

УДК 621.395.721.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.014754

Н. В. РУДЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент;О. Г. ПЛЮЩ², доктор техн. наук, доцент;О. І. ГОВОРУН¹,¹ Державний університет телекомунікацій, Київ² Національний авіаційний університет, Київ

ШТУЧНА ЗАРЯДНА ДОВГА ЛІНІЯ З ДЕМПФУВАЛЬНИМИ РЕЗИСТОРАМИ

Статтю присвячено процесам у штучних зарядних довгих лініях, які використовуються в імпульсних модуляторах різних радіотехнічних приладів. Зауважено, що головною проблемою, з якою стикаються розробники зарядних ліній є забезпечення потрібної форми імпульсу під час розрядження лінії через узгоджене навантаження. У попередній статті для покращення форми цього імпульсу було запропоновано використовувати демпфувальний резистор, під'єднаний паралельно до першої індуктивності лінії. При цьому було продемонстровано, що в разі оптимального вибору параметрів демпфувального резистора та першої ємності лінії максимальне відносне відхилення амплітуди імпульсу модулятора від очікуваного значення зменшується майже в 12 разів. У цій статті для вивчення можливості подальшого зменшення відхилення амплітуди імпульсу від очікуваного значення запропоновано також використовувати демпфувальний резистор, під'єднаний паралельно до другої індуктивності лінії. Для проведення зазначених досліджень було вдосконалено розроблену раніше імітаційну комп'ютерну модель із урахуванням додавання до схеми лінії резистора паралельно до другої індуктивності. Випробування вдосконаленої імітаційної комп'ютерної моделі з двома демпфувальними резисторами довело, що під час під'єднання резистора паралельно до другої індуктивності лінії та налаштування значення другої ємності лінії відносне відхилення амплітуди імпульсу від очікуваного значення зменшуються від 0,8 до 0,5 відсотків. Зазначене поліпшення форми імпульсу вбачається достатньо значним, зважаючи на несуттєву вартість елементів, які додаються до штучної зарядної довгої лінії. Запропонована і випробувана за допомогою розробленої та вдосконаленої імітаційної комп'ютерної моделі штучна довга лінія може бути застосована в імпульсних модуляторах різноманітних радіотехнічних засобів, у телекомунікаційних мережах та радіолокації. Особливо це стосується тих імпульсних модуляторів, що живлять підсилювачі потужності, чутливі до відхилення значень напруги імпульсного джерела живлення.

Ключові слова: телекомунікаційні мережі; імітаційне комп'ютерне моделювання; імпульсний модулятор; штучна зарядна довга лінія; демпфувальний резистор.

ВСТУП

Постановка проблеми. Штучні довгі лінії широко використовуються в різноманітному радіотехнічному обладнанні для розв'язання багатьох завдань. Але найбільш значущу роль вони відіграють в імпульсних модуляторах підсилювачів потужності або автогенераторів. Створення імпульсу потрібної форми на виході є основним викликом на етапі проектування таких імпульсних модуляторів. При цьому головною вимогою до форми імпульсу є та, щоб його верхівка була якомога більш пласкою. Ця вимога впливає з того, що частота та фаза вихідного сигналу підсилювача потужності може значно відхилятися від потрібного значення під час змін амплітуди імпульсу модулятора. У попередніх працях для задоволення цієї вимоги було запропоновано використовувати демпфувальний резистор, що під'єднується паралельно до першої індуктивності лінії. У цій статті в процесі проведення досліджень методами імітаційного комп'ютерного моделювання було встановлено, що в разі оптимального вибору номіналів демпфувального резистора та ємності першого конденсатора лінії флуктуації верхівки імпульсу модулятора можуть бути зменшені у відносному вимірі з 12,4 до 0,8%. Цей істотний вииграш дає змогу висунути припущення, що подальших покращень форми імпульсу (його сплюснення) можна досягти завдяки демпфуванню і другої індуктивності лінії та оптимізації номіналів цього демпфувального резистора та другої ємності лінії. Це припущення потребує перевірки та уважного вивчення.

