процесів в штучній зарядній довгій лінії типу С підходи імітаційного комп’ютерного моделювання. Ці технології і складають основу проведених досліджень. В загальному випадку, імітаційне комп’ютерне моделювання є досить трудомісткий процес, особливо якщо об’єкт що вивчається є достатньо склад-

ним. Але об’єкт який досліджується в цій роботі є простим і вміщує в себе три базові елементи, такі як резистори, ємності та індуктивності. Тому послідовність кроків, які виконуються при побудові таких моделей, не є складною. Автори вже неодноразово використовували цей підхід і він в подробицях окреслений в [15].

Важливою відмінністю імітаційної комп’ютерної моделі що використовується в цій роботі є те, що вона базується на неявному алгоритмі Ейлера. В [15] для переходу від системи диференційних рівнянь до системи рівнянь різниці використовується явний алгоритм Ейлера що виглядає наступним чином:

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}, \tag{1}$$

де Δt є розмір кроку що вважається постійним.

В той самий час неявний алгоритм Ейлера, що використовується в цій роботі, є таким, як показано нижче [11]:

$$\frac{dx(t + \Delta t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}. \tag{2}$$

Тим не менш, невелика різниця між лівими частинами в (1) та (2) викликає суттєві відмінності як в структурах імітаційних моделей що на них базуються, так і в кінцевих результатах.

Опис об’єкту дослідження

Об’єктом дослідження в цій роботі виступає штучна зарядна довга лінія з п’яти елементів [15], що наведена на рис. 1.

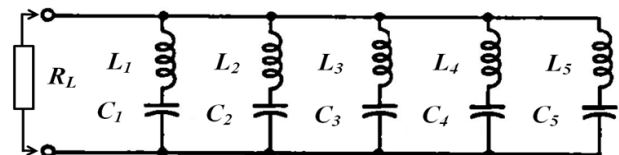


Рис. 1. Штучна зарядна довга лінія типу С з п’яти елементів

Штучна зарядна довга лінія з п’яти елементів зображена на рис.1 була синтезована з метою забезпечення тривалості імпульсу $\tau_{imp} = 10$ мкс при розряджанні лінії на узгодженому навантаженні $R_L = 100$ Ом [15].

В табл.1 представлені відносні значення ємності та індуктивності елементів зазначеної штучної зарядної довгої лінії для різних її каскадів.

Таблиця 1

Відносні значення ємності та індуктивності елементів штучної зарядної лінії типу С

Номер каскаду лінії	Значення ємності	Значенні індуктивності
1	0.4003	0.253
2	0.0416	0.270
3	0.0111	0,367
4	0,0038	0.547
5	0.0017	0.740

Для отримання абсолютних значень параметрів елементів потрібно відносно величину значення ємності помножити на $\tau_{\text{имп}}/R_L$ а відносно значення індуктивності на величину $\tau_{\text{имп}}R_L$. Зауважимо, що при узгодженому розряджанні лінії R_L дорівнює її характеристичному опору.

Не буде зайвим нагадати, що штучна зарядна довга лінія, як об'єкт дослідження є невід'ємною складовою частиною імпульсних модуляторів, які добре описані в літературних джерелах [1; 4; 12].

Комп'ютерна модель штучної зарядної довгої лінії типу С

Відправною точкою в розробці імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії, що наведена на рис.1, постає отримана раніше в [15] система диференціальних рівнянь наведена нижче:

Відправною точкою в розробці імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії, що наведена на рис.1, постає отримана раніше в [15] система диференціальних рівнянь наведена нижче:

$$i_{R_L}(t) = \sum_{i=1}^N i_{L_i}(t), \quad (3)$$

$$L_i \frac{di_{L_i}(t)}{dt} = v_{C_i}(t) - i_{R_L}(t)R_L, \quad (4)$$

$$C_i \frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = i_{L_i}(t), \quad (5)$$

де i відповідає номеру каскаду лінії від 1 до 5.

