

ЕЛЕКТРОНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

DOI: 10.18372/2310-5461.52.16382

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

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ КОРЕКТНОСТІ ПРОЦЕДУРИ СИНТЕЗУ ШТУЧНОЇ ДОВГОЇ ЛІНІЇ

Вступ

Штучні довгі лінії відіграють велику роль у радіотехнічних пристроях. Наприклад, вони виступають як важливі елементи в імпульсних модуляторах підсилювачів потужності передавачів або автогенераторів. У цих пристроях вони значною мірою визначають параметри радіочастотних імпульсів які формуються. Зазначені модулятори широко використовуються як складові частини імпульсних радіолокаторів, або як радіоелементи обладнання теоретичної фізики.

Основна проблема, що постає при розробці імпульсного модулятора є отримання необхідної форми імпульсу на виході цього пристрою. Є загально прийнятим під формою імпульсу розуміти залежність величини цього імпульсу від часу. Імпульс струму ідеальної прямокутної форми є необхідним для підсилювача потужності або генератора, таких як клістрон або магнетрон, для запобігання відхилень частоти або фази вихідного радіосигналу.

В теорії, ця прямокутна форма імпульсу може бути отримана з використанням природної лінії передачі або довгої лінії. Як показує практика застосування зазначених пристроїв, цей підхід не є тим, що може бути реалізовано в реальних пристроях виходячи з цілого ряду причин, з яких однією з основних є та, що лінія стає занадто довгою.

Як результат, у потужних модуляторах використовуються виключно штучні довгі лінії.

Розробка штучної довгої лінії що має характеристики подібні до тих, що має природна довга лінія, постає як математична проблема синтезу.

Як і очікується, ніяка лінія з обмеженим числом елементів не може точно імітувати природню лінію передачі. Це впливає з того що перша має зосереджені параметри, у той час як друга — розподілені. В міру того, як кількість елементів для певного типу лінії зростатиме, ступень імітування буде покращуватися. Може так статися, що, однак, синтезована довга лінія створює імпульс який є доброю апроксимацією прямокутного імпульсу тільки на частині тривалості імпульсу.

Це потрібно мати на увазі, і тому властивості довгої лінії синтезованої за допомогою формальних математичних методів повинні бути прискіпливо досліджені для визначення того, як точно синтезована лінія апроксимує природню довгу лінію.

Надзвичайно важливим припущенням при синтезі штучної довгої лінії є те, що синтез виконується для довгої лінії, що розряджається, на короткозамкнене навантаження (нульовий опір), у той час як працювати ця лінія буде при розряді через узгоджене навантаження.

У цьому випадку потрібен надійний інструмент для оцінки того впливу на форму імпульсу, який створює ця заміна навантаження.

Штучні довгі лінії можуть будуватися як однорідні, коли параметри ємностей та індуктивностей в каскадах є однакові й неоднорідні, коли ці значення змінюються від одного каскаду до іншого достатньо суттєво. Для зазначеної процедури синтезу використовуються виключно неоднорідні штучні лінії, що зумовлено їх певними перевагами.

Водночас, використання аналітичних методів для оцінки форми імпульсу на виході синтезованої неоднорідної штучної лінії є надзвичайно складним.

Виходячи з зазначеного, в статті пропонується використовувати комп'ютерну модель синтезованої штучної неоднорідної лінії для оцінки форми сигналу при її розрядженні через різні значення навантажені і, що є більш важливим, оцінки коректності зроблених в процесі синтезу припущень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Використання імпульсних модуляторів для формування потужних радіочастотних сигналів системно викладено в працях [1; 2; 3]. У праці [1] наведено структуру імпульсного модулятора включаючи штучну довгу лінію та окреслено основні процеси що відбуваються в модуляторі при заряді і розряді цієї лінії. Водночас, праці [2; 3] окреслюють область використання імпульсних модуляторів у радіочастотних та СВЧ підсилювачах потужності. Але в цих роботах не розглядаються підходи до синтезу штучних довгих ліній та не вивчаються ті лінії, що є неоднорідними.

Джерело [4] надає детальну класифікацію штучних довгих ліній, наводить їх параметри та приводить результати фізичних випробувань зразків, які можуть бути використані в реальних пристроях. Водночас, це джерело не наводить відомостей про те, яким чином були синтезовані лінії, та яким чином були отримані значення їх елементів.

Праці [5; 6] надають змістовну інформацію про використання імпульсних модуляторів у галузі радіолокації і виокремлюють те, яким чином їх параметри впливають на стабільність параметрів радіолокаторів. Недоліком цих робіт є те, що в них не надаються відомості про синтез потрібних штучних довгих ліній, і про те, як перевірити їх параметри без виготовлення фізичних зразків обладнання.

