



ІМІТАЦІЙНА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СИГНАЛІВ У КОАКСІАЛЬНОМУ КАБЕЛІ

Вступ. Досліджено процеси розповсюдження сигналів у коаксіальному кабелі як різновид довгих ліній. Вивчення таких процесів за допомогою аналітичних методів або з використанням натурного експерименту є доволі складним і недостатньо наочним. Метою роботи є розроблення імітаційної комп'ютерної моделі коаксіального кабелю у вигляді штучної довгої лінії та використання цієї моделі для дослідження процесів у лінії. Головну увагу приділено вивченню впливів неоднорідності в лінії та узгодженій передачі сигналу від джерела до навантаження з мінімальними втратами.

Методи. Використано методи імітаційного комп'ютерного моделювання й аналізу складних систем.

Результати. Для досягнення поставленої мети розв'язано завдання розроблення еквівалентної схеми коаксіального кабелю у вигляді штучної довгої лінії, яка містить джерело сигналу з певним внутрішнім опором, безпосередньо саму лінію з можливістю зміни її параметрів і навантаження; опису процесів у розробленій лінії за допомогою законів Ома та Кірхгофа у термінах диференціальних рівнянь безперервного часу; переходу від системи диференціальних рівнянь до рівнянь різниці з метою застосування їх в імітаційному комп'ютерному моделюванні; створення імітаційної комп'ютерної моделі на основі отриманої системи рівнянь різниці й випробування імітаційної комп'ютерної моделі у сценарії розповсюдження сигналів у довгій лінії з неоднорідністю. Отримані в роботі результати імітаційного комп'ютерного моделювання повністю узгоджуються з теоретичними уявленнями про процеси в довгих лініях у різних режимах їхнього функціонування. Ці результати дозволили кількісно та якісно, а головне наочно, оцінити вплив неоднорідності в лінії на оптимальну передачу в ній сигналів.

Висновки. Розроблену імітаційну комп'ютерну модель коаксіального кабелю у вигляді штучної довгої лінії можна використовувати в навчальному процесі у закладах вищої освіти відповідного профілю та для розроблення і вдосконалення цих пристроїв.

Ключові слова: імітаційна комп'ютерна модель, коаксіальний кабель, штучна довга лінія, неоднорідності в лінії, узгоджена передача сигналу.

Вступ

Швидке поширення телекомунікаційних та інформаційних технологій у всьому світі та в Україні свідчить про те, що лінії передачі продовжують відігравати важливу роль у цих технологічних застосуваннях (Frenzel, 2016; Siebert, 1986). Характеристики цих ліній мають відповідати тим, яких вимагає від них сучасне телекомунікаційне обладнання, щоб забезпечувати високоякісні комунікаційні зв'язки. До цих застосувань передачі даних належать такі: пересилання сигналу від передавача до антени та від антени до приймача, комп'ютерної інформації у локальній мережі, телефонних повідомлень, телевізійних сигналів у системах кабельного телебачення тощо (Frenzel, 2016).

Для забезпечення пересилання сигналів високої якості, лінія передачі має задовольняти дві основні вимоги. По-перше, вона повинна вносити мінімальне послаблення сигналів, і, по-друге, запобігати будь-якому випромінюванню сигналу у вигляді енергії на радіочастоті (Frenzel, 2016).

Серед основних ліній передачі, що використовуються в сучасних телекомунікаціях, найчастіше застосовують кручені пари, коаксіальні кабелі й оптичні лінії.

Математичні (аналітичні) обчислення для розроблення й вивчення ліній передачі є достатньо складними і незручними з огляду на багато причин (Frenzel, 2016; Siebert, 1986; Kluever, 2015). По-перше, відповідні імпеданси є комплексними й існує багато факторів, які потрібно враховувати. Як результат, обчислення з такими комплексними числами є довгими та вимагають багато витрат часу. До того ж, великий об'єм обчислень може призводити до появи помилок. По-друге, в коаксіальних лініях передачі існує багато процесів, які в принципі не можливо відтворити аналітичним методом. До таких процесів належать ті, що пов'язані з розповсюдженням сигналів уздовж лінії. Іншим підходом до дослідження розповсюдження сигналів у довгих лініях є проведення натурного експерименту. Але і в цьому випадку постають суттєві проблеми: серед них – великі витрати ресурсів та відсутність гнучкості (Frenzel, 2016; Siebert, 1986; Kluever, 2015).

Зважаючи на зазначене, в роботі пропонується використовувати імітаційне комп'ютерне моделювання для вивчення процесів розповсюдження сигналів у довгих лініях на основі коаксіальних кабелів, яке, як показують результати дослідження, має безсумнівні переваги над зазначеними вище підходами.

Постановка задачі. Як уже вказано, коаксіальний кабель є тією лінією передачі, яку найчастіше використовують у телекомунікаційних застосуваннях. Він зазвичай складається з мідного твердого центрального провідника, оточеного діелектричним матеріалом. Таким матеріалом зазвичай є пластик або тефлон, як видно з рис. 1 (Frenzel, 2016).

Поверх ізолятора розміщено другий провідник або облєтєння, по-іншому відомий як екран, що складається з переплетених тонких мідних дротів. Наявна зовнішня пластикова оболонка, що захищає механічно, а також електрично ізолює облєтєння. Такі коаксіальні кабелі можуть мати різні розміри залежно від їхнього призначення та конструкції.

Одним із шляхів дослідження розповсюдження сигналів у коаксіальному кабелі є проведення натурного експерименту, але цей підхід занадто дорогий і недостатньо гнучкий, ще й потребує певного часу.