На відміну від попередніх досліджень, де використовувався прямий алгоритм Ейлера (1) для трансформації системи диференціальних рівнянь (3), (4) та (5) в систему рівнянь різниці в цій роботі використовується непрямий алгоритм Ейлера (2).

Проведемо процедуру синтезу імітаційної комп'ютерної моделі для штучної зарядної довгої лінії зображеної на рис.1 з використанням неявного алгоритму Ейлера.

По-перше, потрібно замінити в (3), (4) та (5) змінну часу t на $(t+\Delta t)$. В результаті ми отримуємо наступні вирази:

$$i_{R_L}(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^N i_{L_i}(t + \Delta t), \quad (6)$$

$$L_i \frac{di_{L_i}(t + \Delta t)}{dt} = v_{C_i}(t + \Delta t) - i_{R_L}(t + \Delta t)R_L, \quad (7)$$

$$C_i \frac{dv_{C_i}(t + \Delta t)}{dt} = i_{L_i}(t + \Delta t). \quad (8)$$

По-друге, підставимо в (7) та (8) в ліву частину замість похідних їх приблизні значення

згідно з (2). В результаті приходимо до системи рівнянь яка виглядає як:

$$L_i \frac{i_{L_i}(t + \Delta t) - i_{L_i}(t)}{\Delta t} = v_{C_i}(t + \Delta t) - i_{R_L}(t + \Delta t)R_L, \quad (9)$$

$$C_i \frac{v_{C_i}(t + \Delta t) - v_{C_i}(t)}{\Delta t} = i_{L_i}(t + \Delta t). \quad (10)$$

Наступним кроком, перетворимо рівняння (9) та (10) таким шляхом, щоб всі змінні з часом $(t+\Delta t)$ розміщуються упорядкованим чином на лівій стороні кожного рівняння, в той час як ті, що з часом t – на правій. Після виконання цієї процедури приходимо до наступних виразів:

$$i_{L_i}(t + \Delta t) - \frac{\Delta t}{L_i} v_{C_i}(t + \Delta t) + \frac{\Delta t R_L}{L_i} i_{R_L}(t + \Delta t) = i_{L_i}(t), \quad (11)$$

$$-\frac{\Delta t}{C_i} i_{L_i}(t + \Delta t) + v_{C_i}(t + \Delta t) = v_{C_i}(t). \quad (12)$$

На останньому етапі, заміняємо в (11) та (12) $(t+\Delta t)$ на $(n+1)$ і t на n , щоб завершити перехід від безперервного до дискретного часу. Після цього отримуємо

$$i_{L_i}(n+1) - \frac{\Delta t}{L_i} v_{C_i}(n+1) + \frac{\Delta t R_L}{L_i} i_{R_L}(n+1) = i_{L_i}(n), \quad (13)$$

$$-\frac{\Delta t}{C_i} i_{L_i}(n+1) + v_{C_i}(n+1) = v_{C_i}(n), \quad (14)$$

$$i_{R_L}(n+1) = \sum_{i=1}^N i_{L_i}(n+1). \quad (15)$$

Співвідношення (13) та (14) є взаємопов'язаними як для $v_{C_i}(n)$ та $i_{L_i}(n)$ з одним індексом, так і для цих змінних з іншими індексами через $i_{R_L}(n)$, яке згідно з (6) є сумою всіх інших струмів $i_{L_i}(n)$ в котушках. Виходячи з цього, всі рівняння (13) та (14) для різних індексів потрібно вирішувати відносно $i_{L_i}(n)$ та $v_{C_i}(n)$ разом; найкраще це зробити при представленні їх в матричній формі. Матричний вираз рівнянь (13) та (14) з усіма індексами i буде мати наступний вигляд:

$$\mathbf{B}\mathbf{a}(n+1) = \mathbf{a}(n), \quad (16)$$

де: \mathbf{B} – квадратна матриця, що складається з формул що пов'язані з параметрами штучної зарядної довгої лінії, з числом стовбців та строк що дорівнює подвійному числу елементів в лінії – N ; $\mathbf{a}(n)$ та

$\mathbf{a}(n+1)$ – вектори розмірністю $2N$, що вміщують напруги на конденсаторах та струми в котушках індуктивності в дискретний відлік часу, відповідно, n and $(n+1)$.

