

УДК 621.372

О. М. Заславський, к. т. н.; А. В. Сущевський

**АДАПТИВНА ЦИФРОВА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛІВ У ДОВГИХ ЛІНІЯХ ТА РОЗГАЛУЖЕНИХ PL-МЕРЕЖАХ**

*На основі телеграфних рівнянь Хевисайда розроблено цифрову модель процесів розповсюдження високочастотних сигналів по розгалуженій деревоподібній мережі електропостачання багатоповерхової багатофункціональної будівлі. Запропоновано методику адаптації моделі до варіацій розташування джерел і приймачів сигналів. Розроблена модель забезпечує можливість у конкретних проектах PL-мереж обґрунтовано з погляду надійності й перешкодозахищеності інформаційної мережі вибирати місця розташування джерел, приймачів і ретрансляторів сигналів.*

**Ключові слова:** модель, сигнал, мережа, джерело, приймач, триполюсник, двополюсник, граф.

**Вступ**

Для сучасного періоду розвитку інтегрованих систем автоматизації характерним є істотне збільшення попиту на автоматизовані системи управління будівлями (АСУБ) і багатофункціональними спорудами (АСУБС).

Концепція побудови подібних систем полягає в інтеграції в єдину інженерну систему основних систем життєзабезпечення будівлі (електропостачання, освітлення, опалення, мікроклімат та ін.). Особливість сучасних багатоповерхових будівель і багатофункціональних споруд з погляду завдань управління, контролю, вимірювань і обліку енергоносіїв полягає в тому, що їх простір складним способом розподілено на локальні простори користувачів (ЛПК) між юридичними і приватними особами, які орендують або є власниками виділених площ. Кожний такий локальний простір має бути інформаційно інтегрованим в єдину систему автоматизації будівлі. На відміну від основних інженерних систем життєзабезпечення, місце розташування яких не змінюється з часом, структура розбиття простору будівлі на безліч ЛПК є динамічною. Вона безперервно змінюється через зміни договорів оренди та купівлі-продажу приміщень. Зміни структури розбиття простору будівлі на безліч ЛПК з необхідністю призводить до змін у топології АСУБ і АСУБС. У цих умовах традиційні дротові канали зв'язку виявляються неефективними. Зміни топології дротових систем вимагають додаткових витрат на придбання кабельно-провідникових матеріалів і додаткових будівельно-монтажних робіт. При цьому раніше прокладені мережі вже, можливо, не будуть використовувати ніколи і витрати на їхнє прокладання не окупляться.

Три популярні бездротові технології: Wi-Fi, ZigBee і EnOcean [1, 2, 3] –

ефективні в будівлях малої поверховості, а також у якості локальних підсистем усередині окремих приміщень. Залізобетонні перекриття є серйозною перешкодою для широкого застосування цих технологій у системах автоматизації багатоповерхових будівель.

Зважаючи на вищезазначене, особливий інтерес для створення інформаційних каналів АСУБ і АСУБС набувають Power Line технології, у яких для передачі сигналів використовують мережу електропостачання будівлі. Рішення в галузі передачі інформації по високовольтних лініях без відгалужень на ділянці проходження високочастотного сигналу відомі і добре вивчені [4, 5]. Що ж стосується застосування PL-технологій в умовах сильно розгалужених мереж електропостачання багатофункціональних будівель, то тут потрібно в кожному проекті індивідуально досліджувати умови проходження високочастотних сигналів з урахуванням впливу навантажень і численних відгалужень. Метою цих досліджень є визначення параметрів високочастотного сигналу в різних точках заданої мережі електропостачання за заданого місця розташування джерела сигналу. Методологія побудови топологічної структури мережі для передачі інформації по ланцюгах електропостачання будівлі повинна спиратися на результати подібних досліджень.

У зв'язку з тиражуванням PL-технологій у різних проектах АСУБ і АСУБС актуальним є завдання створення універсальної адаптивної цифрової моделі процесів розповсюдження високочастотних сигналів по розгалуженій деревоподібній мережі електропостачання багатоповерхової багатофункціональної будівлі. Наша робота присвячена розв'язанню цього завдання. Відмітна особливість пропонованого розв'язку полягає в оригінальній методології побудови об'єктно орієнтованих цифрових моделей деревоподібних PL-мереж із двох типів уніфікованих функціональних модулів, а також у механізмі автоматичного переналагодження структури моделі за зміни місць розташування джерел високочастотних сигналів. Не претендуючи на повноту і точність опису процесів передачі сигналів у PL-мережах, пропонована модель дозволяє істотно спростити й оптимізувати їхнє проектування.