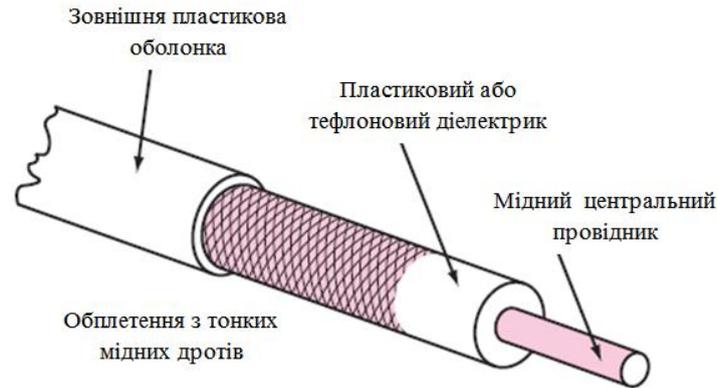


Рис. 1. Типова конструкція коаксіального кабелю

Іншим шляхом вивчення процесів передачі сигналів у коаксіальному кабелі є аналітичний підхід. У цьому методі зазвичай розглядають електромагнітні властивості кабелю. Коли протяжність кабелю є більшою за кілька довжин хвиль на частоті сигналу, центральний мідний провідник та обплетення, як два паралельні провідники, створюють комплексний імпеданс. Ці провідники являють собою послідовно включену індуктивність (L), вплив якої суттєвий особливо на високих частотах. Послідовно із цією індуктивністю існує опір центрального провідника та обплетення (R), які характеризуються внутрішнім омичним опором і тим, що утворюється за рахунок поверхневого ефекту. До того ж, паралельно підключені центральний провідник та обплетення утворюють розподілену ємність (C), в якій як діелектрик виступає пластик або тефлон між провідниками. Додатково наявний опір витoku або провідність (G) поперек кабелю, як результат недосконалостей ізоляції між провідниками. В результаті, для високочастотних сигналів, лінія передачі постає як фільтр низьких частот, що складається з послідовних індуктивностей і резисторів, а також паралельних, або тих, що шунтують, резисторів і конденсаторів. Таке представлення коаксіального кабелю відоме як еквівалентна схема розподіленої лінії із зосередженими параметрами (рис. 2) (Frenzel, 2016).

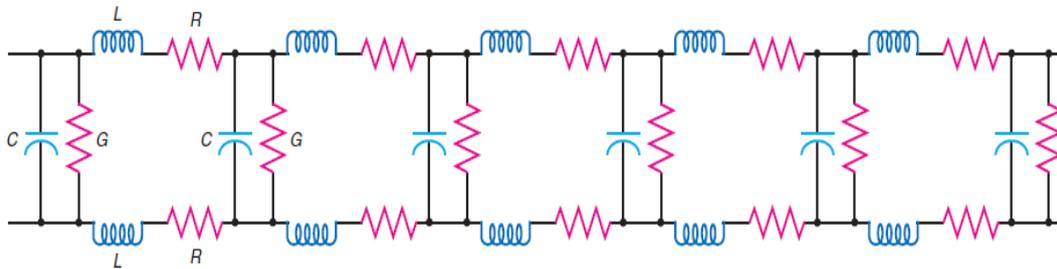


Рис. 2. Еквівалентна схема коаксіального кабелю із зосередженими параметрами

За використання добре відомого аналітичного підходу для лінії, зображеної на рис. 2, існує рішення у вигляді телеграфних рівнянь. Проблема з телеграфними рівняннями полягає в тому, що, хоча вони добре працюють для однорідної лінії, проте не доволі зручні для вивчення впливів різних типів неоднорідності на процеси розповсюдження сигналів.

Отже, постає задача пошуку простого, ефективного та наочного методу дослідження процесів розповсюдження сигналів у довгій лінії з неоднорідністю.

Методи

З огляду на зазначене, в роботі для розв'язання вказаної задачі запропоновано використовувати метод імітаційного комп'ютерного моделювання. Як допоміжний, використовується метод аналізу складних систем та отримання їх спрощеного представлення.

Початковою точкою розроблення моделі є схема, зображена на рис. 2. Враховуючи всі можливі параметри коаксіального кабелю, її можливо спростити. Індуктивності L , активні опори R та ємності C доцільно об'єднати в більшій еквівалентні елементи. Паралельні резистори витoku ($1/G$) мають достатньо великий опір і тому їхній вплив вважається несуттєвим і може бути проігнорованим. В результаті ми отримуємо спрощену схему (рис. 3).

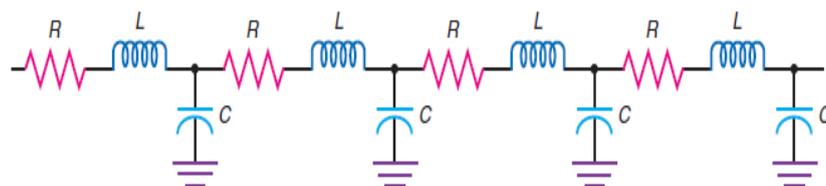


Рис. 3. Спрощена еквівалентна схема коаксіального кабелю із зосередженими параметрами

Потрібно зробити кілька зауважень щодо послідовного опору провідників R . На коротких ділянках, цим опором можна знехтувати тому, що він є дуже малий. На великих відстанях, однак, цей опір може призводити до значного послаблення сигналу.

Головний вплив на процеси в коаксіальному кабелі мають індуктивність L та ємність C (рис. 2 та 3), і на практиці саме вони визначають його характеристики.

Якщо підключити еквівалентну схему з рис. 3 до джерела сигналу U_S , то це джерело сигналу буде навантажено на імпеданс, що є функцією індуктивності, активного опору та ємності в ланцюзі. Цей імпеданс відомий як хвильовий або характеристичний. Коли припустити, що тривалість лінії є нескінченною, цей імпеданс є активним. Вказаний характеристичний опір буде також суто активним, якщо лінія кінцевої тривалості є навантаженою на резистор, що дорівнює характеристичному опору лінії.

Окреслений вище характеристичний опір Z_0 визначають за формулою

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

де Z_0 обчислюють в омах, L – індуктивність коаксіальної лінії передачі для заданої довжини лінії, C – ємність лінії для тієї самої довжини.

Для звичайного під'єднання коаксіального кабелю, у майже всіх застосуваннях, внутрішній опір джерела живлення R_S , характеристичний опір кабелю Z_0 та опір навантаження однакові, тобто $R_S = R_L = Z_0$. Як відомо, в цьому випадку задовольняється критерій для передачі максимальної потужності від джерела до навантаження через коаксіальний кабель.

З огляду на зазначене вище застосовують для моделювання процесів розповсюдження сигналів у коаксіальному кабелі еквівалентну схему, зображену на рис. 4.

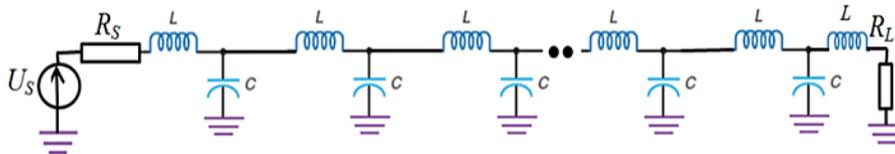


Рис. 4. Еквівалентна схема коаксіального кабелю у вигляді штучної довгої лінії

На рис. 4 коаксіальний кабель представлено у вигляді штучної довгої лінії. Нагадаємо, що на зазначеній схемі U_S позначає джерело сигналу, R_S – внутрішній опір джерела сигналу та R_L – опір джерела навантаження.