Для винайдення значень напруги та струму на всіх конденсаторах та котушках штучної зарядної довгої лінії на наступній ітерації $(n+1)$,

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \left(1 + \frac{\Delta t R_L}{L_1}\right) & -\frac{\Delta t}{L_1} & \frac{\Delta t R_L}{L_1} & 0 & \frac{\Delta t R_L}{L_1} & 0 \\ -\frac{\Delta t}{C_1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta t R_L}{L_2} & 0 & \left(1 + \frac{\Delta t R_L}{L_2}\right) & -\frac{\Delta t}{L_2} & \frac{\Delta t R_L}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{C_2} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta t R_L}{L_3} & 0 & \frac{\Delta t R_L}{L_3} & 0 & \left(1 + \frac{\Delta t R_L}{L_3}\right) & -\frac{\Delta t}{L_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{C_3} & 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{a}^T(n) = (i_{L1}(n), v_{C1}(n), i_{L2}(n), v_{C2}(n), i_{L3}(n), v_{C3}(n)), \quad (18)$$

$$\mathbf{a}^T(n+1) = (i_{L1}(n+1), v_{C1}(n+1), i_{L2}(n+1), v_{C2}(n+1), i_{L3}(n+1), v_{C3}(n+1)). \quad (19)$$

По своїй суті, (13), (14) та (15) являють собою імітаційну комп'ютерну модель штучної зарядної довгої лінії на рис.1 з використанням неявного алгоритму Ейлера в формі рівнянь, в той час як (16), (17), (18) та (19) ту ж саму модель – в матричному вигляді.

При проведенні досліджень в цій роботі буде проводитися порівняння розробленої вище моделі з тією, що була опрацьована в [15] і наведена нижче

$$i_{R_L}(n) = \sum_{k=i}^N i_{L_k}(n), \quad (20)$$

$$i_{L_i}(n+1) = i_{L_i}(n) + \frac{\Delta t}{L_i} v_{C_i}(n) - \frac{\Delta t}{L_i} i_{R_L}(n) R_L, \quad (21)$$

$$v_{C_i}(n+1) = v_{C_i}(n) + \frac{\Delta t}{C_i} i_{L_i}(n). \quad (22)$$

Після розробки імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії перейдемо до її випробування.

матричне рівняння (16) вирішується на кожній ітерації відносно $\mathbf{a}(n+1)$ виходячи з відомих \mathbf{B} та $\mathbf{a}(n)$.

Проілюструємо, як виглядають матриця \mathbf{B} та вектори $\mathbf{a}(n)$ та $\mathbf{a}(n+1)$ у випадку штучної зарядної довгої лінії з трьома елементами

Випробування імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії типу С на основі неявного алгоритму Ейлера.

Імітаційна комп'ютерна модель згідно з (13), (14), (15) та (16) була реалізовано в середовищі Matlab, яке вважається найбільш зручним для використання в імітаційному комп'ютерному моделюванні.

Моделювання відбувалося відповідно до наступного сценарію:

- Описана штучна зарядна довга лінія з визначеними вище параметрами вважалася попередньо зарядженою до напруги 10 В.
- Розрядження лінії відбувалося на узгодженому навантаженні 100 Ом.
- Оцінювалися форма імпульсу на навантаженні для імітаційної комп'ютерної моделі лінії побудованої з використанням явного алгоритму Ейлера (моделі розробленої раніше у вигляді (20), (21), (22)), неявного алгоритму Ейлера (моделі побудованої в цій роботі у вигляді (13), (14), (15)), та ці форми імпульсу порівнювалися з тією, що закладалася при синтезі штучної зарядної довгої лінії на рис. 1.

На рис. 2 наведено результати імітаційного комп'ютерного моделювання з застосуванням явного і неявного алгоритмів Ейлера для наведених вище умов у порівнянні з формою імпульсу для якого здійснювався синтез штучної довгої лінії зображеної на рис. 1.