#### **Моделювання процесу поширення сигналів у деревоподібній мережі методом зустрічних інформаційних потоків**

Електромагнітний процес поширення сигналу в лінії з розподіленими параметрами описують так звані телеграфні рівняння Хевисайда [6]

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial l} &= -L \frac{\partial i}{\partial t} - iR, \\ \frac{\partial i}{\partial l} &= -C \frac{\partial u}{\partial t} - uG,\end{aligned}\tag{1}$$

де  $i(l, t)$  – струм у лінії,  $u(l, t)$  – напруга між прямим (фазним) і зворотним (нульовим) проводами лінії,  $R, L, C$  – відповідно погонні опір, індуктивність і ємність лінії,  $G$  – погонна провідність ізоляції між прямим і зворотним

проводами лінії.

За Хевісайдом, лінію з розподіленими параметрами моделюють ланцюгом елементарних чотиріполюсників. Кожен чотиріполюсник є моделлю нескінченно малої ділянки лінії, на якій розподілені параметри, задані погонними величинами: ємністю, індуктивністю й активним опором. Ураховуючи специфіку мереж електропостачання будівель, зробимо спрощувальні припущення.

1. Під час побудови моделі елементарної ділянки нехтуватимемо імпедансом зворотного проводу (глухо заземленої нейтралі розподільчої мережі), наближено вважаючи потенціал нульового проводу (багаторазово заземленого) таким, що дорівнює нулю. Унаслідок цього допущення ділянки мережі в першому наближенні можуть бути представлені елементарними триполюсниками, як показано на рис. 1.

2. Ураховуючи порівняно малу протяжність ділянок мережі електропостачання будівлі (порядку декількох десятків метрів) провідність ізоляції між проводами лінії нехтуємо.

3. Ураховуючи, що на частотах порядку 100 кГц довжина хвилі сигналу  $\lambda = \frac{2\pi}{\omega}(LC)^{-1/2}$  в мережах електропостачання має порядок  $10^2 \dots 10^3$  м, перевищуючи протяжність ділянок між точками її розгалуження, нехтуємо спотвореннями сигналу, унаслідок відбиття хвилі.

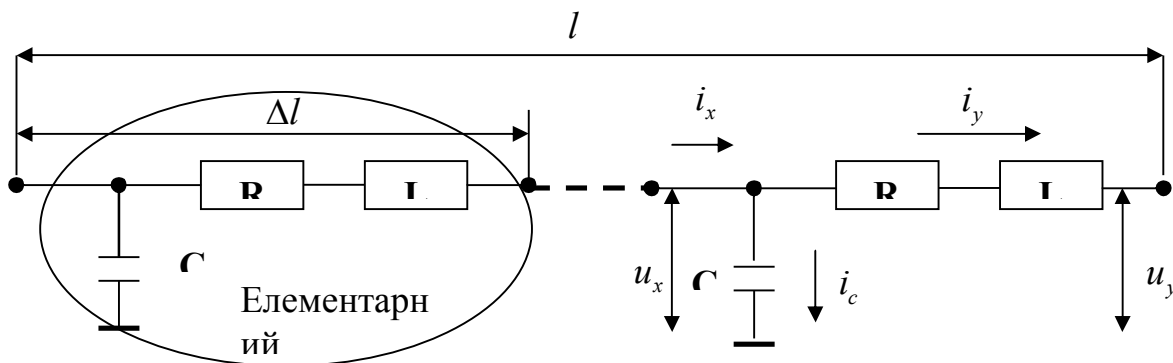


Рис. 1. Лінія поширення сигналу, що складена з елементарних триполюсників

Схематичне зображення лінії, складеної з елементарних триполюсників показано на рис. 1.

Замінюючи наближено нескінченно малий приріст лінії кінцево малою її ділянкою, перетворимо телеграфні рівняння до виду кінцево-різницевого рівнянь, що описують елементарний триполюсник як функціональний модуль, що перетворює вектор вхідних змінних триполюсника  $[u_x(t), i_x(t)]$  у вектор вихідних змінних  $[u_y(t), i_y(t)]$

$$\begin{aligned}
 u_y &= u_x - i_y R \Delta l - L \Delta l \frac{di_y}{dt}, \\
 i_y &= i_x - C \Delta l \frac{du_x}{dt}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Ці рівняння одержано з (1) заміною  $\frac{\partial}{\partial l} u(l, t) = \frac{u_y(t) - u_x(t)}{\Delta l}$  та  $\frac{\partial}{\partial l} i(l, t) = \frac{i_y(t) - i_x(t)}{\Delta l}$ . Така заміна не вносить суттєвих перекручень у картину поширення сигналу, якщо відношення довжини  $\Delta l$  елементарної ділянки лінії до довжини хвилі  $\lambda = \frac{2\pi}{\omega} (LC)^{-1/2}$ , яка розповсюджується нею, наближається до нуля.