Джерела [7; 8; 9] містять достатньо змістовний огляд різних підходів та технологій, що використовуються в підсилювачах потужності на радіочастоті, і в яких імпульсні модулятори відіграють важливу роль. У той же час, достатньої уваги аналізу штучних довгих ліній у цих роботах не надано і підходи до оцінки їх параметрів методами комп'ютерного моделювання не розглядаються.

Робота [10] вигідно відрізняється від попередніх тим, що в ній проаналізовано параметри натуральної довгої лінії і показано яким чином можливо створити перехід від натуральної лінії до штучної лінії заміняючи розподілені парамет-

ри на зосереджені. У цій роботі, тим не менш, не розглядаються неоднорідні довгі лінії і не окреслено підходи до оцінки їх параметрів методами комп'ютерного моделювання.

Автори праці [11] детально висвітлюють яким чином можливо створити модель електричного ланцюга, що складається з типових радіоелементів та наводять співвідношення між струмом та напругою для цих типових елементів. Хоча в цій роботі представлені багато прикладів створення моделей систем, її недоліком є те що ці приклади не стосуються штучних довгих ліній, які використовуються в імпульсних модуляторах.

Праця [12] не тільки визначає різні типи штучних довгих ліній, що застосовуються в імпульсних модуляторах, а і наводить детальну процедуру синтезу неоднорідних штучних ліній для отримання певної форми вихідного імпульсу. Проблемами цього джерела є те, що не вирішено питання отримання простої оцінки форми вихідного сигналу в часовій області та не опрацьовано яким чином можливо оцінити погіршення цієї форми за рахунок припущень зроблених при проведенні синтезу.

У радіотехніці все більше використовується імітаційне комп'ютерне моделювання [13, 14]. Виходячи з огляду джерел та їх недоліків, у статті пропонується використовувати комп'ютерну модель штучної довгої лінії для розв'язання проблем отримання опису форми вихідного імпульсу неоднорідної лінії в часовій області та, особливо, виявлення ступені погіршення характеристик цього імпульсу за рахунок припущень зроблених під час її синтезу.

Постановка завдання

Імпульсні модулятори широко використовуються в радіотехнічних застосуваннях. Вони є джерелом живлення для підсилювачів потужності та автогенераторів. Штучні довгі лінії є невід'ємною та значущою складовою цих модуляторів. З аналізу літературних джерел випливає, що в поточний час неоднорідні штучні довгі лінії розробляються, використовуючи процедуру синтезу, у якій потрібна форма імпульсу виступає як вихідна або початкова характеристика. До того ж, для спрощення розрахунків, у процесі синтезу робляться припущення які потребують спеціальної перевірки.

Як вбачається з літературних джерел, методів проведення цієї перевірки не розроблено, що знижає ефективність процедури синтезу. Додатково треба зазначити, що не існує простих аналітичних методів отримання форми сигналу на виході штучної довгої лінії в часовій області, незважаючи на те що ця форма виказує великий

вплив на параметри підсилювача потужності або автогенератора. Як результат, виникає необхідність отримання простого та ефективного методу оцінки форми вихідного сигналу та впливу припущень зроблених при проведенні процедури синтезу.

У цій статті зроблена спроба вирішити це нагальне завдання.

Мета статті

Метою роботи є дослідження форми сигналу на виході штучної довгої лінії при різних навантаженнях та перевірка впливу зроблених припущень шляхом комп'ютерного моделювання.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі наукові завдання:

- розробка комп'ютерної моделі неоднорідної довгої лінії;
- перевірка коректності розробленої моделі шляхом її випробування в простих задалегідь відомих ситуаціях;
- перевірка коректності припущень що робляться при проведенні синтезу неоднорідної довгої лінії та дослідження погіршення характеристик вихідного імпульсу які при цьому виникають.

Виклад основного матеріалу

Методика дослідження

У статті пропонується використовувати методи імітаційного комп'ютерного моделювання для дослідженні процесів у неоднорідній довгій лінії. Цей підхід і складає основу методики дослідження.

Загалом створення комп'ютерної моделі штучної довгої лінії, що містить в собі три типи елементів — резистори, ємності та індуктивності — складається з процедур наведених нижче. По-перше, записуються співвідношення між струмами та напругою для зазначених типів радіоелементів. Ці співвідношення для резистора, конденсатора та котушки індуктивності мають наступний вигляд [11]:

$$v(t) = Ri(t), \quad (1)$$

$$i(t) = C \frac{dv}{dt}, \text{ або } i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}, \text{ або}$$

$$v(t) - v(0) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}, \text{ або}$$

$$i(t) - i(0) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Зазначені співвідношення для активного резистору позначені як (1), у той час як ці вирази

для конденсатору представлені у виразі (2) а для котушки індуктивності у виразі (3) відповідно.