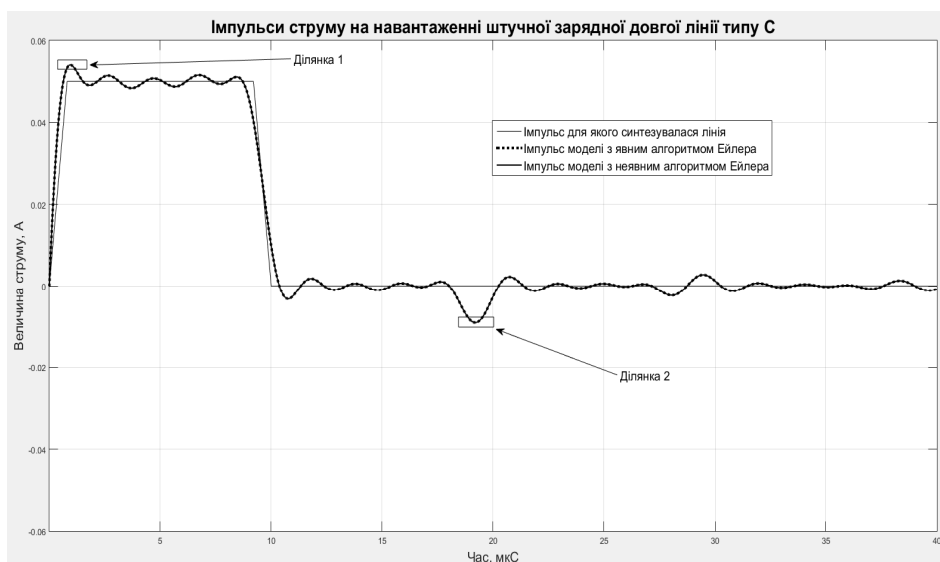


Рис. 2. Імпульси струму на навантаженні штучної довгої лінії

Порівняння двох імітаційних комп'ютерних моделей дозволяє припустити, що обидві моделі забезпечують приблизно однакову точність обчислень. З цього факту випливає той висновок, що в роботі [15] було зроблено коректні висновки щодо коректності проведеного аналізу процедури синтезу штучної зарядної довгої лінії і імітаційна комп'ютерна модель побудована на основі явного алгоритму Ейлера довела свою коректність і працездатність.

Окремого вивчення потребує питання чи накопичує імітаційна комп'ютерна модель на основі явного алгоритму Ейлера помилки, як стверджують джерела інформації [11]. Для цього на рис.3 та рис. 4 наведено у збільшеному масштабі криві для обох імітаційних моделей для ділянок 1 та 2 на рис. 2. Як впливає з аналізу кривих на рис. 3 та рис. 4, між імітаційними моделями дійсно існує різниця, яка не проглядається на рис. 2. До того ж,

при прискіпливому аналізі виявляється, що різниця між імітаційними моделями для ділянки 1, яка складає $3.0 \cdot 10^{-6}$ А, є дещо меншою ніж для ділянки 2, яка дорівнює $5.0 \cdot 10^{-6}$ А. Вказані результати дозволяють прийти до важливого висновку, що імітаційна комп'ютерна модель на основі явного алгоритму дійсно накопичує помилки, але при визначеному кроці налаштування це накопичення не є суттєвим.

Також при проведенні імітаційного комп'ютерного моделювання своє підтвердження знайшов той висновок, зроблений в [15], що процедура синтезу яка піддавалась аналізу в роботі [15] має певні недоліки пов'язані з тим, що припущення зроблені при синтезі лінії є не зовсім коректними. Це підтверджується тим, що на рис. 2 наочними є відмінності форми імпульсу струму обох імітаційних моделей від тієї форми яка закладалася при синтезі.