Для дослідження процесів у еквівалентній схемі (рис. 4) використовують її імітаційну комп'ютерну модель. Першим кроком на шляху її створення є опис схеми в термінах диференціальних рівнянь безперервного часу.

Попередній аналіз еквівалентної схеми коаксіального кабелю дозволяє дійти таких висновків:

- усі наявні контури у схемі є однотипними за виключенням першого й останнього, що значно спрощує її опис;
- наявні тільки три типові елементи електричних ланцюгів: R , L , та C .

Розглянемо спочатку співвідношення між струмами й напругами для зазначених вище елементів R , L , та C . З літературних джерел відомо (Siebert, 1986), що вони такі:

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

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

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

Рівняння (1) висвітлює зв'язок між струмом і напругою для активного резистора, співвідношення (2) демонструє зазначений зв'язок для ємності, а співвідношення (3) – для індуктивності.

Математичну модель для опису процесів у таких ланцюгах можна отримати за допомогою процедури, наведеної в роботі (Kluever, 2015):

По-перше, потрібно записати відповідні звичайні диференціальні рівняння першого порядку для кожного з елементів що запасують енергію (ємність та індуктивність). Динамічними змінними для цих диференціальних рівнянь будуть або напруга $v_C(t)$ (для ємності) або струм $i_L(t)$ (для індуктивності).

По-друге, необхідно використати закони Кірхгофа, щоб обчислити невідомі напруги та струми через динамічні змінні, пов'язані з елементами зберігання енергії ($v_C(t)$ або $i_L(t)$) та джерела струму і напруги (за наявності).

Розглянемо процес формування математичної моделі для першого (лівого) контуру принципової схеми на рис. 4.

Застосування закону Кірхгофа для напруги для першого контуру приводить до такого рівняння:

$$U_S(t) = v_{R_S}(t) + v_L(t) + v_C(t). \tag{4}$$

Використання закону Кірхгофа для струму для точки з'єднання першої та другої індуктивностей, а також першої ємності, дозволяє отримати формулу

$$i_L(t) = i_{L_2}(t) + i_{C_1}(t). \tag{5}$$



Перейдемо до опису сигналів у контурах з 2-го по $(N - 1)$, де N – загальна кількість контурів. Застосування закону Кірхгофа для напруги для цих контурів приводить до рівняння

$$v_{C_{i-1}}(t) = v_{L_i}(t) + v_{C_i}(t), \quad (6)$$

де i позначає номер контуру.

Використання аналогічним чином закону Кірхгофа для струмів для контурів з 2-го по $N - 1$ дозволяє отримати формулу

$$i_{L_i}(t) = i_{L_{i+1}}(t) + i_{C_i}(t). \quad (7)$$

Перейдемо до останнього контуру. Отримані подібним чином аналогічні вирази для напруг і струмів матимуть вигляд

$$v_{C_{N-1}}(t) = v_{L_N}(t) + v_{R_L}(t), \quad (8)$$

$$i_{L_N}(t) = i_{R_L}(t). \quad (9)$$

Наступним кроком підставимо в рівняння (4), (5), (6), (7), (8) та (9) замість струмів на конденсаторах, та напруг на індуктивностях, вирази з (2) та (3), що пов'язують ці параметри відповідно з напругами та струмами на цих елементах. Додатково, похідні від відповідних струмів і напруг перенесемо в ліву частину відповідного рівняння, а всі інші складові – у праву.

В результаті цих процедур отримуємо рівняння для першого контуру:

$$L_1 \frac{di_{L_1}(t)}{dt} = U_S(t) - R_S i_{L_1}(t) - v_{C_1}(t), \quad (10)$$

$$C_1 \frac{dv_{C_1}(t)}{dt} = i_{L_1}(t) - i_{L_2}(t); \quad (11)$$

для контурів від другого до передостаннього:

$$L_i \frac{di_{L_i}(t)}{dt} = v_{C_{i-1}}(t) - v_{C_i}(t), \quad (12)$$

$$C_i \frac{dv_{C_i}(t)}{dt} = i_{L_i}(t) - i_{L_{i+1}}(t); \quad (13)$$

для останнього:

$$L_N \frac{di_{L_N}(t)}{dt} = v_{C_{N-1}}(t) - R_L i_{L_N}(t), \quad (14)$$

$$v_{R_L}(t) = R_L i_{L_N}(t). \quad (15)$$

В рівняннях (10) та (15) враховано закон Ома для активного резистора. Загалом, рівняння (10), (11), (12), (13), (14) та (15) є математичною моделлю у вигляді диференціальних рівнянь безперервного часу, що описує процеси в еквівалентній схемі коаксіального кабелю у вигляді штучної довгої лінії, яка зображена на рис. 4.

Для використання у вигляді імітаційної комп'ютерної моделі розроблену вище модель потрібно перетворити із системи диференціальних рівнянь на систему рівнянь різниці, тобто перейти до дискретного часу. Одним із можливих варіантів такого переходу є застосування формули Ейлера (Siebert, 1986), що передбачає заміну кожної похідної її приблизним значенням відповідно до формули

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}. \quad (16)$$

З урахуванням (16) рівняння (10), (11), (12), (13), (14) та (15) можна представити як

$$i_{L_1}(n+1) = i_{L_1}(n) + \frac{\Delta t}{L_1} (U_S(n) - R_S i_{L_1}(n) - v_{C_1}(n)), \quad (17)$$

$$v_{C_1}(n+1) = v_{C_1}(n) + \frac{\Delta t}{C_1} (i_{L_1}(n) - i_{L_2}(n)), \quad (18)$$

$$i_{L_i}(n+1) = i_{L_i}(n) + \frac{\Delta t}{L_i} (v_{C_{i-1}}(n) - v_{C_i}(n)), \quad (19)$$

$$v_{C_i}(n+1) = v_{C_i}(n) + \frac{\Delta t}{C_i} (i_{L_i}(n) - i_{L_{i+1}}(n)), \quad (20)$$

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

$$v_{R_L}(n) = R_L i_{L_N}(n). \quad (22)$$

В рівняннях (17)–(22) n позначає номер ітерації, а Δt – дискретний крок налаштування. Загалом ці вирази являють собою систему рівнянь різниці, яка описує процеси в розробленій еквівалентній схемі коаксіального кабелю. Вони і можуть бути використані для створення імітаційної комп'ютерної моделі згідно з метою роботи.