По-друге, математичні моделі електричних систем що складаються з L , C та R елементів можуть бути отримані з системним використанням таких двох кроків [11]:

1. Записуються відповідні звичайні диференціальні рівняння першого порядку для кожного з елементів що зберігає енергію (ємність або індуктивність). Динамічними змінними в цих диференціальних рівняннях першого порядку будуть або напруга $v_C(t)$ (для ємності), або струм $i_L(t)$ (для індуктивності).

2. Використовуються закони Кірхгофа (Kirchhoff) для представлення невідомих напруг та струмів через або динамічні змінні пов'язані з елементами що запасають енергію ($v_C(t)$ або $i_L(t)$), або через ті, що є джерелами енергії (джерела напруги або струму).

Застосування двох зазначених вище кроків дозволяє отримати систему диференціальних рівнянь, що і буде представляти математичну модель системи.

По-третє, для випробувань моделі за допомогою комп'ютеру треба в розробленій математичній моделі перейти від безперервного часу у системі диференціальних рівнянь до дискретного часу в системі різницевих рівнянь. Для досягнення цієї мети потрібно замінити всі похідні у математичній моделі на формули, що містять різниці. Одним з можливих підходів до вирішення цієї задачі є використання формули, що відома як прямий алгоритм Ейлера і має такий вигляд:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}, \quad (4)$$

де Δt є розмір кроку що вважається постійним.

Розглянуті кроки створення комп'ютерної моделі будуть у подальшому використані для побудови імітаційної комп'ютерної моделі штучної довгої лінії.

Опис об'єкту дослідження

Як уже зазначалося вище, об'єктом дослідження в роботі постають неоднорідні довгі лінії, що є невід'ємною частиною імпульсних модуляторів. Для з'ясування ролі, що відіграє довга лінія в цьому пристрої, розглянемо функціональну схему типового імпульсного модулятора, що зображена на рис. 1 [1].

Імпульсний модулятор з застосуванням тиратрону (рис. 1) є найбільш розповсюдженим для застосувань у радіолокаторах та інших приладах. Ключовим компонентом цього пристрою постає штучна довга лінія, що є тим елементом який зберігає енергію для подальшого використання. Саме ця лінія визначає параметри, такі як форму та тривалість, вихідного імпульсу модулятора.

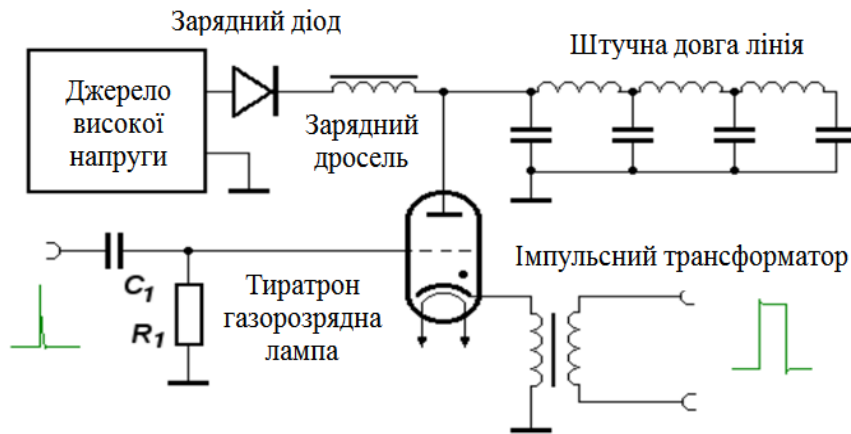


Рис. 1. Імпульсний модулятор з тиратроном та штучною довгою лінією

Добре відомими є процеси в такому модуляторі. Штучна довга лінія повільно заряджається через зарядний діод та зарядний дросель від джерела високої напруги, а потім швидко розряджається через імпульсний трансформатор та тиратрон. Тиратрон відкривається за рахунок імпульсу запуску що надходить на його сітку.

За рахунок зарядного дроселю лінія заряджається до подвійної напруги джерела живлення; цей дросель також обмежує зарядний струм, і не дозволяє струму від джерела високої напруги протікати через відкритий тиратрон при формуванні імпульсу. Зарядний діод дозволяє упередити лінію від розряджання і, таким чином, фіксує максимальну напругу на лінії до появи імпульсу що запускає тиратрон. Зазвичай навантаження, що передається на первинну обмотку імпульсного трансформатора від генератора радіочастот, є потрібним чином узгодженим з хвильовим або характеристичним опором лінії; в цьому випадку імпульс напруги на первинній обмотці імпульсного трансформатора становить приблизно половину напруги первинного заряду лінії.

Найбільш важливим спостереженням процесів в імпульсному модуляторі (рис. 1) є те що тиратрон ініціює розряд штучної довгої лінії, але водночас форма та тривалість імпульсу визначаються виключно пасивними елементами лінії. Комутатор не має контролю над формою імпульсу взагалі.