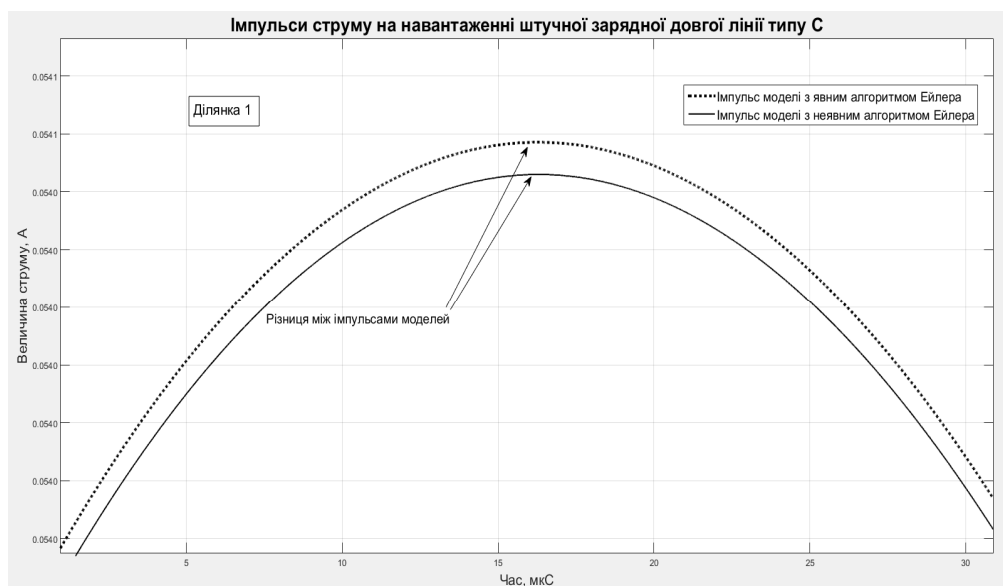


Рис. 3. Імпульси струму на навантаженні штучної довгої лінії для ділянки 1 у збільшеному масштабі

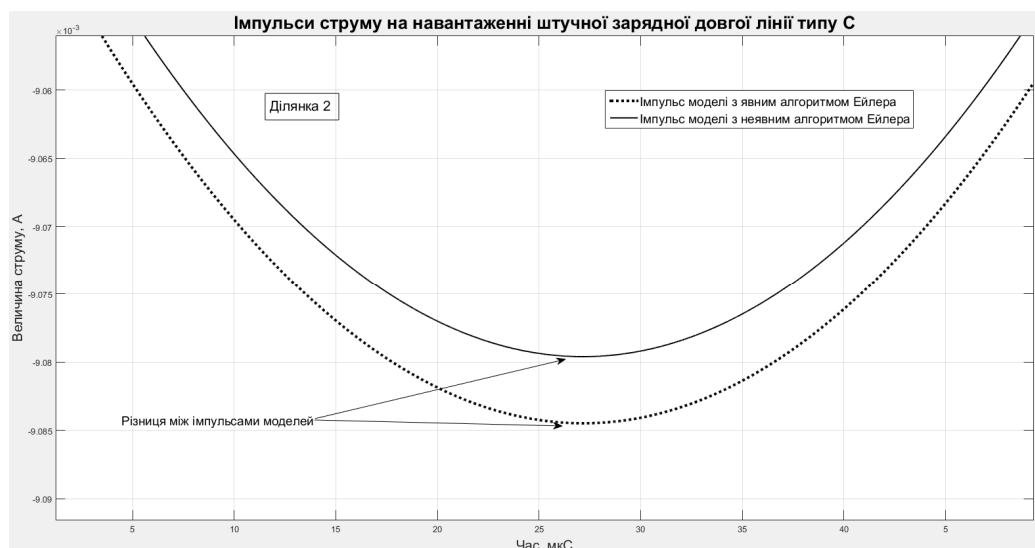


Рис. 4. Імпульси струму на навантаженні штучної довгої лінії для ділянки 2 у збільшеному масштабі

Висновки

В роботі розглянуто використання неявного алгоритму Ейлера для синтезу імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії типу С. Проведений порівняльний аналіз імітаційної комп'ютерної моделі розробленої в цій роботі на основі неявного алгоритму Ейлера та імітаційної комп'ютерної моделі на основі явного алгоритму Ейлера, що була розроблена в попередніх дослідженнях, дозволяє стверджувати, що обидві моделі мають приблизно однакову точність. Тим не менш, при близькому погляді виявляється, що імітаційна комп'ютерна модель на основі явного алгоритму Ейлера дійсно накопичує помилки, хоча при вибраному кроці налаштування вони є несуттєвими.