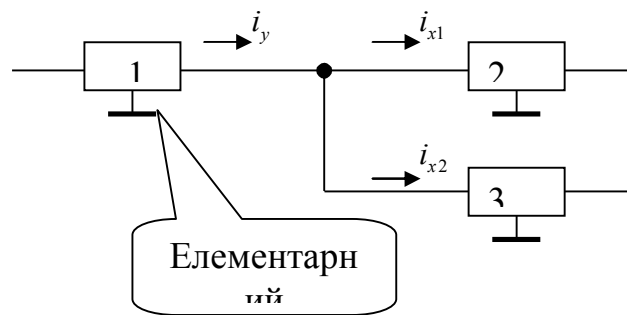


Рис. 2. Приклад фрагмента деревовидної мережі з вузлом розгалуження

Особливість деревоподібної РЛ-мережі полягає в тому, що у вузлах її розгалуження струми елементарних триполюсників, які є такими, що втікають, підсумовують таким чином, що отриманий сумарний струм дорівнює струму, що витікає з попереднього триполюсника (див. рис. 2).

У тому фрагменті ланцюга, який зображено на рис. 2, струм  $i_y$ , який витікає триполюсника № 1, розташованого ліворуч від вузла розгалуження мережі, дорівнює сумі струмів  $i_y = i_{x1} + i_{x2}$ , що втікають у триполюсники № 2 і № 3, що розташовані праворуч від вузла. При цьому напруга на входах триполюсників № 2 і № 3, розташованих праворуч від вузла, дорівнює напрузі на виході триполюсника № 1, розташованого ліворуч від вузла мережі  $u_{x2} = u_{x3} = u_{y1}$ . Отже, враховуючи характер причинно-наслідкових зв'язків у деревоподібній мережі, необхідно під час побудови моделі елементарного триполюсника (МЕТ) струм, що втікає, розглядати як вихідну змінну, а той, що витікає – як вхідну. При цьому напруга, яку подають на елементарний триполюсник з боку струму, що втікає, є вхідною, а напруга з боку струму, що витікає, – вихідною (рис. 3).

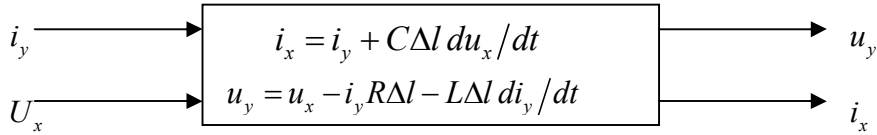


Рис. 3. Модель елементарного триполюсника (МЕТ)

Для отримання замкнутої системи диференціальних рівнянь під час моделювання деревоподібної РL-мережі необхідно врахувати навантаження на кінцевих гілках дерева електричної мережі. Загалом у якості моделі навантаження можна розглядати пасивний двополюсник, що містить індуктивність, ємність і резистор (рис. 4).

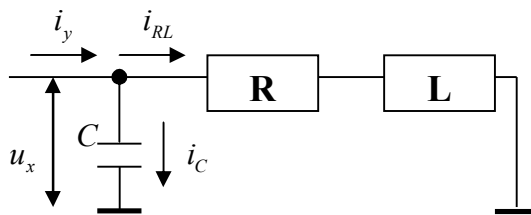


Рис. 4. Пасивний кінцевий двополюсник (навантаження)

Модель кінцевого двополюсника (МКД) описуємо системою рівнянь

$$\begin{aligned} i_{RL} &= \frac{1}{R} u_x - \frac{L}{R} \frac{di_{RL}}{dt}, \\ i_C &= C \frac{du_x}{dt}, \\ i_y &= i_{RL} + i_C. \end{aligned} \tag{3}$$

Тут, на відміну від (1) і (2), символами  $R, L, C$  позначені не погонні, а зосереджені величини.

Приклад побудови моделі довгої лінії з навантаженням в кінці лінії показаний на рис. 5.

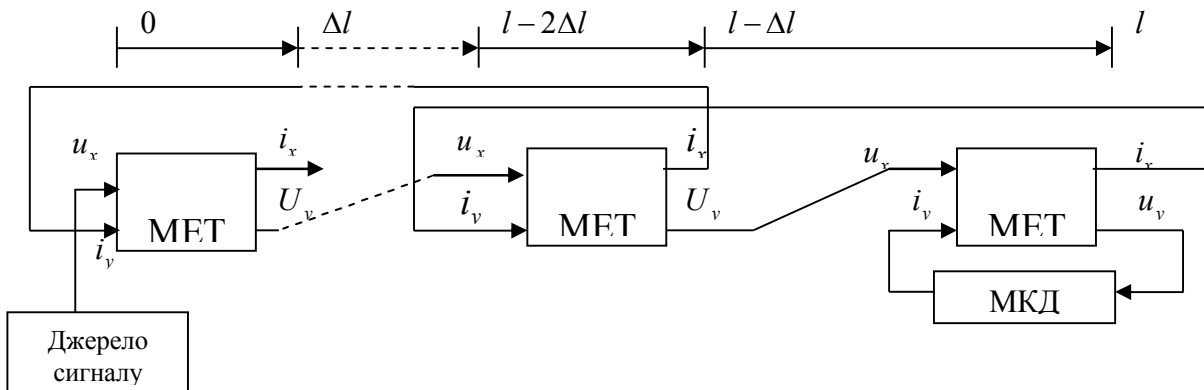


Рис. 5. Модель довгої лінії

Приклад побудови моделі деревоподібної мережі в точці розгалуження показаний на рис. 6.