Імпульс завершується тільки тоді, коли штучна довга лінія стає повністю розрядженою. Потрібно зауважити, що одним з недоліків такого стану речей є розтягнутий задній фронт імпульсу, і це висуває додаткові вимоги до лінії.

Процедура синтезу штучної довгої лінії

Однорідні штучні довгі лінії не дають змоги отримати імпульс на виході модулятора потрібної форми, тому для цього ефекту використовують неоднорідні штучні довгі лінії. Однією з найбільш поширених процедур є та, що наведена нижче [12]. По-перше, вибирають потрібну форму імпульсу на виході довгої лінії. Такою формою може бути та, що зображена на рис. 2; ця форма є у вигляді трапеції.

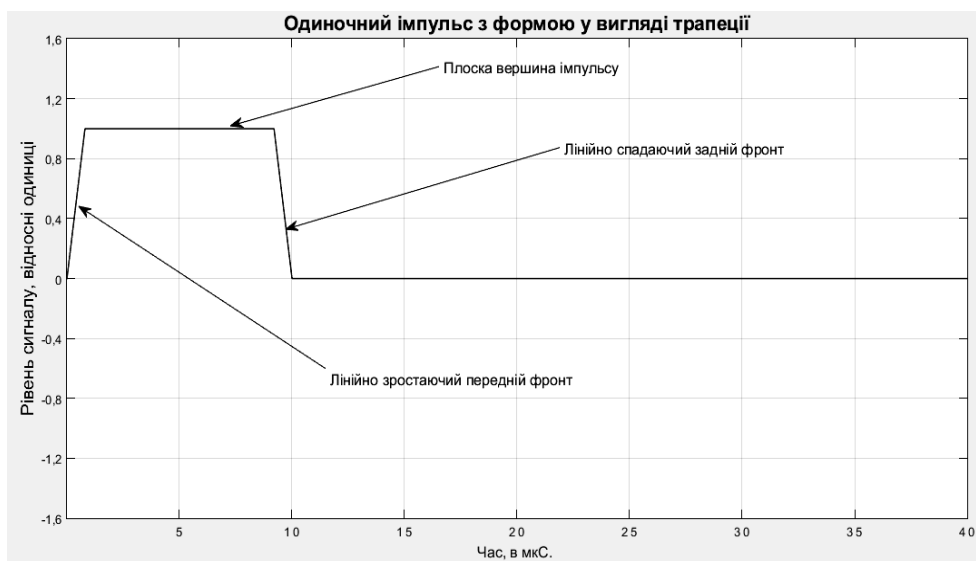


Рис. 2. Потрібна форма імпульсу у вигляді трапеції на виході довгої лінії

Математично зазначена форма описується так:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{t}{a\tau_{\text{имп}}} & \text{для } 0 \leq t \leq a\tau_{\text{имп}} \\ 1 & \text{для } a\tau_{\text{имп}} < t \leq \tau_{\text{имп}} - a\tau_{\text{имп}} \\ \frac{\tau_{\text{имп}} - t}{a\tau_{\text{имп}}} & \text{для } \tau_{\text{имп}} - a\tau_{\text{имп}} < t \leq \tau_{\text{имп}} \end{cases} \quad (5)$$

де a — тривалість переднього та заднього фронтів імпульсу представлена як частка від загальної тривалості імпульсу; $\tau_{\text{имп}}$ — загальна тривалість імпульсу.

На рис. 1 накреслено одиночний імпульс у вигляді трапеції згідно з виразом (5) для значення параметру $a = 0,08$ та тривалості імпульсу 10 мкс.

Цей імпульс називається *трапецією* тому, що він має плоску вершину та лінійно зростаючі та спадаючі фронти.

По-друге, виходячи з того, що імпульс постійного часу на рис. 1 має безперервне перетворення Фур'є, при синтезі неоднорідної штучної лінії робиться перехід від одиночного імпульсу до послідовності імпульсів, що зображено на рис. 3, і саме для цієї послідовності імпульсів здійснюється синтез штучної довгої лінії.