У процесі дослідження впливу на форму імпульсу демпфувального резистора першої індуктивності лінії було розроблено та перевірено імітаційну комп'ютерну модель штучної зарядної довгої лінії. Саме застосування цієї моделі дало можливість оцінити зазначене покращення форми імпульсу. З огляду на зроблене припущення щодо використання другого демпфувального резистора ця модель має бути модернізована, щоб врахувати зміни в принциповій схемі штучної зарядної довгої лінії. Використання імітаційної комп'ютерної моделі в цьому разі є набагато ефективнішим, ніж інші методи досліджень, зокрема аналітичні методи або методи натурного експерименту.

© Н. В. Руденко, О. Г. Плющ, О. І. Говорун, 2022

З наведеного випливає: автори статті схиляються до думки, що існує проблема, яка полягає в тому, що потрібно забезпечити подальше покращення форми імпульсу на виході штучної зарядної довгої лінії під час її розрядження на узгодженому навантаженні. При цьому для її розв'язання потрібно видозмінити та доповнити розроблену раніше імітаційну комп'ютерну модель штучної зарядної довгої лінії та за допомогою цієї вдосконаленої моделі дослідити висунуті припущення щодо можливості покращення форми імпульсу на виході штучної зарядної довгої лінії з використанням демпфувального резистора, підімкненого паралельно до другої індуктивності лінії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У працях [1–3] надано загальне уявлення про застосування імпульсних модуляторів із штучними зарядними довгими лініями для живлення як підсилювачів потужності, так і потужних автогенераторів у різних галузях радіотехніки. Так, наприклад, у джерелі [1] зосереджено увагу на застосуванні штучних зарядних довгих ліній в імпульсних модуляторах радіолокаційних станцій з імпульсними зондувальними сигналами. У ньому наочно подано процеси в імпульсному модуляторі, побудованому із застосуванням штучної зарядної довгої лінії, пояснено узагальнену схему такого пристрою та приділено увагу опису її окремих важливих елементів. У [2; 3] більш широка направленість, тут розглянуто використання імпульсних модуляторів у різних підсилювачах сигналів на радіочастоті, тепер і тих, що використовуються в СВЧ діапазоні. Загалом доцільно зауважити, що праці [1–3] не торкаються оцінювання впливу форми вихідного імпульсу штучної зарядної довгої лінії та вивчення можливостей зменшення флуктуацій верхівки цього імпульсу. До того ж, у зазначених джерелах не розглядається застосування методів імітаційного комп'ютерного моделювання з метою проведення досліджень таких імпульсних модуляторів зі штучними зарядними довгими лініями, що становлять інтерес для дослідників.

Джерело [4] тісно пов'язано з підходами до практичної реалізації штучних зарядних довгих ліній. У цій праці наведено практичні зразки різних типів штучних зарядних довгих ліній, що по суті є змістовною класифікацією таких ліній. До того ж, у статті [4] подано форми імпульсів на узгодженому навантаженні, отримані проведенням натурального експерименту, що є дуже важливим для перевірки та налаштування імітаційних комп'ютерних моделей. Корисними є також параметри імпульсів та пропозиції щодо застосування відповідних штучних зарядних довгих ліній на певних типах обладнання. Серед слабких місць цього джерела слід зазначити те, що в ньому не розглядаються інші методи отримання імпульсу на виході штучної зарядної лінії та їх порівняння.

Роботи [5; 6] серед іншого присвячені дослідженню того, як саме параметри вихідного імпульсу штучної довгої лінії впливають на загальні характеристики радіолокаційних пристроїв. Це є важливим з погляду висунення вимог до припустимих флуктуацій амплітуди вихідного імпульсу модулятора зі штучною зарядною довгою лінією. Проте недоліком цього джерела є недостатня увага, приділена пошуку перспективних методів послаблення впливу флуктуацій амплітуди вихідного імпульсу модулятора зі штучною зарядною довгою лінією.