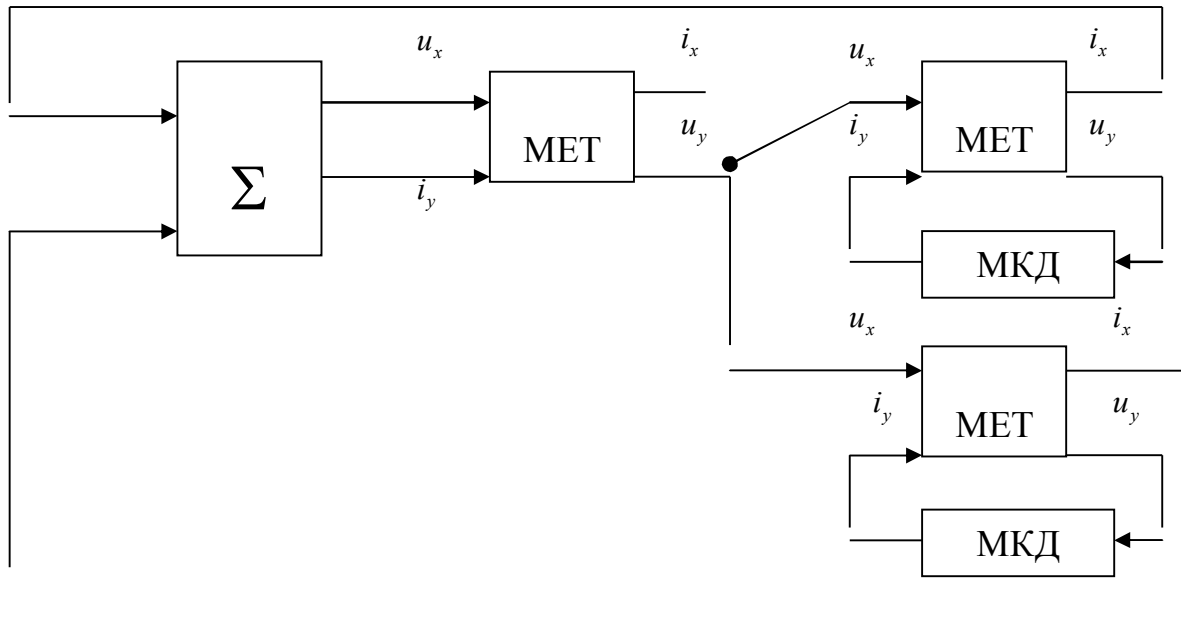


Рис. 6. Модель деревоподібної мережі в точці розгалуження

### Варіація дерева мережі за зміни місця розташування джерела сигналів

Цифрова модель розгалуженої PL-мережі дає напрямок розв'язку знаходження параметрів високочастотного сигналу в різних точках заданої мережі електропостачання за будь-якого розташування джерела сигналу. Нехай, наприклад, поставлено завдання створити інформаційний PL- канал між двома заданими ЛПК багатофункціональної споруди. Результат моделювання процесу поширення сигналу мережею електропостачання, що зв'язує ці ЛПК, може свідчити про те, що параметри сигналу в точках його прийому забезпечують необхідний рівень надійності проектованого інформаційного каналу. В іншому випадку потрібна ретрансляція сигналу. Для того щоб дослідити параметри сигналів, які поширюються від різних джерел із різних точок мережі, необхідно вміти відповідним чином перебудувати структуру моделі.

Дереву мережі поставимо у відповідність анізотропний ациклічний деревоподібний граф [7]. Цей граф відображає топологію мережі електропостачання. Модель поширення сигналу, побудована по дереву, відповідає розміщенню джерела сигналу в кореновому вузлі, звідки починається розподіл енергії в мережі електропостачання.

Для того щоб дослідити поширення сигналу від джерела, розташованого в довільному вузлі мережі, необхідно перебудувати дерево таким чином, щоб його коренем виявився вузол, у якому розташовано джерело сигналу. За такої

варіації дерева може змінитися спрямованість його ребер, а інцидентність (зв'язність двох будь-яких вершин) залишається без змін. Розглянемо формальний алгоритм варіації дерева на прикладі.

На рис. 7 показано граф  $G_0$  дерева мережі. Вершини графа відповідають точкам розгалуження мережі електропостачання. Оскільки розгалуження здійснюються в розподільчих пристроях, то місця можливого встановлення джерел і приймачів сигналів також збігаються з точками розгалуження.