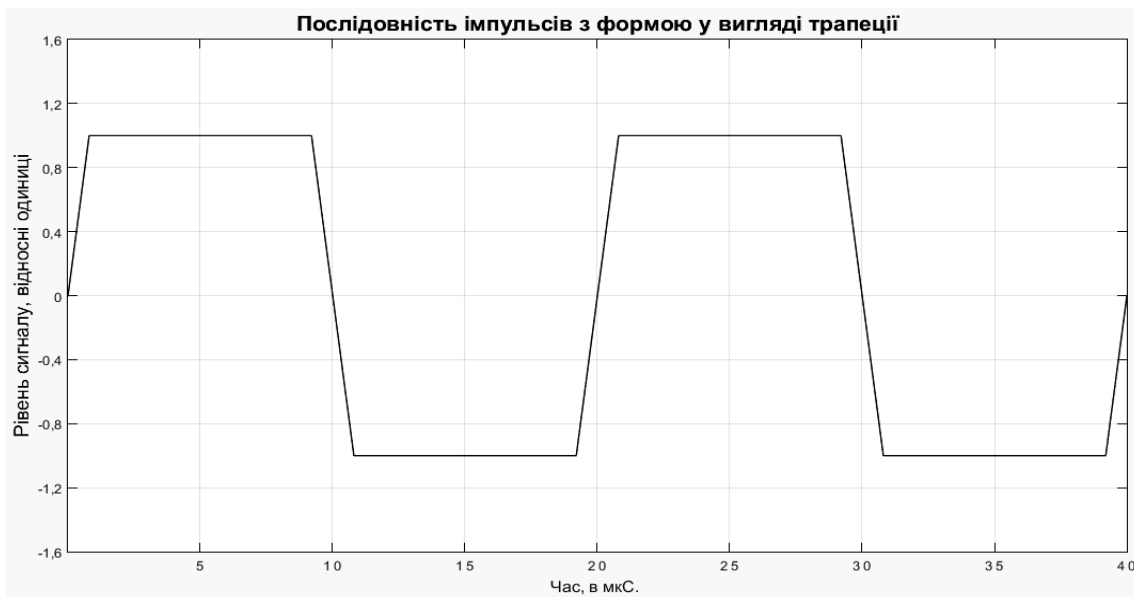


Рис. 3. Послідовність імпульсів у вигляді трапеції що використовується в процедурі синтезу

Потрібно зазначити, що послідовність прямокутних імпульсів у формі трапеції, показана на рис. 3, може виникати в тій довгій лінії, що розряджається на короткозамкнене навантаження, в той час як в дійсності штучна довга лінія розряджається на узгоджене навантаження. При цьому робиться припущення, що лінія синтезована для короткозамкненого навантаження буде створювати такий самий по формі (або майже такий) сигнал і на узгодженому навантаженні. Потрібно зазначити, що це припущення потребує ретельної перевірки.

По-третє, виконується розкладання послідовності імпульсів, наприклад у формі трапеції що

зображені на рис. 3, у ряд Фур'є. Після здійснення розкладання обмежуються першими декількома членами цього перетворення для синтезу неоднорідної штучної лінії, що забезпечує потрібну форму імпульсу.

Під час останнього етапу процедури синтезу, здійснюється синтез структури штучної довгої лінії у вигляді показаному на рис. 4. На цьому рисунку наведена схема лінії типу С з п'яти елементів у якій кожний з паралельних ланцюгів являє собою один з компонентів ряду Фур'є. Як тільки зроблена процедура синтезу штучної довгої лінії типу С, інші типи ліній можуть бути отримані, якщо мають еквівалентні характеристики.

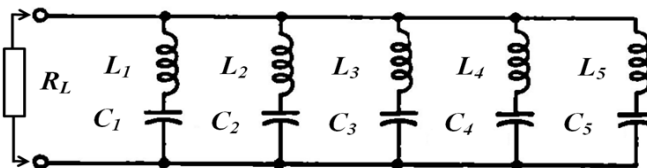


Рис. 4. Неоднорідна довга лінія з п'яти елементів, що втілює використання перших п'яти компонент перетворення Фур'є послідовності імпульсів на рис. 3

При використанні наведеної вище процедури вбачаються дві проблеми. Перша полягає в тому, що зроблене припущення стосовно переходу від одиночного імпульсу до послідовності імпульсів потребує ретельної перевірки. Також, потрібно мати інструмент для дослідження коректності синтезу неоднорідної штучної лінії навіть для послідовності імпульсів, що зображена на рис. 3. Особливо це стосується доцільності вибору певної кількості елементів ряду Фур'є.

У роботі пропонується вирішувати ці проблеми шляхом створення імітаційної комп'ютерної моделі для схеми наведеної на рис. 4 з наступним її випробуванням у різних ситуаціях.

Комп'ютерна модель неоднорідної штучної довгої лінії

Імітаційна комп'ютерна модель створюється за допомогою зазначеної вище процедури.

На першому кроці застосовуємо закони Кірхгофа до принципової схеми, що зображена на рис. 4. Використовуючи ці закони можливо отримати таку систему рівнянь:

$$I_{R_L} = \sum_{k=i}^N I_{L_i}; \quad (6)$$

$$V_{L_i} = -V_{R_L} + U_{C_i}; \quad (7)$$

$$I_{C_i} = -I_{L_i}, \quad (8)$$

де i позначає номер паралельної гілки на рис. 4; N є загальне число гілок.