У джерелах [7–9] продемонстровано змістовний та ретельний опис різних технологій і методів, що використовуються для побудови підсилювачів потужності на радіочастоті, в яких як пристрої живлення саме і застосовуються імпульсні модулятори зі штучними зарядними довгими лініями. Незважаючи на це, потрібно зауважити, що слабким місцем цих джерел інформації є відсутність використання методів імітаційного комп'ютерного моделювання для оцінювання характеристик імпульсів на виході штучної зарядної довгої лінії та опрацювання пропозицій щодо покращення форми імпульсу на виході модулятора.

Виграшним елементом [10] є те, що в ній приділено велику увагу розгляду натуральних довгих ліній і наочно показано в який спосіб здійснюється перехід від певної натуральної лінії до штучної із застосуванням заміни розподілених параметрів на зосереджені. Проте в цій праці не досліджуються параметри імпульсу на виході штучної зарядної довгої лінії під час її розрядження на узгодженому навантаженні. До того ж тут також відсутні підходи до покращення форми імпульсу на виході цієї лінії.

Працю [11] присвячено основам створення моделей електричних кіл, що складаються з типових радіоелементів. Розроблені в ній підходи дуже зручно використовувати для побудови імітаційних комп'ютерних моделей штучних зарядних довгих ліній. Автор [11] наочно описує можливі алгоритми переходу від системи диференціальних рівнянь до системи рівнянь різниці, які є наріжним каменем у процесі створення імітаційних комп'ютерних моделей. На жаль, недоліком [11] є відсутність прикладів використання розроблених методів синтезу комп'ютерних моделей для побудови імітаційних комп'ютерних моделей штучних зарядних довгих ліній.

Автори в [12] з огляду на відомі з літературних джерел напрацювання створили імітаційну комп'ютерну модель штучної довгої лінії та випробували її для певних сценаріїв функціонування. До

того ж у цьому джерелі завдяки дослідженням було встановлено, що підімкнення демпфувального резистора певного номіналу паралельно до першої індуктивності лінії, разом із оптимальним вибором значення ємності першого конденсатора лінії, у більш ніж 12 разів зменшує максимальне відносне відхилення від очікуваного для верхівки імпульсу модулятора. Незважаючи на ці здобутки, автори [12] не пішли далі і не дослідили, чи можливі подальші зменшення відносного відхилення від очікуваного під час під'єднання демпфувального резистора паралельно і до другої індуктивності лінії.

Як підсумок із аналізу останніх досліджень і публікацій можна дійти висновку, що перспективний підхід до зменшення максимального відносного відхилення від очікуваного для верхівки імпульсу модулятора, який полягає в застосуванні демпфувального резистора паралельно до першої індуктивності лінії, не був достатньо глибоко доопрацьований і потребує подальших досліджень. При цьому метод імітаційного комп'ютерного моделювання потрібно розглядати як пріоритетний для дослідження характеристик вихідного імпульсу штучної зарядної довгої лінії.

Нерозв'язані питання. Дослідження літературних джерел дає змогу припустити, що питанням використання імітаційного комп'ютерного моделювання для вивчення параметрів штучних зарядних довгих ліній для імпульсних модуляторів не приділяється належної уваги. Розроблена в [12] імітаційна комп'ютерна модель потребує доопрацювання з метою виявлення переваг, які можуть бути отримані в процесі модернізації штучної зарядної довгої лінії. Припускається, що такі переваги можуть бути винайдені під час подальшого розвитку підходу, який полягає в додаванні демпфувальних резисторів паралельно до індуктивностей штучної довгої лінії. Досі не розв'язаним є питання дослідження процесів у лінії в разі додавання демпфувального резистора паралельно до другої індуктивності лінії та відповідного налаштування параметрів цього резистора та другої ємності лінії. Отже, вирішення цього питання дасть змогу покращити форму імпульсу модулятора та підвищити характеристики підсилювачів потужності або потужних генераторів, які цей модулятор живить.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є поліпшення характеристик форми імпульсу під час розрядження штучної зарядної довгої лінії на узгодженому навантаженні через додавання демпфувального резистора індуктивності другого каскаду та пошуку оптимальних значень цього резистора і другої ємності, за яких забезпечується найменше максимальне відносне відхилення амплітуди імпульсу модулятора від очікуваного значення.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові задачі:

- удосконалення імітаційної комп'ютерної моделі штучної зарядної довгої лінії, розробленої в [12], через урахування в ній додавання демпфувального резистора паралельно до індуктивності другого каскаду та перевірка її працездатності;
- вивчення за допомогою вдосконаленої комп'ютерної моделі форми вихідного імпульсу штучної зарядної довгої лінії для різних значень параметрів лінії;
- винайдення оптимальних значень демпфувального резистора індуктивності та ємності другого каскаду штучної зарядної довгої лінії, за яких забезпечуються найменші флуктуації амплітуди імпульсу лінії на узгодженому навантаженні і чисельна оцінка отриманого виграшу відносно результатів попередніх досліджень.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розроблення імітаційної комп'ютерної моделі штучної довгої лінії

з демпфувальними резисторами індуктивностей першого та другого каскадів

У статті [12] було запропоновано і досліджено штучну зарядну довгу лінію для імпульсних модуляторів, наведену на рис. 1. У цій лінії параметри ємностей C та індуктивності L у кожному каскаді є однаковими (за винятком першого), і паралельно до першої індуктивності підімкнено демпфувальний резистор R_D .

Також у [12] було розроблено імітаційну комп'ютерну модель штучної зарядної довгої лінії (див. рис. 1). Ця імітаційна модель дала змогу не тільки оцінити форму імпульсу під час розрядження її на узгодженому навантаженні R_L , а і встановити оптимальні значення опору демпфувального резистора R_D та ємності першого каскаду C_1 . Для лінії із десяти елементів із хвильовим опором 60 Ом і індуктивностями котушок усіх каскадів 60 мкГн оптимальні значення ємності першого каскаду C_1 становлять $1,34C$ при номіналі демпфувального резистора $1,7R_L$ (нагадаємо, що для узгодженої лінії опір резистора навантаження дорівнює хвильовому опору лінії).

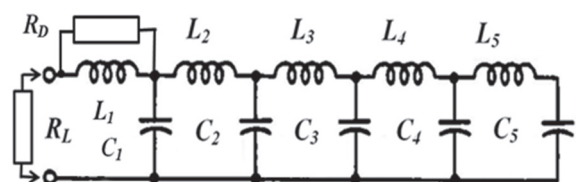


Рис. 1. Штучна зарядна довга лінія з демпфувальним резистором індуктивності першого каскаду R_D

У цій статті пропонується використовувати демпфувальний резистор паралельно також і до другої індуктивності штучної зарядної довгої лінії. У результаті схема (див. рис. 1) трансформується в схему, зображену на рис. 2, в якій два демпфувальних резистори позначено як R_{D1} та R_{D2} .

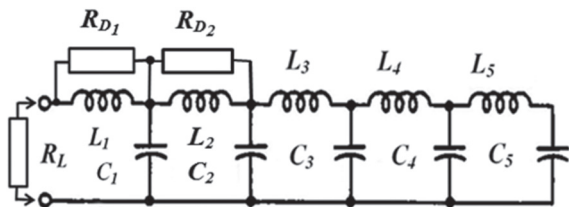


Рис. 2. Штучна зарядна довга лінія з демпфувальними резисторами першої та другої індуктивностями

рівняннями тільки для першого та другого контурів, тоді як для інших вони залишатимуться без змін. Розглянемо процес формування математичної моделі для першого (лівого) контуру принципової схеми на рис. 2. Але перед тим, як перейти до розгляду схеми цієї штучної зарядної довгої лінії зауважимо, що принципова схема на рис. 2 складається з трьох типових електричних елементів: R , L та C . З літературних джерел є добре відомими для цих елементів співвідношення, що зв'язують між собою напруги та струми [11]:

$$v(t) = Ri(t), \tag{1}$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \text{ або } v(t) - v(0) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt, \tag{2}$$