Отримані рівняння (17)–(22) є дуже зручними для побудови імітаційної комп'ютерної моделі штучної довгої лінії. По-перше, вони являють собою рекурентні формули, які просто реалізуються у вигляді циклічних операцій на будь-якій мові програмування. По-друге, за винятком першого й останнього контурів, виконуються типові операції над різними даними. Це дозволяє організувати цикл обчислень по елементах лінії. Як результат зазначеного, рівняння (17)–(22) можуть бути достатньо просто реалізовані шляхом використання вкладених циклів за кількістю ітерацій і кількістю елементів лінії для будь-яких їхніх значень. Величини всіх напруг і струмів у штучній довгій лінії можна представити у вигляді двовимірних масивів, що спрощує їхній опис і дозволяє виокремлювати для аналізу будь-які з них залежно як від ітерацій, так і від номерів елементів. Наявність цих даних дозволяє отримувати в динаміці картину розповсюдження сигналу в лінії.

У розробці моделі враховано можливість варіювати формою та амплітудою сигналу джерела U_S на рис. 4, значенням внутрішнього опору цього джерела R_S , значенням опору навантаження R_L . Це створює широкий спектр варіантів для випробування створеної моделі в різних ситуаціях і по входу, і по виходу лінії.

Значення ємностей та індуктивностей штучної довгої лінії на рис. 4 також можна представити у вигляді одновимірних масивів або векторів. Це дозволить легко й оперативно змінювати їхні значення та вносити різні неоднорідності в лінію з метою дослідження їхнього впливу.

Як середовище програмування в роботі вибрано середовище Matlab, зважаючи на його наочні переваги для технічних обчислень (Gordon, & Guilfoos, 2017; Priemer, 2013).

Розроблена в роботі імітаційна комп'ютерна модель завдяки своїй універсальності може використовуватися для досліджень процесів у штучній довгій лінії у різних режимах роботи. Штучну лінію в ній можна навантажити на нульовий опір або залишити розімкнутою, зробити однорідною або з неоднорідністю тощо.

Результати

З огляду на поставлену мету, в роботі пропонується дослідити процеси у штучній довгій лінії для наведеного нижче сценарію функціонування еквівалентної схеми з рис. 4. Кількість елементів у лінії дорівнює 100. Джерело сигналу формує прямокутний імпульс амплітудою -20 В і має внутрішній опір $R_S = 50$ Ом. Перші 70 елементів лінії мають характеристичний опір 50 Ом, водночас інші 30 елементів – 75 Ом. Такий тип неоднорідності може виникнути, якщо коаксіальний кабель із хвильовим опором 50 Ом нароцують випадково коаксіальним кабелем із хвильовим опором 75 Ом. Загалом штучна довга лінія навантажена на активний опір $R_L = 75$ Ом. Отже лінія є узгодженою по входу та виходу, але має неоднорідність на 71-му елементі.

Для забезпечення вказаних параметрів лінії, значення індуктивності для перших 70 елементів $L = 0,1$ мкГн, а ємність розраховується з урахуванням забезпечення потрібного характеристичного опору 50 Ом. Для елементів лінії з 71 до 100 значення індуктивності збільшується в 9 разів, а ємності – у 4 рази, що веде до отримання характеристичного опору для цих елементів 75 Ом.

Випробування імітаційної комп'ютерної моделі для штучної довгої лінії (рис. 4) дозволило отримати результати, наведені далі.

На рис. 5 зображено напругу джерела сигналу, що розповсюджується в лінії на перших 70 елементах.

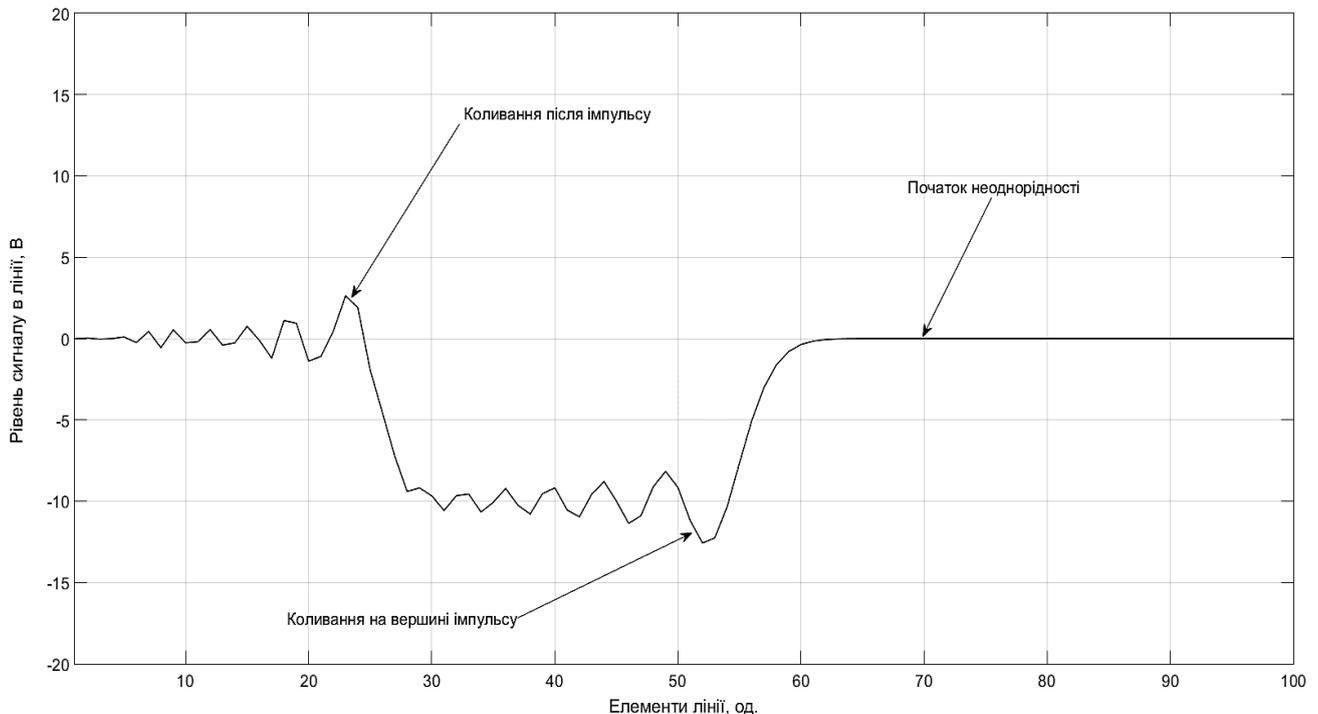


Рис. 5. Крива сигналу в лінії на перших 70 елементах



З рис. 5 бачимо, що середній рівень напруги в лінії становить 10 В. Це відповідає теоретичним уявленням про функціонування лінії, оскільки при узгодженні джерела з лінією напруга джерела, яка становить -20 В, розподіляється порівну між внутрішнім опором джерела та характеристичним опором лінії. На вершині імпульсу та після нього спостерігаються осциляції, що згасають; це теж є типовим під час розповсюдження імпульсу сигналу у штучній довгій лінії (а також у коаксіальному кабелі).

