

УДК 621.395.721.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2021.054047

О. Г. ПЛЮЩ¹, доктор техн. наук, доцент;Н. В. РУДЕНКО², канд. техн. наук,¹ Національний авіаційний університет, Київ² Державний університет телекомунікацій, Київ

МОДЕРНІЗОВАНА ШТУЧНА ДОВГА ЛІНІЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНИХ МОДУЛЯТОРІВ

Розглянуто процеси в штучних довгих лініях, які є складовою частиною імпульсних модуляторів для підсилювачів потужності та автогенераторів. Проведений аналіз показує, що забезпечення потрібної форми імпульсу під час розрядження лінії через узгоджене навантаження є головною проблемою на етапі її розроблення. Для вивчення форми зазначеного імпульсу використовується імітаційне комп'ютерне моделювання процесів у лінії. Побудована комп'ютерна модель однорідної штучної довгої лінії дає можливість встановити, що вихідний імпульс такої лінії під час розрядження на узгоджене навантаження має небажані сплески напруги та флуктуації на початку вершини імпульсу. Відомо, що такі недоліки форми імпульсу можуть призводити до значних відхилень частоти та фази коливань у підсилювачі потужності, який живиться від модулятора. Для усунення цих недоліків запропоновано використання демпфувального резистора, підімкненого паралельно до першої індуктивності лінії, та відповідного налаштування значення першої ємності лінії. Із застосуванням розробленої моделі штучної довгої лінії було виявлено оптимальні значення опору демпфувального резистора та ємності першого конденсатора лінії і встановлено, що запропонований підхід дає змогу зменшити максимальне відносне відхилення амплітуди імпульсу модулятора від очікуваного значення в майже 12 разів. З огляду на проведені дослідження модернізована в такий спосіб штучна довга лінія може бути використана в імпульсних модуляторах, що живлять підсилювачі потужності з жорсткими вимогами до відхилення значень напруги імпульсного джерела живлення, у телекомунікаційних мережах та радіолокації.

Ключові слова: телекомунікаційні мережі; імітаційне комп'ютерне моделювання; імпульсний модулятор; штучна довга лінія; флуктуації амплітуди.

ВСТУП

Постановка проблеми. Штучні довгі лінії відіграють важливу роль у багатьох галузях радіотехніки. Найбільш часто їх застосовують в імпульсних модуляторах потужних підсилювачів потужності або автогенераторів. Головним викликом, з яким стикаються інженери в процесі розроблення імпульсного модулятора, є забезпечення потрібної форми імпульсу на його виході. Деякі підсилювачі потужності та автогенератори, зокрема клістрон і магнетрон, вимагають, аби верхівка імпульсу модулятора, що його живить, була пласкою; ця вимога зумовлена тим, що частота і фаза вихідного сигналу можуть істотно відхилитися від обумовленого значення під час варіацій амплітуди імпульсу модулятора. В однорідних штучних довгих лініях, які мають однакові значення ємностей та індуктивностей у кожному каскаді лінії, природно виникають сплески напруги біля переднього фронту імпульсу та осциляції на його вершині. Ці небажані ефекти спричинені процесами в індуктивності та ємності першого каскаду, і вони дуже важко піддаються приборканню, не кажучи вже про усунення. Одним із підходів до нівелювання цих проблем є використання тільки частини імпульсу модулятора, що живить підсилювач потужності, але при цьому істотно знижується коефіцієнт корисної дії пристрою.

У процесі розроблення та вдосконалення штучних довгих ліній постає питання швидкого та коректного оцінювання форми імпульсу на узгодженому його навантаженні. Прийнятним для оцінювання форми цього імпульсу є використання аналітичних методів або натурних експериментів. Однак ці аналітичні методи передбачають відшукання вирішення для комплексних поліномів високого порядку і є трудомісткими та недостатньо гнучкими і зручними. Водночас проведення натурального експерименту на етапі проектування та вдосконалення потребує багато часу та витрат матеріальних ресурсів.