Інші змінні у рівняннях (6), (7) та (8) є напругами та струмами в елементах штучної довгої лінії. Далі, з урахуванням виразів (1) та (2), система співвідношень (6), (7) та (8) може бути перетворена на наступну систему диференціальних рівнянь відносно динамічних змінних що пов'язані з елементами накопичення енергії (L та C):

$$i_{R_L}(t) = \sum_{k=i}^N i_{L_i}(t); \quad (9)$$

$$L_i \frac{di_i(t)}{dt} = v_{C_i}(t) - i_{R_L}(t)R_L; \quad (10)$$

$$C_i \frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = i_{L_i}(t). \quad (11)$$

Застосовуючи вираз (4) до (9), (10) та (11), стає можливим отримати систему різницевих рівнянь яка наведена нижче.

$$i_{R_L}(n) = \sum_{k=i}^N i_{L_i}(n); \quad (12)$$

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

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

Рекурентні формули (12), (13) та (14) являють собою комп'ютерну модель дискретного часу для неоднорідної штучної довгої лінії, що зображена на рис. 4. Ця модель може бути випробувана для різних значень параметрів C та L штучної довгої лінії, різної кількості елементів та різного значення навантаженні при розряджанні. З цього випливає, що вона може бути використана для вирішення тих проблем, що виникають при синтезі штучної довгої лінії яка формує імпульс потрібної форми, які були зазначені вище.

Перевірка розробленої моделі на неоднорідній штучній довгій лінії з 5 елементів

У праці [12] представлено процес синтезу неоднорідної штучної довгої лінії типу C (рис. 4) з п'яти елементів, що, як передбачається, буде створювати на навантаженні імпульс з формою у вигляді трапеції, що зображена на рис. 2. При цьому процес синтезу було проведено згідно з наведеною вище процедурою, з відповідним припущенням щодо еквівалентності процесу синтезу лінії для послідовності імпульсів до того процесу, що стосується одного імпульсу.

В табл. 1 представлені відносні значення ємностей та індуктивностей для параметру a у (5), що дорівнює 0,08. Для отримання дійсних значень параметрів елементів потрібно значення ємності помножити на $\tau_{\text{имп}}/R_L$ а значення індуктивностей на $\tau_{\text{имп}}R_L$.

Нагадаємо, що $\tau_{\text{имп}}$ позначає тривалість імпульсу що потрібно отримати, в той час як R_L дорівнює узгодженому навантаженню лінії і відповідно її характеристичному опорю.

Таблиця 1

Відносні значення ємностей та індуктивностей для отримання імпульсу у формі трапеції

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 вказаних даних, авторами була побудована модель з п'яти каскадів неоднорідної довгої лінії згідно з отриманими різницевиими рівняннями (12), (13) та (14). Модель будувалася для тривалості імпульсу 10 мкс та характеристичного опору лінії 100 Ом, з урахуванням відносних значень ємностей та індуктивностей з табл. 1.

На рис. 5 наведено задану для синтезу послідовність імпульсів, та ту послідовність імпульсів, що формує розроблена імітаційна комп'ютерна модель. У даному випадку модель описує синтезовану штучну довгу лінію, і вона працює на короткозамкнене (нульове) навантаження.

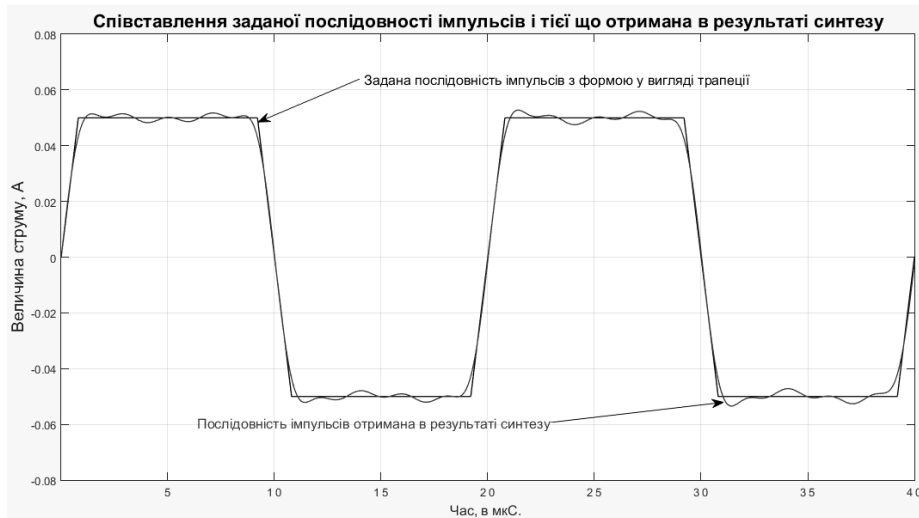


Рис. 5. Співставлення заданої для синтезу довгої лінії послідовності імпульсів та послідовності імпульсів отриманої за рахунок імітаційної комп'ютерної моделі, з короткозамкненим навантаженням

Порівняння двох кривих дозволяє стверджувати, що неоднорідна штучна довга лінія коректно представляє задану для синтезу послідовність імпульсів. Передній і задній фронти обох імпульсів повністю співпадають, у той час як флуктуації, що виникають на вершині, пояснюються тим, що було вибрано при синтезі тільки п'ять членів перетворення Фур'є.