Рис. 6 ілюструє криву сигналу в лінії при стиканні імпульсу з неоднорідністю, яка починається з 71 елемента, а рис. 7 показує трансформацію імпульсу у процесі його проходження через фронт неоднорідності.

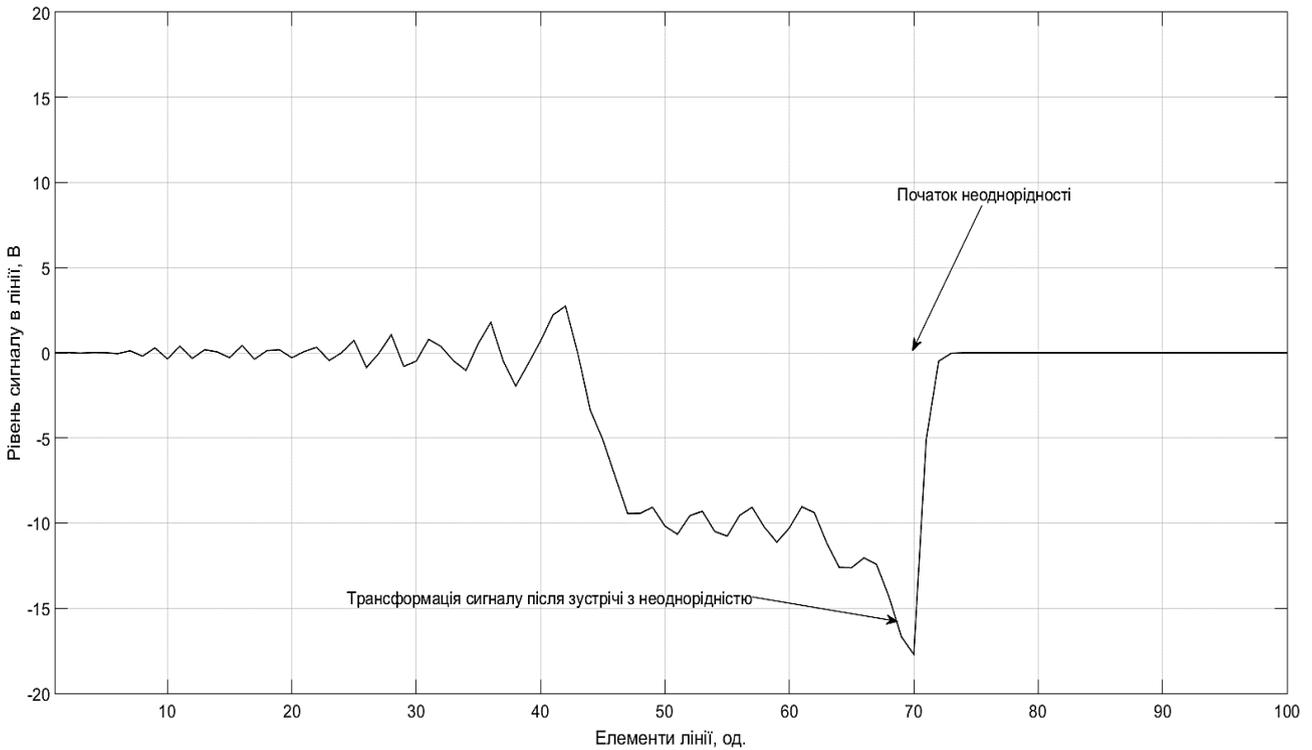


Рис. 6. Крива сигналу в лінії при стиканні з неоднорідністю

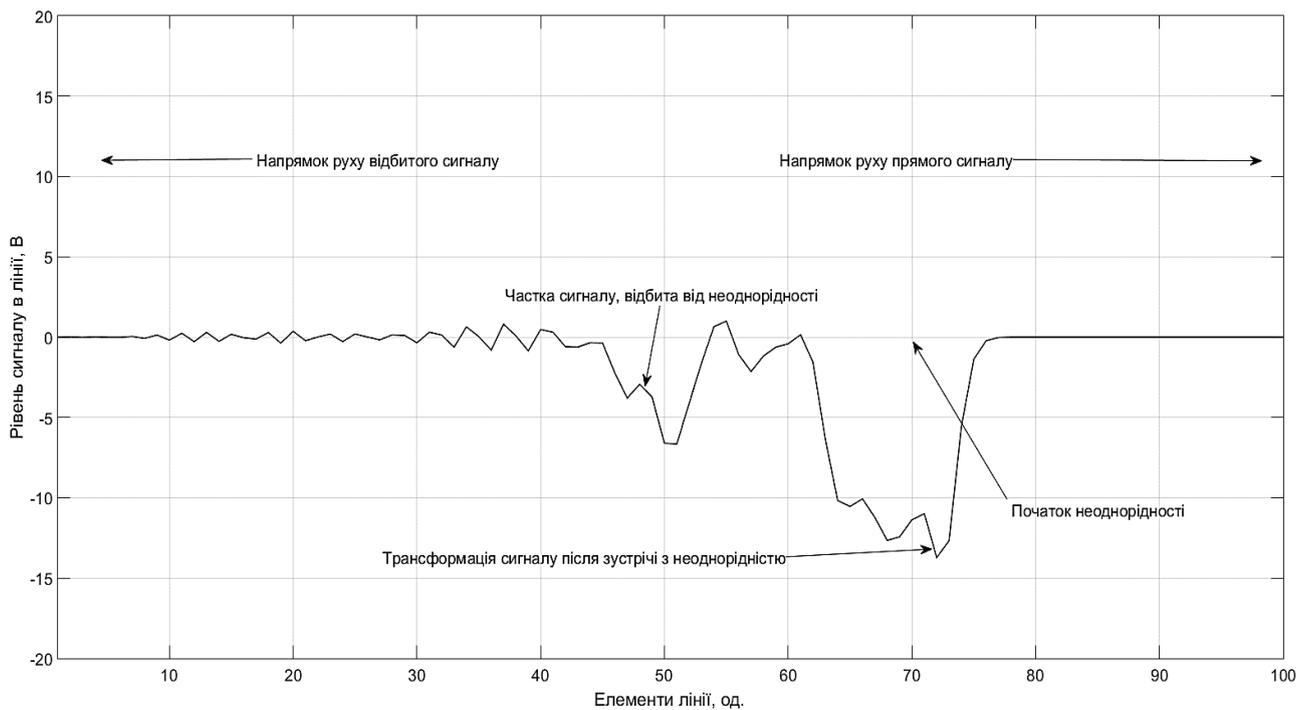


Рис. 7. Крива сигналу в лінії при проходженні через неоднорідність



Рис. 8 та 9 показують форму імпульсу відразу після проходження через неоднорідність і через певний час після цього.