З огляду на наведене розроблення простого та гнучкого методу для оцінювання форми імпульсу на виході штучної довгої лінії в імпульсному модуляторі є важливим та актуальним. Опрацювання цього питання надасть змогу розв'язати більш складну нагальну проблему, яка полягає в удосконаленні штучної довгої лінії з метою зменшення сплесків та флуктуацій напруги на вершині імпульсу, що формується цією лінією на узгодженому навантаженні.

© О. Г. Плющ, Н. В. Руденко, 2021

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У джерелах [1–3] надано загальну інформацію щодо використання імпульсних модуляторів зі штучними довгими лініями для отримання радіочастотних сигналів високої потужності. Так, у роботі [1] детально розглянуто процеси в імпульсному модуляторі на основі штучної довгої лінії та описано його структурну схему і призначення її окремих елементів.

На відміну від попередньої роботи, джерела [2; 3] присвячені застосуванню імпульсних модуляторів у певних підсилювачах радіочастоти, зокрема на СВЧ. Утім, автори цих праць не обговорюють підходи до зменшення флуктуацій амплітуди вихідного імпульсу штучної довгої лінії та щодо вивчення можливостей використання методів імітаційного комп'ютерного моделювання для дослідження форми сигналу на виході таких ліній.

У статті [4] розкрито докладну класифікацію штучних довгих ліній, надано їх параметри та наведено результати фізичних випробувань зразків, які пропонуються для застосування в певних типах обладнання. Недоліком цієї праці є те, що в ній отримання вихідних імпульсів штучних довгих ліній здійснюється проведенням натурних випробувань і не приділяється уваги іншим можливим методам оцінювання форми сигналу.

Автори в джерелах [5; 6] пропонують використання імпульсних модуляторів у сфері радіолокації і зосереджені на тому, як саме параметри цих модуляторів діють на сталість параметрів радіолокаційних пристроїв. Слабкими місцями цих праць є відсутність відомостей щодо можливих шляхів зменшення флуктуацій амплітуди вихідного імпульсу модулятора зі штучною довгою лінією та можливості перевірки її параметрів без розроблення фізичних зразків.

У [7–9] приділено багато уваги ретельному огляду різноманітних підходів та технологій, що стосуються потужних підсилювачів на радіочастоті та СВЧ, в яких імпульсні модулятори зі штучними довгими лініями відіграють не останню роль. Недоліком цих робіт є те, що в них не розглянуто методи оцінювання параметрів цих ліній методами комп'ютерного моделювання та не пропонуються підходи до поліпшення форми імпульсу на виході.

У джерелі [10], на відміну від розглянутих раніше, досліджено параметри натуральної довгої лінії і продемонстровано, в який спосіб можна перейти від цієї натуральної лінії до штучної лінії, замінивши розподілені параметри на зосереджені. Проте в цій роботі не здійснюється оцінювання параметрів імпульсу під час розряджання лінії на узгоджене навантаження і не окреслено підходи щодо поліпшення форми імпульсу на виході.

Працю [11] присвячено подробицям побудови моделей електричних кіл, створених із типових радіоелементів, тут обговорюється співвідношення між струмом та напругою, що існують для цих елементів. Автор цієї роботи наводить велику кількість прикладів синтезу моделей різних радіотехнічних систем. Її недоліком є нестача уваги застосуванню зазначених методів синтезу моделей до штучних довгих ліній, які становлять основу імпульсних модуляторів.

Загалом, автори цієї роботи погоджуються, що в наявних літературних джерелах не приділено достатньої уваги застосуванню імітаційного комп'ютерного моделювання для дослідження характеристик вихідного імпульсу штучної довгої лінії та не запропоновано ефективних підходів щодо поліпшення вершини цього імпульсу завдяки модернізації цієї лінії та налаштуванню її параметрів.