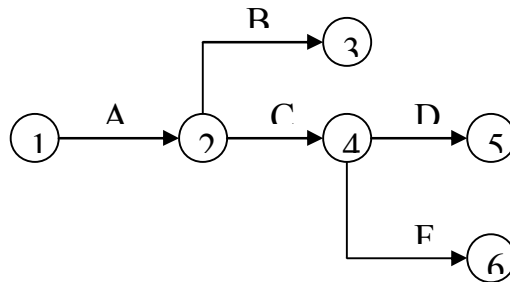


Рис. 7. Структура мережі електропостачання

Ребрам цього графа відповідають ділянки мережі електропостачання, виконані, як правило, кабелями різних марок, довжин і перетинів. У цифровій моделі PL-мережі кожному ребру графа  $G_0$  поставлено у відповідність вектор параметрів, що містить кількість елементарних триполюсників на модельованій ділянці, довжину елементарної ділянки мережі, а також погонні значення опору, індуктивності і ємності. Ці вектори залишаються незмінними за всіх варіацій дерева мережі. На рис. 7 ребра графа  $G_0$  позначені буквами латинського алфавіту.

Структуру графа відображає матриця інцидентності. Ураховуючи анізотропність графа, яка відображає напрямок передачі сигналу, домовимося позначати його ребра, які з'єднують вершини так, що на першому місці вказано вершину – витік сигналу, а на другому – стік сигналу. Наприклад, на рис. 7 це ребра 1 – 2; 2 – 3; 2 – 4; 4 – 5; 4 – 6. У матриці нехай відповідають за витіки рядки, а за стоки – стовпці. Вихідна матриця інцидентності для дерева мережі має вигляд, що представлено в табл. 1.

Таблиця 1

	1	2	3	4	5	6
1>		A	0	0	0	0
2	a		B	C	0	0
3	0	b		0	0	0
4	0	c	0		D	F
5	0	0	0	d		0
6	0	0	0	f	0	

Елементами  $g_{ij}$  цієї матриці є ребра графа. Якщо ребро активовано в моделі, відповідний елемент матриці позначатимемо великою буквою. Якщо ж елемент матриці відповідає двом пов'язаним вершин, але відповідне ребро не активовано в розглянутій моделі, елемент матриці позначатимемо малою буквою.

Нехай, наприклад, джерело сигналу потрібно розмістити у вузлі 3. Для того щоб синтезувати модель необхідно перебудувати дерево мережі так, щоб його коренем стала вершина 3.

Переглядаємо рядок 3. Кожен елемент рядка 3 порівнюємо із симетричним відносно головної діагоналі елементом. Якщо елемент рядка – мала літера, а симетричний йому елемент – прописна, то міняємо позначення обох елементів на протилежні. У всіх інших випадках залишаємо колишні значення. У цьому разі елемент  $g_{32} = b$  слід активувати ( $g_{32} \rightarrow B$ ), а симетричний йому елемент  $g_{23} = B$  дезактивувати ( $g_{23} \rightarrow b$ ).

Таблиця 2

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>1</b>		A	0	0	0	0
<b>2</b>	a		b	C	0	0
<b>3&gt;</b>	0	B		0	0	0
<b>4</b>	0	c	0		D	F
<b>5</b>	0	0	0	d		0
<b>6</b>	0	0	0	f	0	

Переглядаємо рядки, номери яких дорівнюють другим індексам (номерам стоків) у позначеннях елементів рядка 3, позначених прописними літерами. У цьому разі це рядок 2. У цьому рядку всі елементи, позначені прописними літерами, залишаємо без змін (елемент C залишаємо без змін), а статус елементів, позначених малими літерами, змінюємо на протилежний (елемент  $g_{21} = a$  активуємо  $g_{21} \rightarrow A$ , симетричний йому елемент  $g_{12} = A$  дезактивуємо  $g_{12} \rightarrow a$ ). Елементи, у яких другі індекси вказують рядки, змінені на попередньому кроці, залишаються без змін (у цьому випадку це елемент  $g_{23} = b$ ).



Таблиця 3

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>1</b>		a	0	0	0	0
<b>2</b>	A		b	C	0	0
<b>3&gt;</b>	0	B		0	0	0
<b>4</b>	0	c	0		D	F
<b>5</b>	0	0	0	d		0
<b>6</b>	0	0	0	f	0	

Переглядаємо рядки, номери яких дорівнюють другим індексам (номерам стоків) елементів рядка 2, позначених прописними літерами. У цьому випадку це рядки 1, 4. У рядку 1 елемент  $g_{12} = a$  не змінюється, через те що рядок 2 було змінено на попередньому кроці. У рядку 4 елемент  $g_{42} = c$  не змінюється, через те що рядок 2 було змінено на попередньому кроці. Отже, процес перетворення графа закінчено. Його вигляд під час розміщення джерела сигналу у вузлі 3 показано на рис. 8а.