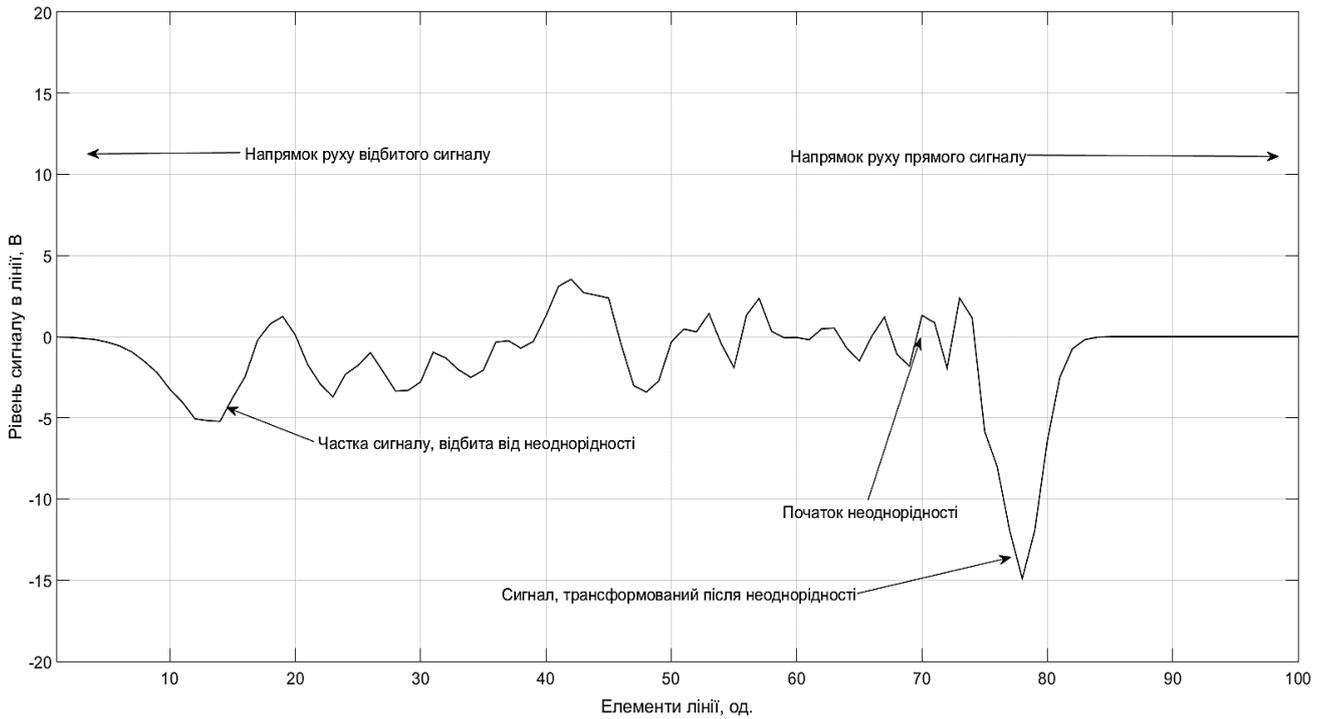


Рис. 8. Крива сигналу в лінії відразу після проходження через неоднорідність

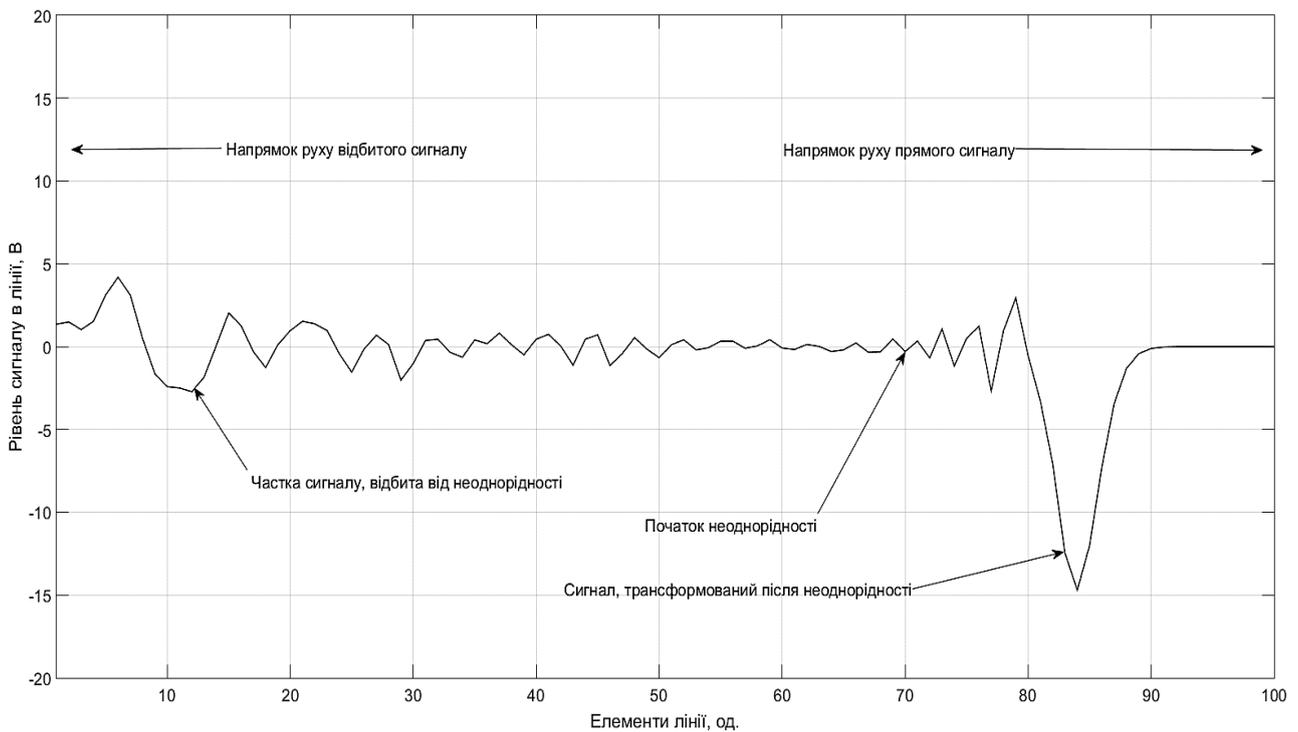


Рис. 9. Крива сигналу в лінії через певний час після проходження через неоднорідність

Як випливає з рис. 6 та 7, у разі стикання з неоднорідністю та при проходженні через неї відбувається трансформація форми імпульсу, а частка енергії імпульсу відбивається у зворотному напрямку до джерела сигналу.