Нерозв'язані питання. Вивчення джерел інформації дає змогу дійти висновку, що питання застосування імітаційного комп'ютерного моделювання для аналізу характеристик штучних довгих ліній в імпульсних модуляторах лишаються поза увагою. У разі побудови відповідної моделі з'являється можливість значно спростити та пришвидшити процес розроблення нових та вдосконалення вже наявних штучних довгих ліній, які можуть застосовуватися в телекомунікаційних мережах та радіолокації. Зокрема, розв'язання цього питання дасть змогу значно спростити проблему вдосконалення форми імпульсу на виході штучної довгої лінії модулятора через її модифікацію, проблему, яка залишається також мало висвітленою та не вирішеною.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є покращення параметрів форми імпульсу на виході штучної довгої лінії завдяки додаванню демпфувального резистора індуктивності першого каскаду та налаштуванню значення першої ємності цієї лінії і, для досягнення цієї мети, розроблення та використання імітаційної комп'ютерної моделі досліджуваної штучної довгої лінії.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові задачі:

- ◆ розроблення імітаційної комп'ютерної моделі штучної довгої лінії з демпфувальним резистором індуктивності першого каскаду та перевірка її працездатності;
- ◆ дослідження форми вихідного імпульсу штучної довгої лінії для різних значень параметрів лінії;
- ◆ відшукання за допомогою розробленої комп'ютерної моделі оптимальних значень демпфувального резистора індуктивності та ємності першого каскаду штучної довгої лінії, при яких забезпечуються найменші флуктуації амплітуди імпульсу лінії на узгодженому навантаженні.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розроблення імітаційної комп'ютерної моделі штучної довгої лінії з демпфувальним резистором індуктивності першого каскаду та перевірка її працездатності

Модифіковану штучну довгу лінію для імпульсних модуляторів зображено на рис. 1. Ця лінія є однорідною, тобто параметри ємності C та індуктивності L у кожному каскаді є однаковими (за винятком першого), і модернізованою завдяки додаванню демпфувального резистора R_D .

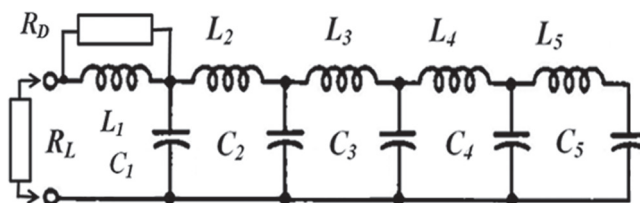


Рис. 1. Модифікована штучна довга лінія з демпфувальним резистором R_D

Зазвичай, як уже згадувалося, форму імпульсу лінії під час розряджання її на узгодженому навантаженні R_L можна дістати аналітичним шляхом або побудовою натурального експерименту. У статті пропонується досягти цієї мети з використанням імітаційної комп'ютерної моделі.

Загалом, принципова схема на рис. 1 складається з трьох типових електричних елементів: R , L та C . Як відомо з літературних джерел, для цих елементів напруги та струми пов'язані такими співвідношеннями:

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

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

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

Зв'язок між струмом та напругою для резистора унаочнює (1), тоді як відношення між цими змінними для ємності та індуктивності визначається за формулами відповідно (2) і (3).

Загалом, математична модель для штучної довгої лінії, що зображена на рис. 1, може бути здобута з використанням такої процедури:

- ◆ по-перше, потрібно записати відповідні звичайні диференційні рівняння першого порядку для кожного з елементів, що нагромаджує енергію (ємність та індуктивність). Динамічними змінними для цих диференційних рівнянь будуть або напруга $v_C(t)$ (для ємності), або струм $i_L(t)$ (для індуктивності);

- ◆ по-друге, необхідно скористатися законами Кірхгофа, щоб виразити невідомі напруги та струми через динамічні змінні, пов'язані з елементами зберігання енергії ($v_C(t)$ або $i_L(t)$) або джерелами струму і напруги (за їх наявності).