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \text{ або } i(t) - i(0) = \frac{1}{L} \int_0^t v(t) dt. \tag{3}$$

На першому етапі застосуємо другий закон Кірхгофа для напруги для першого контуру і в результаті дістанемо таке рівняння:

$$v_{C1}(t) - v_{L1}(t) - v_{RL}(t) = 0. \tag{4}$$

Підставивши (3) в (4) і взявши до уваги, що

$$v_{RL}(t) = (i_{RD1}(t) + i_{L1}(t))R_L,$$

дістанемо вираз

$$v_{C1}(t) = L \frac{di_{L1}(t)}{dt} + (i_{RD1}(t) + i_{L1}(t))R_L. \tag{5}$$

Зважаючи на те, що

$$i_{RD1}(t) = \frac{L}{R_{D1}} \frac{di_{L1}(t)}{dt}, \tag{6}$$

(5) перетворюється в

$$v_{C1}(t) = L_1 \frac{di_{L1}(t)}{dt} + R_L \left(\frac{L_1}{R_{D1}} \frac{di_{L1}(t)}{dt} + i_{L1}(t) \right). \tag{7}$$

Відношення (7) доцільно подати у вигляді

$$v_{C1}(t) - R_L i_{L1}(t) = \left(L + \frac{R_L L}{R_{D1}} \right) \frac{di_{L1}(t)}{dt}. \tag{8}$$

Для зручності введемо константу K_1 , яка визначається згідно з формулою

$$K_1 = L + \frac{R_L L}{R_{D1}}.$$

З огляду на наведене рівняння (8) може бути подане так:

$$\frac{di_{L1}(t)}{dt} = \frac{1}{K_1} v_{C1}(t) - \frac{R_L}{K_1} i_{L1}(t). \tag{9}$$

Співвідношення (9) є однією з формул математичної моделі першого контуру схеми, зображеної на рис. 2.

Друге рівняння можна здобути з використанням першого закону Кірхгофа для струму. Застосуємо цей закон для вузла, який з'єднує L_1 , L_2 , R_{D1} , R_{D2} та C_1 у схемі на рис. 2, і як результат дістанемо вираз

$$i_{L_1}(t) + i_{R_{D1}}(t) + i_{C_1}(t) = i_{L_2}(t) + i_{R_{D2}}(t). \quad (10)$$

Зважаючи на (2), (3) і (6), співвідношення (10) може бути перетворене в таку рівність:

$$i_{L_2}(t) - C_1 \frac{dv_{C_1}(t)}{dt} = i_{L_1}(t) + \frac{L}{R_{D_1}} \frac{di_{L_1}(t)}{dt} - \frac{v_{C_1}(t) - v_{C_2}(t)}{R_{D_2}}. \quad (11)$$

Для спрощення подання рівнянь позначимо L/R_{D_1} в (11) як K_2 .

Формула (11) містить дві похідні і потрібно одну з них усунути. Для цього підставимо (9) у праву частину (11); як результат дістанемо такий вираз:

$$C_1 \frac{dv_{C_1}(t)}{dt} = -i_{L_1}(t) + i_{L_2}(t) - \frac{K_2}{K_1} v_{C_1}(t) + \frac{K_2 R_L}{K_1} i_{L_1}(t) + \frac{v_{C_2}(t) - v_{C_1}(t)}{R_{D_2}}. \quad (12)$$

Поділивши ліву та праву частини (12) на C_1 , дійдемо до формули

$$\frac{dv_{C_1}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_1} i_{L_1}(t) + \frac{1}{C_1} i_{L_2}(t) - \frac{K_2}{C_1 K_1} v_{C_1}(t) + \frac{K_2 R_L}{C_1 K_1} i_{L_1}(t) + \frac{v_{C_2}(t) - v_{C_1}(t)}{C_1 R_{D_2}}. \quad (13)$$

Отже, рівняння (9) і (13) є математичною моделлю неперервного часу для першого контуру штучної зарядної довгої лінії, зображеної на рис. 2.