Водночас, з кривих на рис. 8 та 9 випливає, що трансформований імпульс зберігає свою форму, а частка відбитої енергії імпульсу поглинається активним опором джерела.



Рис. 10 показує криву розповсюдження сигналу перед його падінням на навантаження, а рис. 11 – криву сигналу в часі на навантаженні лінії.

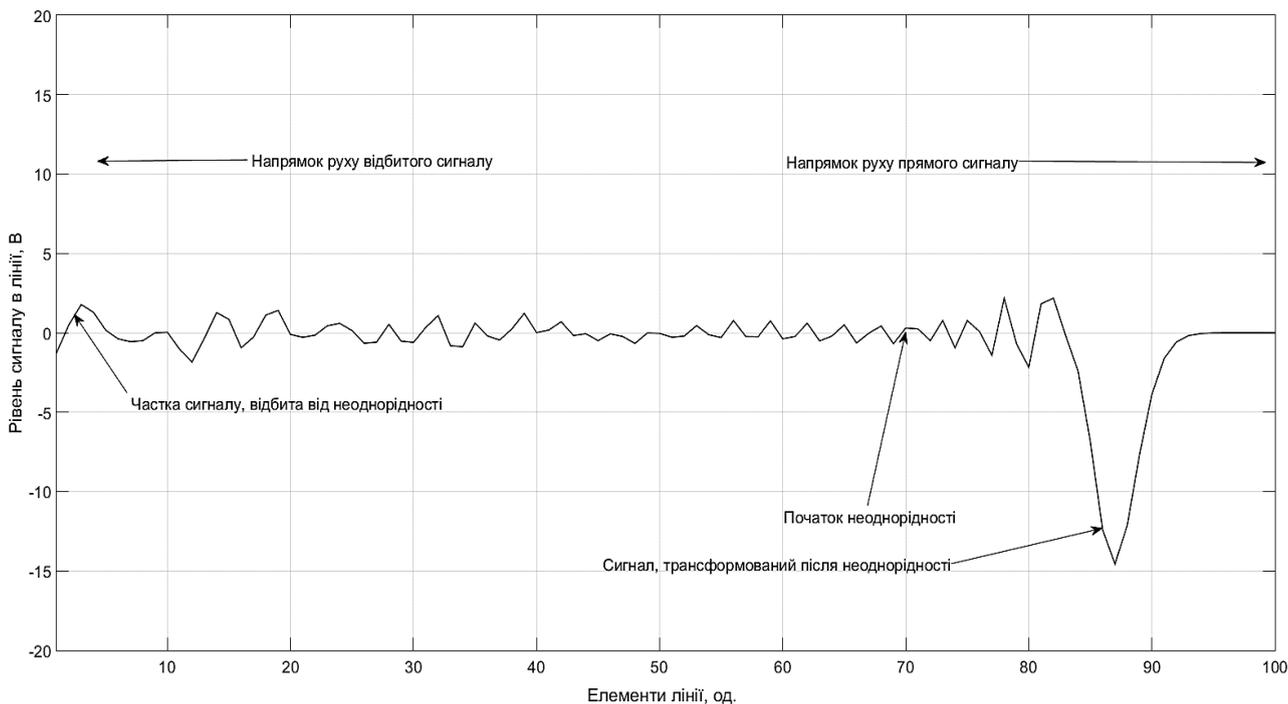


Рис. 10. Крива сигналу в лінії при його надходженні на навантаження

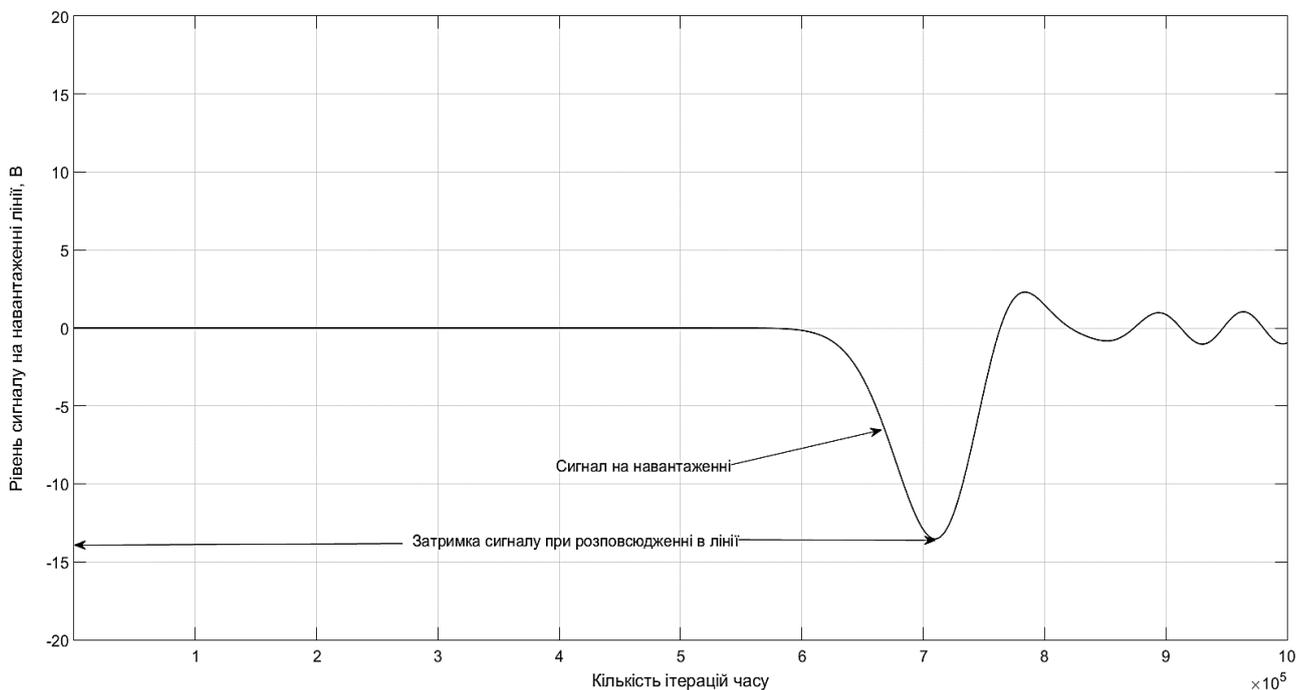


Рис. 11. Крива сигналу на навантаженні лінії

З аналізу кривих, представлених на рис. 5–11, доходимо таких висновків:

- В однорідній лінії у процесі розповсюдження сигналу його форма не змінюється, як впливає з рис. 5, 8 та 9:
 - у разі проходження через неоднорідність, якою в цьому випадку є зміна характеристичного опору лінії з 50 Ом на 75 Ом, частина енергії сигналу відбивається від неї та поширюється у зворотному напрямку до джерела сигналу, як показано на рис. 7–10;
 - у процесі проходження сигналу через неоднорідність змінюється форма імпульсу так, що за переходу з менших погонних значень ємності й індуктивності (на одиницю довжини) до більших, його тривалість стає коротшою у кількість разів, що дорівнює кореню квадратному з добутку зростають погонних значень цих елементів;



▪ за переходу від ділянки лінії з меншим характеристичним опором до ділянки з більшим характеристичним опором амплітуда імпульсу зростає відповідно до співвідношення цих імпедансів з урахуванням втрат на неоднорідності.

Зазначені процеси розповсюдження сигналу імітаційна комп'ютерна модель показує в динаміці, що неможливо відобразити на папері або отримати аналітично. Усі отримані криві та висновки з них не суперечать фізичним уявленням про процеси відомі з теорії довгих ліній. Визначальною характеристикою запропонованої імітаційної моделі є те, що вона дозволяє у подробицях та наочно вивчити вплив неоднорідності в лінії.

Висновки

В роботі запропоновано підхід до вивчення процесів розповсюдження сигналів в коаксіальному кабелі. Цей підхід базується на побудові імітаційної комп'ютерної моделі коаксіального кабелю як штучної довгої лінії. Процес розроблення цієї імітаційної моделі складається з чотирьох послідовних етапів. На першому етапі створюється еквівалентна схема коаксіального кабелю у вигляді штучної довгої лінії. На другому здійснюється опис процесів у розробленій еквівалентній схемі за допомогою законів Ома та Кірхгофа у термінах диференціальних рівнянь безперервного часу. Наступний етап присвячено переходу від безперервного часу до дискретного й отриманню системи рівнянь різниці. На останньому етапі одержана система рівнянь різниці перетворюється на імітаційну комп'ютерну модель у середовищі Matlab.

Проведено дослідження процесів за допомогою розробленої імітаційної моделі в коаксіальному кабелі для певного сценарію передачі сигналів. Аналіз результатів дослідження доводить валідність імітаційної моделі та її відповідність теоретичним положенням теорії довгих ліній. Виграшним моментом розробленої моделі є те, що вона з високою точністю та наочною відображає динамічні процеси, які відбуваються у штучній довгій лінії.

На думку авторів, зазначену модель можна ефективно використовувати для розроблення й удосконалення довгих ліній передачі та в навчальному процесі у закладах вищої освіти за напрямом "Телекомунікації та радіотехніка".

Внесок авторів: Олександр Плющ – розроблення методів і методології дослідження, опис результатів і написання висновків; Андрій Большаков – огляд літературних джерел, збір емпіричних даних і проведення емпіричних досліджень.

Список використаних джерел

- Frenzel, Jr. (2016). *Principles of electronic communication systems* (4th ed.). McGraw-Hill Education. New York.
Gordon, S., I. & Guilfoos, B. (2017). *Introduction to Modeling and Simulation with MATLAB and Python*. CRC Press Taylor & Francis Group.
Kluever, C., A. (2015). *Dynamic systems: Modeling, Simulation and Control*. John Wiley and Sons, MA.
Priemer, R. (2013). *MATLAB for Electrical and Computer Engineering Students and Professionals with Simulink*. SciTech Publishing, NJ.
Siebert, W. McS. (1986). *Circuits, Signals, and Systems*. Cambridge. McGraw-Hill Book Company, MA. doi.org/10.7551/mitpress/1839.001.0001.

References

- Frenzel, Jr. (2016). *Principles of electronic communication systems* (4th ed.). McGraw-Hill Education. New York.
Gordon, S., I. & Guilfoos, B. (2017). *Introduction to Modeling and Simulation with MATLAB and Python*. CRC Press Taylor & Francis Group.
Kluever, C., A. (2015). *Dynamic systems: Modeling, Simulation and Control*. John Wiley and Sons, MA.
Priemer, R. (2013). *MATLAB for Electrical and Computer Engineering Students and Professionals with Simulink*. SciTech Publishing, NJ.
Siebert, W. McS. (1986). *Circuits, Signals, and Systems*. Cambridge. McGraw-Hill Book Company, MA. doi.org/10.7551/mitpress/1839.001.0001.

Отримано редакцією журналу / Received: 05.11.22
Прорецензовано / Revised: 15.11.22
Схвалено до друку / Accepted: 20.11.22

Oleksandr PLIUSHCH, DSc (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-5310-0660
e-mail: oleksandr.pliushch@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Andrii BOLSHAKOV, Student
ORCID ID: 0000-0002-4613-8545
e-mail: andrii.bolshakov@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

COMPUTER SIMULATION MODEL OF SIGNAL PROPAGATION PROCESSES IN COAXIAL CABLE

Background. *The paper studies processes of signal propagation in a coaxial cable as a type of artificial long lines. Utilization of analytical methods as well as natural experiments for analyzing these processes is rather difficult and not sufficiently descriptive. The aim of the paper is to develop a simulation computer model of coaxial cable represented as an artificial long line and to use this model for studying processes in it. Main attention is paid to clarify impact of irregularities in the line and matched signal transmission from the source to the load with minimal losses.*

Methods. *Methods of computer simulation as well as complex systems analysis are used.*

Results. *To achieve the set goal, the paper solves the tasks of a coaxial cable equivalent circuit design as an artificial long line, which includes signal source with a certain internal impedance, the line itself with a possibility to vary its parameters and the load; representation of the processes in the developed line with the help of Ohm's and Kirchhoff's laws in terms of differential equations of continuous time; transition from the system of differential equations to the one of difference in order to use them for computer simulation; design of a computer simulation model on the base of the obtained system of difference equations; and trial of the computer simulation model in the scenario of signal propagation in the long line with irregularities. Computer simulation results that are obtained in the paper completely correspond to the theoretical notions related to the processes in long lines in different modes of their operation. The results have allowed one to assess numerically and qualitatively, and most importantly descriptively, impact of irregularities in the line on the optimal signal transmission in it.*

Conclusions. *Developed computer simulation model of a coaxial cable as an artificial long line can be used for tuition processes at universities and for design and modernization of these devices.*

Keywords: *simulation computer model, coaxial cable, artificial long line, line irregularities, matched signal transmission.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.