З дослідження схеми на рис. 1 стає зрозумілим, що вона складається з кількох контурів, причому всі контури, за винятком першого, є однотипними як за структурою, так і за параметрами елементів. Цей факт значно спрощує процедуру комп'ютерного моделювання схеми, наведеної на рис. 1.

Розглянемо процес формування математичної моделі для першого (лівого) контуру принципової схеми на рис. 1.

Застосувавши закон Кірхгофа для напруги для першого контуру, дістанемо таке рівняння:

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

Якщо підставити (3) в (4) та взяти до уваги, що

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

то матимемо рівність

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

Немає труднощів встановити, що

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

а отже, (5) трансформується в

$$v_{C1}(t) = L \frac{di_{L1}(t)}{dt} + R_L \left(\frac{L}{R_D} \frac{di_{L1}(t)}{dt} + i_{L1}(t) \right). \quad (7)$$

Вираз (7) може бути переписано як

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

Для спрощення позначень уведемо константу K_1 , яка визначається так:

$$K_1 = L + \frac{R_L L}{R_D}.$$

Тоді (8) можна переписати у вигляді

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

Вираз (9) згідно із зазначеними раніше правилами є одним із рівнянь математичної моделі першого контуру схеми, зображеної на рис. 1.

Друге рівняння можна дістати, скориставшись законом Кірхгофа для струму. Застосуємо цей закон для вузла, який з'єднує L_1 , L_2 і C_1 у схемі на рис. 1 і, як результат, маємо рівність

$$i_{L1}(t) + i_{R_D}(t) + i_{C1}(t) = i_{L2}(t). \quad (10)$$

Зважаючи на (2), (3) і (6), вираз (10) може бути перетворений у такий:

$$i_{L2}(t) - C_1 \frac{dv_{C1}(t)}{dt} = i_{L1}(t) + \frac{L}{R_D} \frac{di_{L1}(t)}{dt}. \quad (11)$$

Для спрощення подання рівнянь є доцільним позначити L/R_D в (11) як K_2 .

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

$$C_1 \frac{dv_{C1}(t)}{dt} = -i_{L1}(t) + i_{L2}(t) - \frac{K_2}{K_1} v_{C1}(t) + \frac{K_2 R_L}{K_1} i_{L1}(t). \quad (12)$$

Поділивши ліву та праву частини (12) на C_1 , здобудемо вираз

$$\frac{dv_{C1}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_1} i_{L1}(t) + \frac{1}{C_1} i_{L2}(t) - \frac{K_2}{C_1 K_1} v_{C1}(t) + \frac{K_2 R_L}{C_1 K_1} i_{L1}(t). \quad (13)$$

Разом рівняння (9) і (13) є математичною моделлю неперервного часу для першого контуру штучної довгої лінії, що зображена на рис. 1. Для її використання у вигляді комп'ютерної моделі потрібно перейти в (9) і (13) від неперервного часу до дискретного. Такий перехід можливо зробити, скориставшись формулою Ейлера, що передбачає заміну кожної похідної її приблизним значенням у такий спосіб [11]:

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}, \quad (14)$$

де Δt — розмір кроку, який вважається постійним.

Використовуючи (14), диференціальні рівняння (9) і (13) після нескладних перетворень можуть бути подані у вигляді рівнянь різниці:

$$v_{C1}(n+1) = v_{C1}(n) - i_{L1}(n) \frac{\Delta t}{C_1} + i_{L2}(n) \frac{\Delta t}{C_1} - \frac{\Delta t K_2}{C_1 K_1} v_{C1}(n) + \frac{\Delta t K_2 R_L}{C_1 K_1} i_{L1}(n), \quad (15)$$

$$i_{L1}(n+1) = i_{L1}(n) + \frac{\Delta t}{K_1} v_{C1}(n) - \frac{\Delta t R_L}{K_1} i_{L1}(n), \quad (16)$$

де n — номер ітерації.