Створимо систему рівнянь для другого контуру штучної довгої лінії, яку унаочнює рис. 2.

Спочатку створимо рівняння для напруг у другому контурі:

$$L_2 \frac{di_{L_2}(t)}{dt} = v_{C_2}(t) - v_{C_1}(t). \quad (14)$$

Далі перейдемо до застосування першого закону Кірхгофа для вузла, що з'єднує L_2 , L_3 , R_{D_2} і C_2 у схемі на рис. 2,

$$i_{L_2}(t) + i_{R_{D_2}}(t) + i_{C_2}(t) = i_{L_3}(t). \quad (15)$$

Рівняння (15) може бути переписане в такий спосіб:

$$C_2 \frac{dv_{C_2}(t)}{dt} = i_{L_3}(t) - i_{L_2}(t) - \frac{v_{C_2}(t) - v_{C_1}(t)}{R_{D_2}}. \quad (16)$$

Разом рівняння (14) і (16) є математичною моделлю неперервного часу для другого контуру штучної довгої лінії, зображеної на рис. 2.

Для використання у вигляді комп'ютерної моделі потрібно перейти в (9) та (13) і (14) та (16) від неперервного часу до дискретного. Такий перехід можливо зробити, скориставшись явним алгоритмом Ейлера, що передбачає заміну кожної похідної її приблизним значенням так [11]:

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}, \quad (17)$$

де Δt — розмір кроку, який вважається постійним.

Застосувавши (17), диференціальні рівняння (9) і (13) після нескладних перетворень можуть бути подані як рівняння різниці:

$$v_{C_1}(n+1) = v_{C_1}(n) - i_{L_1}(n) \frac{\Delta t}{C_1} + i_{L_2}(n) \frac{\Delta t}{C_1} - \frac{\Delta t K_2}{C_1 K_1} v_{C_1}(n) + \frac{\Delta t K_2 R_L}{C_1 K_1} i_{L_1}(n) + \frac{\Delta t}{C_1 R_{D_2}} (v_{C_2}(n) - v_{C_1}(n)), \quad (18)$$

$$i_{L_1}(n+1) = i_{L_1}(n) + \frac{\Delta t}{K_1} v_{C_1}(n) - \frac{\Delta t R_L}{K_1} i_{L_1}(n). \quad (19)$$

де n — номер ітерації.

Рівняння (18) і (19) разом є математичною моделлю дискретного часу першого контуру принципової схеми штучної зарядної довгої лінії, зображеного на рис. 2.

Запишемо рівняння різниці для диференціальних рівнянь, що описують другий контур, це рівняння (14) і (16). Для виразу (14) рівняння різниці набирає вигляду

$$i_{L_2}(n+1) = i_{L_2}(n) + v_{C_2}(n) \frac{\Delta t}{L} - v_{C_1}(n) \frac{\Delta t}{L}. \quad (20)$$

Аналогічно ми можемо дістати рівняння різниці для диференціального рівняння (16):

$$v_{C_2}(n+1) = v_{C_2}(n) - i_{L_2}(n) \frac{\Delta t}{C_2} + i_{L_3}(n) \frac{\Delta t}{C_2} - \frac{\Delta t}{C_2 R_{D_2}} (v_{C_2}(n) - v_{C_1}(n)). \quad (21)$$

Виконавши всі окреслені раніше кроки, математичну модель дискретного часу для всіх інших контурів (від третього до останнього) принципової схеми (див. рис. 2) було здобуто в [12]; причому рівняння однакові для всіх контурів, починаючи з третього до останнього. Це впливає, як уже зазначалося, з однорідності штучної довгої лінії. Відповідно до [12] рівняння подібні (20) і (21) для всіх інших контурів, окрім першого та другого, матимуть такий вигляд:

$$v_{C_i}(n+1) = v_{C_i}(n) - i_{L_i}(n) \frac{\Delta t}{C_i} + i_{L_{i+1}}(n) \frac{\Delta t}{C_i}, \quad (22)$$

$$i_{L_i}(n+1) = i_{L_i}(n) + v_{C_i}(n) \frac{\Delta t}{L_i} - v_{C_{i-1}}(n) \frac{\Delta t}{L_i}. \quad (23)$$

де i — порядковий номер контуру.