Тепер потрібно перевірити як змінюється форма імпульсу коли розряд лінії відбувається на узгоджений опір 100 Ом. На рис. 6 наведено струм на активному навантаженні лінії при роз-

ряді неоднорідної штучної довгої лінії, та одиночний імпульс у формі трапеції який є вихідним в процедурі синтезу і зображений на рис. 2.

Аналіз кривих наведених на рис. 6 дозволяє стверджувати, що при розряді на узгоджене навантаження відбуваються спотворення імпульсу. Ці спотворення полягають в тому, що передній фронт імпульсу стає крутішим за заданий імпульс, в той час як задній фронт стає більш пологим.

До того ж на вершині імпульсу в передній його частині зростає переколювання.

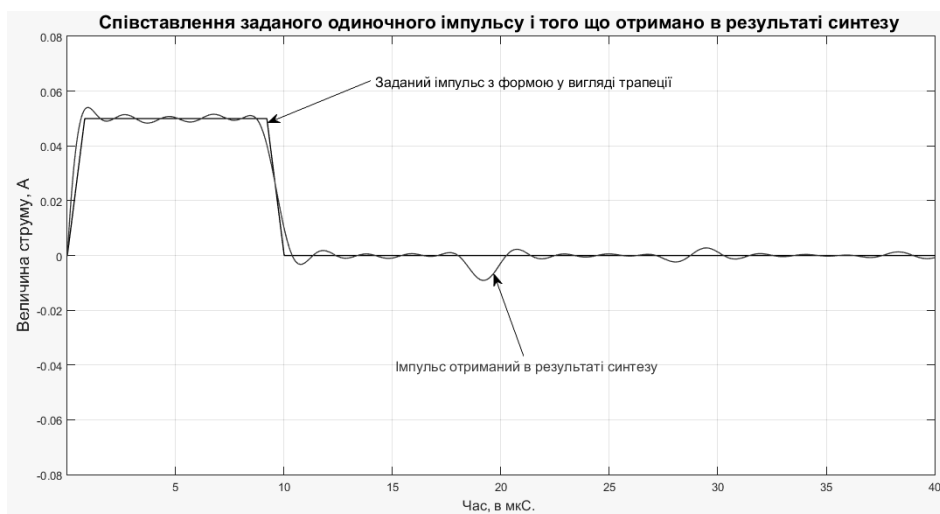


Рис. 6. Співставлення заданого для синтезу довгої лінії одиночного імпульсу та імпульсу отриманого за рахунок імітаційної комп'ютерної моделі, з узгодженим навантаженням

Зазначене дозволяє стверджувати, що припущення, яке зазвичай роблять при синтезі штучної довгої лінії, щодо синтезу лінії для короткозамкненого навантаження і перенесення результатів на лінію що працює на узгоджене навантаження, є не зовсім вірним. При цьому виникають відхилення від потрібної форми сигналу які потрібно контролювати. В той самий час, синтез штучної довгої лінії, що забезпечує потрібну форму струму на короткозамкненому навантаженні, є цілком коректним.

Висновки

У статті розглядається використання імітаційної комп'ютерної моделі неоднорідної штучної довгої лінії для оцінки коректності процедури синтезу такої лінії. Розроблена комп'ютерна модель дозволяє зручним чином представити процеси що відбуваються в довгих лініях і при цьому її параметри можливо просто змінювати, виходячи з потрібного сценарію роботи лінії.

Дослідження за допомогою розробленої комп'ютерної моделі штучної довгої лінії з п'яти елементів дозволили встановити, що загально-вживане припущення при синтезі лінії, яке полягає в тому, що синтез лінії здійснюється для режиму короткозамкненого навантаження і результати синтезу переносяться на лінію, що працює на узгоджене навантаження є не зовсім коректним. Це припущення призводить до того, що виникають відхилення від потрібної форми сигналу, які потрібно за можливості тримати під контролем або спробувати усунути. При цьому потрібно зауважити, що використання розробленої комп'ютерної моделі доводить, що синтез штучної довгої лінії згідно наведеної в роботі процедури, яка забезпечує потрібну форму струму на короткозамкненому навантаженні є цілком коректним.

Розроблена комп'ютерна модель може використовуватися для дослідження характеристик штучних довгих ліній, як однорідних так і неоднорідних, і для пошуку можливих шляхів їх удосконалення.

Напрямок подальших досліджень може бути покращення фронтів імпульсу на виході лінії за рахунок використання при синтезі довгої лінії початкового імпульсу з нерівномірними фронтами — більш пологим переднім та більш крутим заднім. При цьому розроблена імітаційна комп'ютерна модель буде виступати як важливий інструмент перевірки ефективності запропонованих рішень.