Головним висновком є те, що заключення щодо коректності процедури синтезу штучної зарядної довгої лінії зроблене в [15] є коректним.

Синтезована імітаційна комп'ютерна модель на основі неявного алгоритму Ейлера може застосовуватися для дослідження параметрів штучних довгих ліній з метою їх удосконалення та модернізації.

Автори вважають, що напрямком подальших досліджень може бути винайдення критеріїв існування ситуацій, в яких імітаційна комп'ютерна на основі явного алгоритму Ейлера критично починає накопичувати помилки. При цьому розроблена імітаційна комп'ютерна модель на основі неявного алгоритму Ейлера буде використовуватися для перевірки рівня помилок.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Wolff C., Radar Modulator, 2021. URL: <http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Radar%20Modulator.en.html> (eng).

- [2] Handbook of RF and Microwave Power Amplifiers. Ed. J. Walker, Cambridge University Press, Cambridge UK, 2012 (eng).
- [3] Eroglu A., Introduction to RF Power Amplifier Design and Simulation. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. doi.org/10.1201/b18677 (eng).
- [4] Ness Engineering Inc., Pulse Forming Network Equations and Calculator, 2021, <http://www.nessengr.com/technical-data/pulse-forming-network-pfn-equations-and-calculator/#TypeB> (eng).
- [5] Radar Handbook, 3rd ed., Ed. in Chief M. I. Skolnik, McGraw-Hill Companies, NY, 2008 (eng).
- [6] Barton D. K., Radar Equations for Modern Radar, Artech House, MA, 2013 (eng).
- [7] Radio Frequency and Microwave Power Amplifiers. Volume 1: Principles, Device Modeling and Matching Networks. Ed. A. Grebennikov. The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2019 (eng).
- [8] Radio Frequency and Microwave Power Amplifiers. Volume 2: Efficiency and Linearity Enhancement Techniques. Ed. A. Grebennikov. The Institution of Engineering and Technology, London UK, 2019 (eng).
- [9] Kazimierczuk M. K., RF Power Amplifiers, Wiley, Chichester UK, 2008 (eng).
- [10] Frenzel Jr. L. E., Principles of electronic communication systems, 4th ed., McGraw-Hill Education, New York, NY, 2016 (eng).
- [11] McC. Siebert W., Circuits, Signals, and Systems, Cambridge, McGraw-Hill Book Company, MA, 1986. doi.org/10.7551/mitpress/1839.001.0001 (eng).
- [12] Pulse Generators, Ed. G. Glasoe. McGraw-Hill Book Company, NY, 1948 (eng).
- [13] Pliushch O., "Gradient Signal Processing Algorithm for Adaptive Antenna Arrays Obviating Reference Signal Presence," presented at the IEEE International Scientific-Practical Confer-

ence PIC S&T, Kyiv, Ukraine, October 8–11, 2019, Paper 190. doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061536 (eng).

- [14] Pliushch O., Vyshnivskiy V., Toliupa S., Rybyda-jlo A. "Utilization of Clipper Circuits to Improve Efficiency of the Gradient Signal Processing Algorithm for Adaptive Antenna Arrays" // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory

(IEEE ATIT 2019). Kyiv, Ukraine, December 18–20, 2019. Paper 71. doi.org/10.1109/ATIT49449.2019.9030529 (eng).