Система рівнянь різниці (18), (19), (20), (21), (22) та (23) є математичною моделлю дискретного часу для штучної зарядної довгої лінії, зображеної на рис. 2, під час її розрядження на узгодженому навантаженні. Ця система рівнянь є дуже зручною для її реалізації в будь-якому середовищі програмування; у роботі як таке середовище вибрано середовище Matlab.

Розробивши імітаційну комп'ютерну модель штучної зарядної довгої лінії, зображеної на рис. 2, перейдемо до оцінювання впливу застосування демпфувального резистора паралельно до другої індуктивності лінії та пошуку оптимальних значень параметрів двох демпфувальних резисторів та двох перших конденсаторів лінії.

Відшукання за допомогою розробленої комп'ютерної моделі оптимальних значень демпфувальних резисторів перших двох індуктивностей та ємностей першого та другого каскадів штучної зарядної довгої лінії

Дослідження штучної зарядної довгої лінії, зображеної на рис. 2, виконаємо методами імітаційного комп'ютерного моделювання із застосуванням розробленої моделі, поданої виразами (18), (19), (20), (21), (22) та (23). Зважаючи на потребу оцінювати можливий вигравш відносно результатів попередніх досліджень [12], для моделювання було вибрано такі умови: кількість секцій у штучній довгій лінії — 10, попередній заряд ємностей — 10 В, хвильовий опір довгої лінії $\epsilon R_0 = 60$ Ом, індуктивність усіх котушок становить 60 мкГн. Значення всіх ємностей конденсаторів вибрано так, щоб для зазначеної індуктивності хвильовий опір лінії дорівнював 60 Ом. Штучна довга лінія розряджається на узгодженому опорі, що становить 60 Ом. Оптимізація форми імпульсу на резисторі навантаження здійснюється вибором значень двох демпфувальних резисторів та номіналів першої та другої ємностей.

З огляду на те, що оптимізація потребує зміни чотирьох параметрів, цей процес є достатньо тривалий та складний. Тому в статті наведено вже винайдену оптимальну форму імпульсу на навантаженні штучної лінії та значення відповідних параметрів елементів: $R_{D1} = 1,7R_0$, $R_{D2} = 5,6R_0$, $C_1 = 1,2328C$ та $C_2 = 1,07C$.

Три форми імпульсу на виході штучної зарядної довгої лінії, які відповідають лінії без демпфувальних резисторів, з одним демпфувальним резистором та з двома демпфувальними резисторами для тих самих умов, що наведено раніше, зображено на рис. 3.



Рис. 3. Імпульс на виході штучної зарядної довгої лінії на узгодженому навантаженні

Як впливає з рис. 3, імпульс для штучної зарядної довгої лінії з одним демпфувальним резистором майже збігається з тим, що відповідає лінії з двома демпфувальними резисторами. Тому для кращого порівняння криві з рис. 3 зображено на рис. 4 у збільшеному масштабі.



Рис. 4. Імпульс на виході штучної зарядної довгої лінії на узгодженому навантаженні у збільшеному масштабі

Аналіз кривих, наведених на рис. 4, дає змогу дійти таких висновків:

- використання як одного, так і двох демпфувальних резисторів істотно покращують форму (пласкість) вершини імпульсу відносно імпульсу на виході штучної зарядної довгої лінії без демпфувальних резисторів;
- найбільше відхилення від очікуваного значення (5 В) для лінії з одним демпфувальним резистором становить 0,04 В, що відповідає 0,8%;
- найбільше відхилення від очікуваного значення для лінії з двома демпфувальними резисторами дорівнює 0,025 В, що відповідає 0,5%;
- хоча в абсолютному значенні різниця між наведеними раніше максимальними відхиленнями становить 0,015 В, у відносному вимірі це дорівнює приблизно 37,5%, що є істотним виграшем;
- штучна зарядна довга лінія з двома демпфувальними резисторами значно зменшує другий сплеск напруги на виході лінії.