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 Conference PIC S&T, Kyiv, Ukraine, October 8–11, 2019, Paper 190. doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061536 .
- [14] Pliushch O., Vyshnivskiy V., Toliupa S., Rybydajlo 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).

Плющ О. Г., Савченко А. С.

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ КОРЕКТНОСТІ ПРОЦЕДУРИ СИНТЕЗУ ШТУЧНОЇ ДОВГОЇ ЛІНІЇ

У статті розглянуті процеси що відбуваються в імпульсних модуляторах підсилювачів потужності та автогенераторів. Продемонстровано, що форма вихідного імпульсу модулятора практично повністю визначається параметрами штучної довгої лінії що є складовою частиною модулятора. Показано, що задовольнити вимоги до форми імпульсу можливо при використанні неоднорідних штучних довгих ліній. Розглянуто відому процедуру синтезу такої неоднорідної штучної довгої лінії, що дозволяє отримати потрібну форму імпульсу на виході модулятора. Підкреслено, що при такому синтезі зазвичай робиться припущення, що лінія яка створює потрібну форму імпульсу струму при короткозамкненому навантаженні буде створювати потрібну форму імпульсу і при розрядженні через узгоджене навантаження. Зроблено висновок про існування проблеми, яка полягає в тому, що зазначене припущення потребує перевірки. Так само вимагають перевірки форма сигналу на виході лінії в часовій області. Виходячи з того, що аналітичні методи дуже важко використовувати для неоднорідних довгих ліній, в роботі запропонована для вирішення зазначеної проблеми комп'ютерна модель. Розроблена комп'ютерна модель була застосована до відомої з літературних джерел штучної довгої лінії що складається з п'яти елементів, і має за мету формувати вихідний сигнал у формі трапеції. При випробуванні штучної довгої лінії за допомогою імітаційної комп'ютерної моделі було встановлено, що процедура синтезу штучної довгої лінії дозволяє створити лінію яка при розряді на короткозамкнене навантаження відтворює задану форму імпульсу. В той самий час при використанні моделі для імітації розряду лінії через узгоджене навантаження, форма сигналу спотворюється, що свідчить про не повну коректність зробленого при синтезі лінії припущення. Наявна розроблена модель дозволяє оцінити відхилення форми сигналу від потрібної і надає можливість виробити рішення щодо покращення цієї форми. Таким чином, розроблена імітаційна комп'ютерна модель дозволяє оцінити сигнал у часовій області на виході довгої лінії в різних її режимах та перевірити коректність припущень які при цьому робляться. Виходячи з гнучкості та точності розробленої моделі, її можливо використовувати для перевірки характеристик довгих ліній імпульсних модуляторів та проводити пошук шляхів їх удосконалення.

Ключові слова: імпульсний модулятор; штучна довга лінія; імітаційна комп'ютерна модель; синтез.

Pliushch O., Savchenko A.

COMPUTER MODEL FOR CORRECTNESS ASSESSMENT OF ARTIFICIAL LONG LINE SYNTHESIS PROCEDURE

The paper considers processes that take place in pulse modulators of power amplifiers and generators. It is demonstrated that the waveform of output modulator pulse is practically completely determined by the parameters of artificial long line that is a constituent part of the modulator. It is shown that to satisfy the requirements for the pulse waveform, one needs to use heterogeneous long lines. The known procedure of such heterogeneous artificial long line synthesis is considered, which allows one to obtain a required pulse form at the modulator output. It is stressed that during this synthesis, an assumption is usually made that the line, which creates required pulse form of the current for short-circuited load, will create the required pulse form and for the discharge process through the matched impedance. An inference is made about the problem existence that lies in the fact that the mentioned assumption requires verification. The signal waveform at the output of the line requires the assessment of the waveform in the time domain as well. With account of the fact that analytical methods are hard to apply to heterogeneous long lines, the paper proposes as a solution to this problem to use a computer model. Designed computer model was applied to the known from the literature artificial long line, which is composed from five elements and aims to form trapezoidal output signal. During the trial of the artificial long line with the help of simulation computer model, it was established that artificial long line synthesis procedure allows creating the line that, while being discharged over the short-circuited load, creates the required pulse form. At the same time, while using the model for discharge process simulation over the matched load, the waveform distorts, what points at not totally correct assumption made during the line synthesis. Designed model permits assessing the signal waveform deviation from the required one and gives a possibility to work out a decision as to this waveform improvement. Thus, developed simulation computer model allows one to assess the signal waveform in the time domain at the output of the long line for its different operation modes and check the correctness of the assumption made during the synthesis process. With account of the flexibility and the precision of the designed model, it is possible to use it for long lines parameters verification in pulse modulators, as well as for search of ways of their improvement.

Keywords: pulse modulator; artificial long line; simulation computer model; synthesis.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2021 р.

Прийнято до друку 15.12.2021 р.