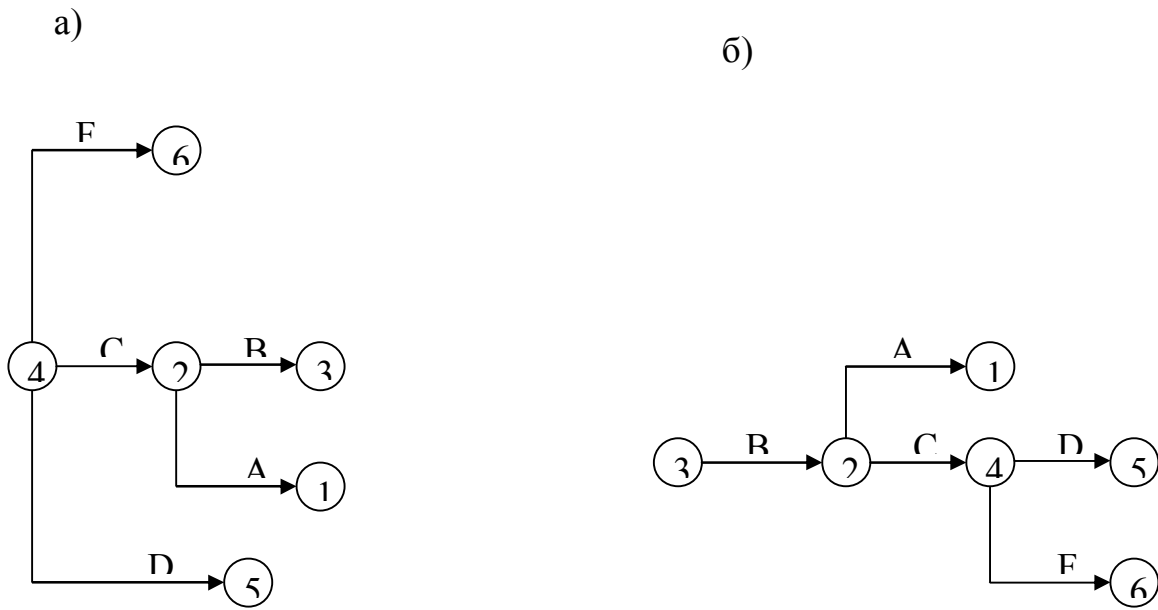


Рис. 8. Варіації графа PL-мережі за зміни місця розташування джерела сигналу: а) джерело поміщено у вузлі 3; б) джерело поміщено у вузлі 4

Нехай, наприклад, джерело сигналу потрібно розмістити у вузлі 4. Для того щоб синтезувати модель, необхідно перебудувати дерево мережі так, щоб його коренем стала вершина 4. Керуючись аналогічним алгоритмом, отримаємо

Наукові праці ВНТУ, 2015, № 1

шуканий граф (рис. 8б).

**Приклад використання моделі під час аналізу умов проходження інформаційних сигналів у системі електропостачання багатоповерхової будівлі**

Топологічна схема досліджуваної системи показана на рис. 9.