Рівняння (15) і (16) разом — це математична модель дискретного часу першого контуру принципової схеми штучної довгої лінії (див. рис. 1). Виконуючи всі окреслені раніше кроки можна отримати математичну модель дискретного часу для всіх інших контурів принципової схеми на рис. 1; причому рівняння будуть однакові для контурів, починаючи з другого до останнього. Це впливає, як уже зазначалося, з однорідності штучної довгої лінії.

Отже, рівняння подібні (15) і (16) для всіх інших контурів, окрім першого, будуть мати такий вигляд:

$$v_{Ci}(n+1) = v_{Ci}(n) - i_{Li}(n) \frac{\Delta t}{C_i} + i_{Li+1}(n) \frac{\Delta t}{C_i}, \quad (17)$$

$$i_{Li}(n+1) = i_{Li}(n) + v_{Ci}(n) \frac{\Delta t}{L} - v_{Ci-1}(n) \frac{\Delta t}{L}, \quad (18)$$

де i — порядковий номер контуру.

Система рівнянь різниці (15), (16), (17) і (18) являє собою математичну модель дискретного часу для штучної довгої лінії під час її розряджання на узгодженому навантаженні. Ця система рівнянь є дуже зручною для її реалізації в будь-якому середовищі програмування; у статті як середовище вибрано середовище Matlab.

Перейдемо до перевірки працездатності комп'ютерної моделі, поданої системою рівнянь (15), (16), (17) і (18). Для цього виконаємо комп'ютерне моделювання штучної довгої лінії, зображеної на рис. 1, скориставшись розробленою моделлю для ситуації, що має просте фізичне пояснення. Такою ситуацією, наприклад, є та, в якій демпфувальний резистор R_D дорівнює 10 мОм, що відповідає відсутності цього резистора, а ємність C_1 має те саме значення, як і інші ємності. У цьому разі імпульс напруги на узгодженому навантаженні повинен мати добре відомий із літературних джерел вигляд із сплеском напруги на початку імпульсу приблизно 12% від амплітуди імпульсу.

Початковими умовами для імітаційного комп'ютерного моделювання було вибрано такі: кількість секцій у штучній довгій лінії 10, попередній заряд ємностей становить 10 В, хвильовий опір довгої лінії є 60 Ом, індуктивність усіх котушок — 60 мкГн. Значення всіх ємностей конденсаторів вибрано так, щоб для вказаної індуктивності хвильовий опір лінії становив 60 Ом. Штучна довга лінія розряджається на узгодженому опорі, що дорівнює 60 Ом.

Для наведених обставин та початкових умов імпульс на виході штучної довгої лінії зображено на рис. 2.

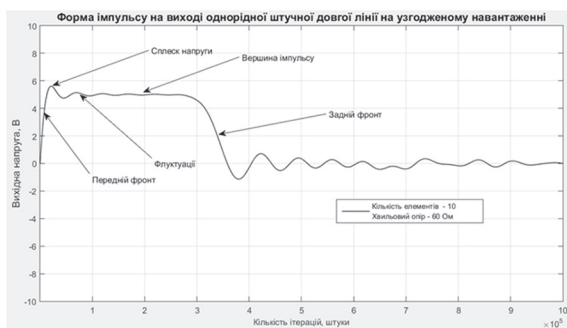


Рис. 2. Імпульс на виході однорідної штучної довгої лінії на узгодженому навантаженні

Головними висновками є те, що модель повністю працездатна і демонструє наявність сплеску напруги та флюктуації на вершині імпульсу, які є небажаними і потребують заходів щодо їх зменшення. Як уже зазначалося, у статті для їх усунення пропонується використовувати демпфувальний резистор R_D та налаштування величини ємності C_1 . Саме це буде розглянуто далі.