Головними висновками є те, що штучна зарядна довга лінія з двома демпфувальними резисторами значно покращує форму імпульсу відносно лінії з одним демпфувальним резистором і при цьому не потребує великих витрат на свою реалізацію.

ВИСНОВКИ

У статті досліджено процеси в штучних зарядних довгих лініях, які широко використовуються в радіотехніці та телекомунікаційному обладнанні. З метою покращення форми імпульсу під час розрядження штучної зарядної довгої лінії через узгоджене навантаження пропонується використовувати демпфувальні резистори індуктивностей першого та другого каскадів лінії та налаштування їх ємностей. Для дослідження ефективності запропонованого рішення удосконалено розроблену раніше імітаційну комп'ютерну модель штучної зарядної довгої лінії, яка дала змогу винайти оптимальні значення номіналів демпфувальних резисторів та ємностей першого та другого каскадів. У разі, коли зазначені параметри набувають оптимальних значень, штучна зарядна довга лінія з двома демпфувальними резисторами на 37,5% зменшує максимальне відхилення амплітуди імпульсу від очікуваного значення порівняно з лінією з одним демпфувальним резистором, що є вагомим виграшем. Результати проведених досліджень можуть бути використані в процесі розроблення та удосконалення імпульсних модуляторів зі штучними довгими лініями в телекомунікаціях та радіолокації.

Список використаної літератури

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. (eng).
4. **Ness Engineering Inc.**, *Pulse Forming Network Equations and Calculator*, 2021. URL: <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. Vol. 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. Vol. 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. (eng).
12. **Плющ О. Г., Руденко Н. В.** Модернізована штучна довга лінія для імпульсних модуляторів // Зв'язок. 2021. № 5(153), С. 40–47.

N. V. Rudenko, O. G. Pliushch, O. I. Hovorun

PULSE-FORMING NETWORK WITH DAMPING RESISTORS

The paper is dealing with the processes in pulse-forming networks, which are used in pulse modulators of different radio-technical installations. It is stressed, that the main problem that the designers of the pulse-forming networks face is to secure required form of the pulse under conditions of the network discharge over the matched load. In the previous paper, to improve the form of this pulse, it was proposed to use damping resistor connected in parallel to the first inductance. In this case, it was demonstrated that under optimal choice of the network damping resistor and the first capacitor parameters, maximum relative deviation of the modulator pulse amplitude from the expected value decreases approximately 12 times. In the current paper, to study possibilities of the further decrease of the relative deviation of the pulse amplitude from the expected value, it is proposed to also use damping resistor connected in parallel to the second inductance of the network. To perform the mentioned research, the previously developed computer simulation model was perfected with account of adding to the network diagram of the damping resistor in parallel with the second inductance. Trials of the improved computer simulation model with two damping resistors proved that while connecting the resistor in parallel to the second network inductance and tuning the value of the capacitor of the network, relative deviation of the pulse amplitude from the expected value decreases from 0.8 to 0.5 per cent. This pulse form amelioration appears to be sufficiently big, taking into account negligible cost of the elements that are added to the pulse-forming network. Proposed and researched with the help of developed and improved computer simulation model pulse-forming network can be used in pulse modulators of different radio-technical installations, in telecommunication networks and radiolocation. This is especially relevant for those pulse modulators that feed power amplifiers sensitive to the deviation of the voltage of the pulse power supply.

Keywords: telecommunication networks; computer simulation; pulse modulator; pulse-forming network; damping resistor.