- [15] Плющ О. Г., Савченко А. С. Комп'ютерна модель для оцінки коректності процедури синтезу штучної довгої лінії. Наукоємні технології, 2021, № 4(52), С. 348–356. doi.org/10.18372/2310-5461.52.16382

**Плющ О. Г., Савченко А. С., Нечипорук О. П.
КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ШТУЧНОЇ ЗАРЯДНОЇ ДОВГОЇ ЛІНІЇ ТИПУ
С НА ОСНОВІ НЕЯВНОГО АЛГОРИТМУ ЕЙЛЕРА**

В роботі аналізуються процеси що відбуваються в штучних зарядних довгих лініях типу С. Вивчення цих процесів проводиться з використанням імітаційного комп'ютерного моделювання. Запропоновано використовувати при побудові моделі штучної зарядної довгої лінії неявний алгоритм Ейлера. Відповідно до цього, була створена імітаційна комп'ютерна модель цієї лінії. Проведено порівняльний аналіз характеристик імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії на основі неявного алгоритму Ейлера з характеристиками тією моделі, що була отримана з використанням явного алгоритму Ейлера. Цей аналіз продемонстрував, що для об'єкта дослідження у вигляді штучної зарядної довгої лінії типу С для вибраних умов моделювання обидві моделі показують майже однакову точність представлення сигналів в лінії. Це спостереження дало змогу упевнитися, що зроблені в попередніх дослідженнях висновки щодо коректності процедури проведення синтезу штучної зарядної довгої лінії типу С є обґрунтованими. При вивченні результатів випробування двох моделей штучної зарядної довгої лінії у значно збільшеному масштабі було встановлено, що імітаційна комп'ютерна модель побудована на основі явного алгоритму Ейлера дійсно має схильність накопичувати помилки, що підтверджує висновки відомі з літературних джерел. Тим не менш, потрібно зауважити що при малому кроці налаштування моделі, що має місце в проведених дослідженнях, накопичення помилок в імітаційній комп'ютерній моделі на основі явного алгоритму Ейлера є несуттєвим. Розроблена імітаційна комп'ютерна модель на основі неявного алгоритму Ейлера може використовуватися в наукових дослідженнях двома основними шляхами. Перший шлях полягає в її застосуванні для встановлення коректності роботи інших імітаційних моделей, таких як модель на основі явного алгоритму Ейлера. Другий шлях складається з самостійного використання цієї моделі для ситуацій, в яких потрібно забезпечувати мінімальність помилок при проведенні випробувань штучних зарядних довгих ліній методами імітаційного комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: імпульсний модулятор; штучна зарядна довга лінія; імітаційна комп'ютерна модель; неявний алгоритм Ейлера.

**Pliushch O., Savchenko A., Nechyporuk O.
TYPE-C PULSE-FORMING NETWORK COMPUTER MODEL ON THE BASIS OF IMPLICIT
EULER ALGORITHM**

This paper analyzes processes that take place in the type-C pulse-forming networks. Studying of this processes is carried out with use of computer simulation modelling. It is proposed to use implicit Euler algorithm in the pulse-forming network model design. Accordingly, computer simulation model of this pulse-forming network was created. Comparative analysis of the performance of the pulse-forming network computer model based on implicit Euler algorithm with the performance of the model that was developed with use of explicit Euler algorithm was done. This analysis demonstrated that for the research object in the form of type-C pulse forming network for the chosen modelling conditions, both models exhibit almost identical precision of the pulse-forming network signals representation. This observation allowed one to make certain

that the inferences concerning the correctness of the procedure of the type-C pulse-forming network synthesis made in the previous research are grounded. While studying the results of the two pulse-forming networks models trials in a greatly enlarged scale, it was established that computer simulation model based on explicit Euler algorithm does have a tendency to accumulate errors, what corroborates the inferences known from literature sources. Nevertheless, it is necessary to stress that for a small modelling increment, what is the case in the performed study, error accumulation in the computer simulation model based on the explicit Euler algorithm is insignificant. Designed computer simulation model based on implicit Euler algorithm can be used in scientific research in two major ways. The first way is in its use for other simulation models correctness verification, such as the model based on explicit Euler algorithm. Another way envisions the independent use of this model for the situations in which there is a necessity to secure minimum of errors while performing research of the pulse-forming network with help of the computer simulation modelling.

Key words: pulse modulator; pulse-forming network; computer simulation model; implicit Euler algorithm.

Стаття надійшла до редакції 18.08.2022 р.

Прийнято до друку 12.09.2022 р.