Відшукання за допомогою розробленої комп'ютерної моделі оптимальних значень демпфувального резистора індуктивності та ємності першого каскаду штучної довгої лінії

Спробуємо спочатку знайти фізичне пояснення зазначених проблем із вершиною імпульсу. Сплеск напруги біля переднього фронту імпульсу (див. рис. 2) спричинюють процеси в індуктивності L_1 штучної довгої лінії на рис. 1. Це може пояснюватися так: коли струм, утворений першою ємністю, під час процесу розряджання починає різко спадати, падіння напруги на індуктивності L_1 змінює полярність та додається до напруги на ємності C_1 . Саме цей ефект створює сплеск напруги на початку імпульсу. Отже, є цілком доречним припустити, що демпфувальний резистор, під'єднаний паралельно до індуктивності, зменшить цей сплеск напруги. Водночас, цей резистор впливає не тільки на амплітуду флюктуації під час розряджання, а й на середнє значення наростання напруги. Додатково змінюючи ємність C_1 , можливо впливати тільки на амплітуду флюктуацій і не торкатися середнього значення зростання напруги. Тож стає реальним коригування переднього фронту імпульсу та його вершини в передній частині завдяки цим двом елементам. Розроблена модель, через свою варіативність, дуже добре пристосована для розв'язання цих задач.

Знаходження оптимального значення під час варіації двох параметрів є достатньо складним і тривалим процесом; тому в статті викладено тільки результати кінцевої стадії цієї процедури. Було встанов-

Аналіз кривої (див. рис. 2) дає можливість діяти таких висновків:

- імпульс напруги на виході штучної довгої лінії має типову форму, добре відому з літературних джерел, що демонструє валідність розробленої комп'ютерної моделі;
- як і зазначалося, імпульс має сплеск напруги біля переднього фронту імпульсу, який становить майже 12,4% від амплітуди імпульсу, та флюктуації на вершині імпульсу;
- амплітуда імпульсу становить приблизно 5 В, що відповідає ситуації узгодженого навантаження, коли напругу лінії поділено на два.

лено, що оптимальні (але різні) значення ємності C_1 можна здобути для кількох певних фіксованих значень резистора R_D . Найбільш вдалим виявилось значення R_D , що в 1,7 раза перевищує хвильовий опір лінії. Саме для цього значення опору резистора R_D і відбувався вибір оптимального значення ємності C_1 .

Імпульс на виході штучної довгої лінії для того самого значення ємності C_1 , що і для інших елементів лінії, ілюструє рис. 3. Надалі ємність тільки зростала і набирала значень, поданих у таблиці і виражених відносно ємності інших елементів лінії C . У збільшеному масштабі наведено на рис. 4, рис. 5, рис. 6, рис. 7 і рис. 8.

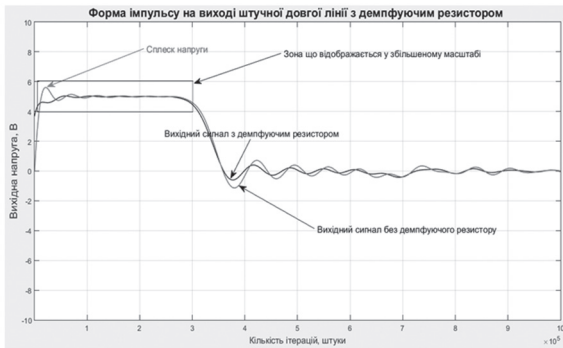


Рис. 3. Імпульс на виході штучної довгої лінії з демпфувальним резистором $1,7 R_L$ та ємністю першого каскаду C



Рис. 4. Вершина імпульсу на виході штучної довгої лінії з демпфувальним резистором $1,7 R_L$ та ємністю першого каскаду C у збільшеному масштабі



Рис. 5. Вершина імпульсу на виході штучної довгої лінії з демпфувальним резистором $1,7 R_L$ та ємністю першого каскаду $1,1 C$ у збільшеному масштабі



Рис. 6. Вершина імпульсу на виході штучної довгої лінії з демпфувальним резистором $1,7 R_L$ та ємністю першого каскаду $1,2 C$ у збільшеному масштабі