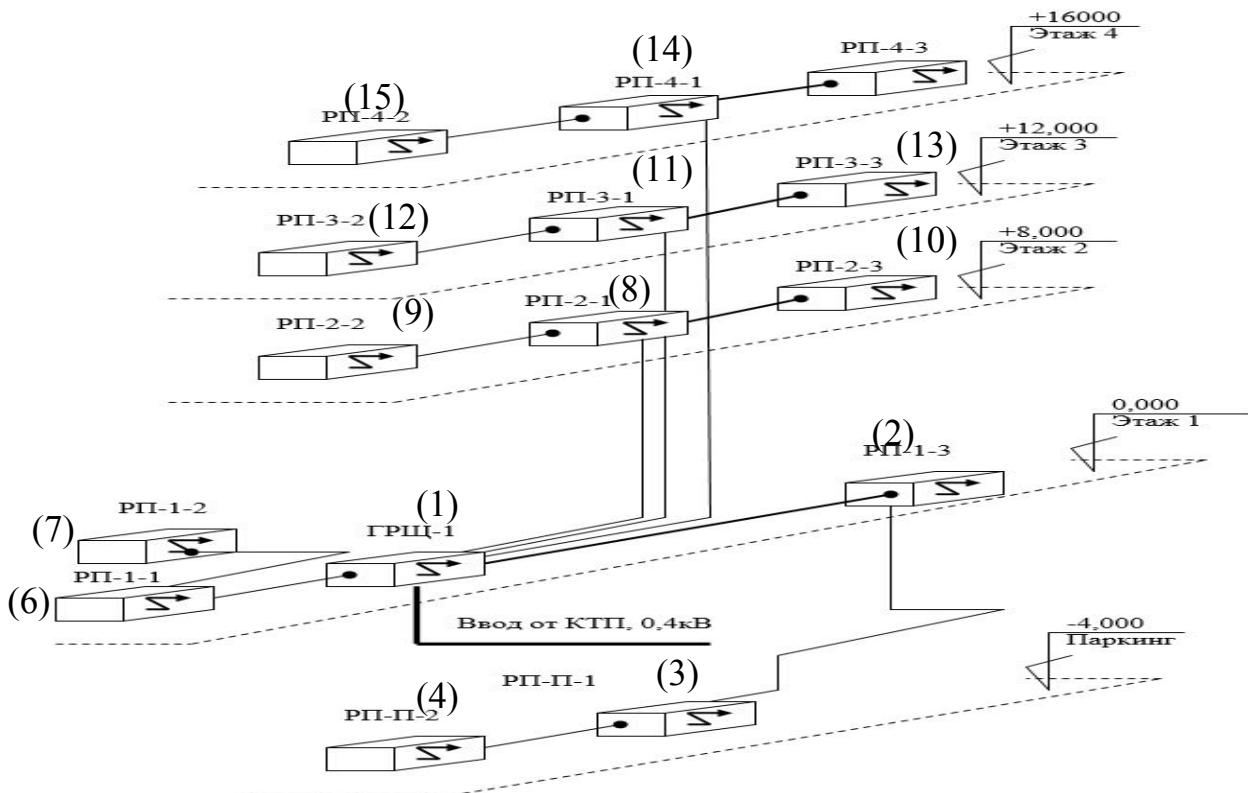


Рис. 9. Топологічна схема системи електропостачання багатоповерхової будівлі

Приклад синтезу MATLAB-моделі.

Модель № 1: джерело сигналу розташовано у вершині 1 (рис. 10).

Узел связанный с источником:

	Активный	Узел источника	Узел приёмника	Длина участка	R	L	C
1	<input checked="" type="checkbox"/>	1	2	1	0.1512	9.0000e-06	9.0000e-09
2	<input checked="" type="checkbox"/>	2	3	1	0.5651	1.3800e-05	1.3800e-08
3	<input checked="" type="checkbox"/>	3	4	1	0.3174	6.3000e-06	6.3000e-09
4	<input checked="" type="checkbox"/>	1	6	1	0.4232	8.4000e-06	8.4000e-09
5	<input checked="" type="checkbox"/>	6	7	1	0.2116	4.2000e-06	4.2000e-09
6	<input checked="" type="checkbox"/>	1	8	1	0.3476	6.9000e-06	6.9000e-09
7	<input checked="" type="checkbox"/>	8	9	1	0.4232	8.4000e-06	8.4000e-09
8	<input checked="" type="checkbox"/>	8	10	1	0.4534	9.0000e-06	9.0000e-09
9	<input checked="" type="checkbox"/>	1	11	1	0.4836	9.6000e-06	9.6000e-09
10	<input checked="" type="checkbox"/>	11	12	1	0.4232	8.4000e-06	8.4000e-09
11	<input checked="" type="checkbox"/>	11	13	1	0.4534	9.0000e-06	9.0000e-09
12	<input checked="" type="checkbox"/>	1	14	1	0.6045	1.2000e-05	1.2000e-08
13	<input checked="" type="checkbox"/>	14	15	1	0.4232	8.4000e-06	8.4000e-09
14	<input checked="" type="checkbox"/>	14	16	1	0.4534	9.0000e-06	9.0000e-09