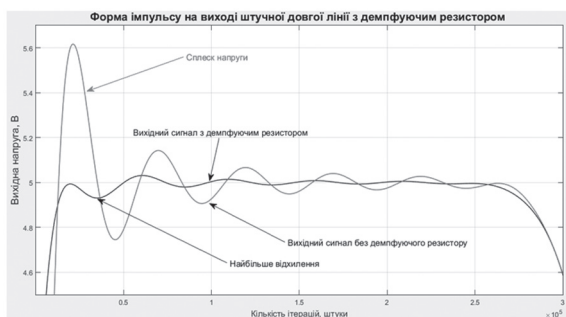


Рис. 7. Вершина імпульсу на виході штучної довгої лінії з демпфувальним резистором $1,7 R_L$ та ємністю першого каскаду $1,3 C$ у збільшеному масштабі

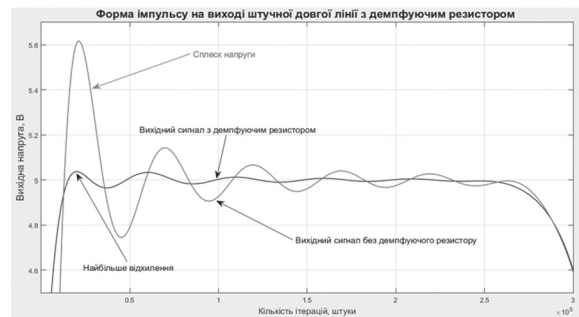


Рис. 8. Вершина імпульсу на виході штучної довгої лінії з демпфувальним резистором $1,7 R_L$ та ємністю першого каскаду $1,34 C$ у збільшеному масштабі

Значення максимальних абсолютних і відносних відхилень амплітуди імпульсу на виході штучної довгої лінії для різних значень ємності C_1

Значення ємності C_1 у першому контурі штучної довгої лінії	$1,0 C$	$1,1 C$	$1,2 C$	$1,3 C$	$1,34 C$
Абсолютне значення в точці максимального відхилення амплітуди, В	4,59	4,72	4,83	4,93	5,04
Максимальне абсолютне відхилення, В	0,41	0,28	0,17	0,07	0,04
Максимальне відносне відхилення, %	8	5,6	3,4	1,4	0,8

Частину імпульсу на рис. 3 позначено прямокутником для різних значень ємності C_1 . Саме ця частина є важливою для дослідження.

Аналіз даних, наведених у таблиці, та кривих, зображених на рис. 4, рис. 5, рис. 6, рис. 7 і рис. 8 дає змогу дійти таких висновків:

◆ зі зростанням ємності C_1 зменшується максимальне абсолютне та відносне відхилення амплітуди імпульсу на виході штучної довгої лінії від потрібного значення. Одночасно зменшується й амплітуда флуктуацій уздовж вершини імпульсу;

◆ мінімальне значення максимального абсолютного та відносного відхилення амплітуди імпульсу на виході штучної довгої лінії спостерігається для значення ємності C_1 , що становить $1,34 C$. Це мінімальне значення дорівнює $0,8\%$ від амплітуди імпульсу;

◆ застосування демпфувального резистора та налаштування ємності першого каскаду дає можливість зменшити у понад 12 разів максимальні відносні відхилення амплітуди імпульсу на виході штучної довгої лінії, що доводить високу ефективність та перспективність запропонованого методу.

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто процеси в штучних довгих лініях, які є складовою частиною імпульсних модуляторів. Для поліпшення форми імпульсу під час розряджання штучної довгої лінії через узгоджене навантаження запропоновано застосовувати демпфувальний резистор індуктивності першого каскаду лінії та налаштування ємності цього каскаду. Для вивчення ефективності запропонованого вирішення та виявлення оптимальних параметрів елементів розроблено комп'ютерну модель штучної довгої лінії. Ця модель дала можливість знайти оптимальні значення демпфувального резистора та ємності першого каскаду. Для таких оптимальних значень параметрів елементів максимальне відносне відхилення амплітуди від потрібного значення становить менш як 1% , що в 12 разів менше, ніж у звичайній однорідній штучній довгій лінії. З огляду на проведені дослідження покращена згідно із запропонованим підходом штучна довга лінія може бути використана в імпульсних модуляторах, що живлять підсилювачі потужності з жорсткими вимогами до відхилення значень напруги імпульсного джерела живлення, у телекомунікаційних мережах 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. doi.org/10.1201/b18677 (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. doi.org/10.7551/mitpress/1839.001.0001 (eng).

А. Г. Плющ, Н. В. Руденко

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ ИСКУССТВЕННАЯ ДЛИННАЯ ЛИНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ МОДУЛЯТОРОВ

Рассмотрены процессы в искусственных длинных линиях, которые являются составной частью импульсных модуляторов для усилителей мощности и автогенераторов. Проведенный анализ показывает, что обеспечение необходимой формы импульса при разряде линии через согласованную нагрузку является главной проблемой при ее разработке. Для изучения формы указанного импульса используется имитационное компьютерное моделирование процессов в линии. Разработанная компьютерная модель

однородной искусственной длинной линии позволяет установить, что выходной импульс такой линии при разряде на согласованной нагрузке имеет нежелательные всплески напряжения и флюктуации в начале вершины импульса. Известно, что отмеченные недостатки формы импульса могут приводить к существенным отклонениям частоты и фазы колебаний в усилителе мощности, который питается от модулятора. Для устранения указанных недостатков предлагается использовать демпфирующий резистор, подключенный параллельно первой индуктивности линии, и соответствующая настройка величины первой емкости линии. С использованием разработанной модели искусственной длинной линии были установлены оптимальные величины сопротивления демпфирующего резистора и емкости первого конденсатора линии и было выявлено, что предложенный подход позволяет уменьшить максимальное относительное отклонение амплитуды импульса модулятора от ожидаемого значения в приблизительно 12 раз. С учетом проведенных исследований модернизированная приведенным образом искусственная длинная линия может быть использована в импульсных модуляторах, которые питают усилители мощности с жесткими требованиями к отклонениям значений напряжений импульсного источника питания, в телекоммуникационных сетях и радиолокации.

Ключевые слова: телекоммуникационные сети; имитационное компьютерное моделирование; импульсный модулятор; искусственная длинная линия; флюктуации амплитуды.

O. G. Pliushch, N. V. Rudenko

MODERNIZED ARTIFICIAL LONG LINE FOR PULSE MODULATORS

The paper considers processes in artificial long lines, which are a constituent part of the pulse modulators for power amplifiers and generators. Analysis, which was carried out in the paper, shows that securing required form of the pulse during the artificial long line discharge over the matched impedance is the main problem in this line design and modernization. To study the form of the mentioned pulse, computer simulation of the processes in the line is used. The designed computer model of homogenous artificial long line allows one to establish that the output pulse of such a line during the discharge over the matched impedance has unwanted voltage overshoots and fluctuations at the beginning of the pulse top. It is known from different sources that revealed deficiencies of the pulse form can lead to the substantial deviations of the frequency and phase of the oscillations in the power amplifier that is fed by the modulator. To eliminate above-mentioned drawbacks, the paper proposes using damping resistor connected in parallel with the first inductance of the artificial long line and corresponding adjustment the value of the first capacitor of the line. By using designed model of the artificial long line, optimal values of the damping resistor and the first capacitor of the line were established, and it was revealed that proposed approach allows decreasing twelve times maximum relative deviation of the modulator pulse amplitude from the expected value. With account of the completed research, artificial long lines that are modernized in accordance with the proposed approach can be used in pulse modulators in telecommunication networks and radiolocation. They might be especially effective in those pulse modulators that supply power to the amplifiers with the strict requirements for the deviations of the voltage in pulse power supply.

Keywords: telecommunication networks; computer simulation; pulse modulator; artificial long line; amplitude fluctuations.