Рис. 10. Таблица задания структуры системы

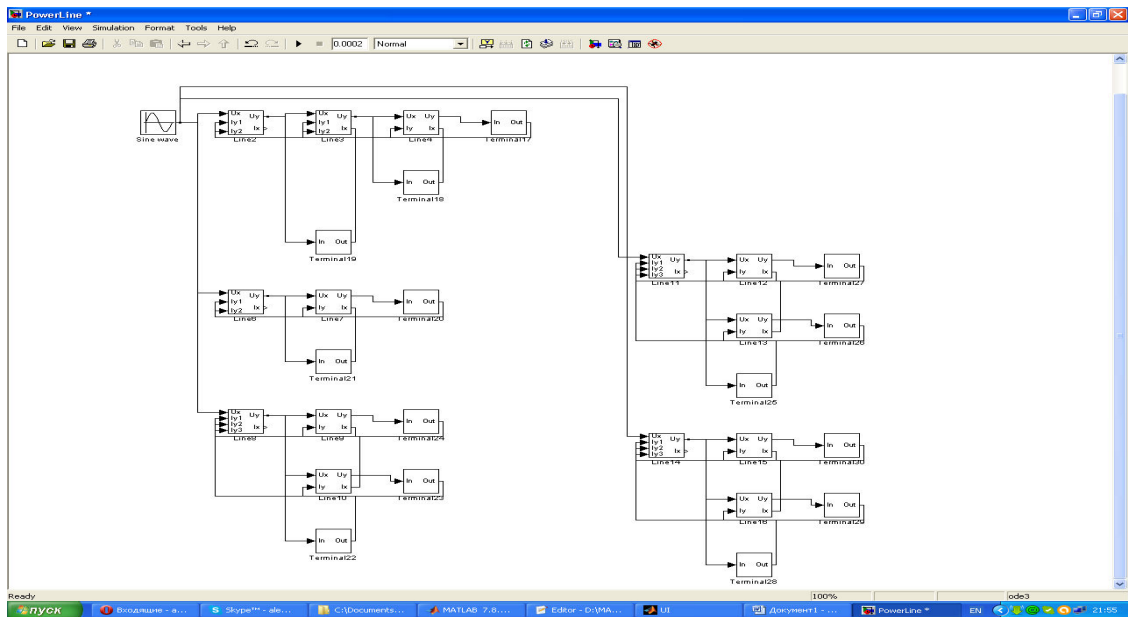


Рис. 11. Синтезована програма моделі

Результат автоматичного синтезу моделі № 1 (рис. 11).

Результати моделювання PL-мережі наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Відносні амплітуди сигналів залежно від місць розташування джерел і приймачів

	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-	1	0.98	1.03	1	0.97	1	0.93	0.93	1	0.89	0.89	1	0.85
2	1	-	1	1.05	0.53	0.51	0.53	0.49	0.49	0.53	0.47	0.47	0.53	0.45
3	0.48	1	-	1	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.25	0.23	0.23	0.25	0.22
4	0.4	0.82	1	-	0.21	0.2	0.21	0.19	0.19	0.21	0.19	0.19	0.21	0.18
6	1	0.53	0.52	0.55	-	1	0.53	0.5	0.5	0.53	0.47	0.47	0.53	0.45
7	0.76	0.41	0.4	0.42	1	-	0.41	0.38	0.38	0.41	0.36	0.36	0.41	0.35
8	1	0.61	0.6	0.63	0.61	0.59	-	1	1	0.61	0.54	0.54	0.61	0.52
9	0.57	0.35	0.34	0.36	0.35	0.34	1	-	0.57	0.35	0.31	0.31	0.36	0.29
10	0.55	0.33	0.33	0.35	0.33	0.32	1	0.55	-	0.33	0.3	0.3	0.33	0.28
11	1	0.5	0.5	0.52	0.5	0.49	0.5	0.47	0.47	-	1	1	0.5	0.43
12	0.6	0.31	0.3	0.32	0.31	0.3	0.31	0.28	0.28	1	-	0.6	0.31	0.26
13	0.59	0.3	0.29	0.31	0.3	0.29	0.3	0.28	0.28	1	0.59	-	0.3	0.25
14	1	0.43	0.42	0.45	0.43	0.42	0.43	0.4	0.4	0.43	0.39	0.39	-	1
15	0.63	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.27	0.25	0.25	0.27	0.24	0.24	1	-

### Висновки

1. Розроблено універсальну, з можливістю автоматичного перенастроювання, адаптивну цифрову модель процесів розповсюдження високочастотних сигналів по розгалуженій деревоподібній мережі електропостачання багатоповерхової багатофункціональної будівлі.

2. Розроблена модель забезпечує можливість у конкретних проектах PL-мереж обґрунтовано з погляду надійності й перешкодозахищеності інформаційної мережі вибирати місце розташування джерел, приймачів і ретрансляторів високочастотних сигналів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Patrick Harder. A Guide to Wireless Technologies / Patrick Harder // ASHRAE Journal. – 2011. – Volume 38, Issue 6. – P. 532 – 536.
2. Jelena Masic Wireless Personal Area Networks : Performance, Interconnection, and Security with IEEE 802.15.4 / Jelena Masic, Vojislav Masic. – John Wiley & Sons, 2008. – 336 p.
3. Pereira, Javier Handbook of Research on Personal Autonomy Technologies and Disability Informatics / Pereira, Javier. – Idea Group Inc (IGI), 2010. – 462 p.
4. Carson J. R. Wave propagation in overheard wires with ground return / J. R. Carson // Bell System Techn. Journ. – 1926. – vol. 5, № 4. – P. 539 – 554.
5. Carson J. R. Propagation of periodic currents over a system of parallel wires / J. R. Carson, R. S. Hoyt // Bell

System Techn. Journ. – 1927. – vol. 6, № 3. – P. 495 – 545.

6. John D. Kraus Electromagnetics / John D. Kraus. – New York, NY : McGraw-Hill, 1984. – 462 p.

7. Diestel R. Graph Theory / Diestel R. – Springer, 2005. – 410 p.

**Заславський Олександр Михайлович** – к. т. н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем, e-mail: Am-47@mail.ru.

**Суцєвський Антон Валерійович** – магістр, e-mail: a.sushchevskiy@ukr.net.

Національний гірничий університет.