

УДК 621.372

А. М. Заславский, к. т. н.; А. В. Сущевский

АДАПТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ И РАЗВЕТВЛЁННЫХ PL-СЕТЯХ

На основе телеграфных уравнений Хевисайда разработана цифровая модель процессов распространения высокочастотных сигналов по разветвлённой древовидной сети электроснабжения многоэтажного многофункционального здания. Предложена методика адаптации модели к вариациям местоположения источников и приёмников сигналов. Разработанная модель обеспечивает возможность в конкретных проектах PL-сетей обоснованно с точки зрения надёжности и помехозащищённости информационной сети выбрать местоположение источников, приёмников и ретрансляторов высокочастотных сигналов.

Ключевые слова: модель, сигнал, сеть, источник, приёмник, трёхполюсник, двухполюсник, граф.

Введение

Современный период развития интегрированных систем автоматизации характеризуется существенным увеличением спроса на автоматизированные системы управления зданиями (АСУЗ) и многофункциональными сооружениями (АСУМС).

Концепция построения подобных систем заключается в интеграции в единую инженерную систему основных систем жизнеобеспечения здания (электроснабжение, освещение, отопление, микроклимат и пр.). Особенность современных многоэтажных зданий и многофункциональных сооружений с точки зрения задач управления, контроля, измерений и учёта энергоносителей состоит в том, что их пространство сложным способом разделено на локальные пространства пользователей (ЛПП) между множеством юридических и частных лиц – арендаторов или владельцев выделенных площадей. Каждое такое локальное пространство должно быть информационно интегрировано в единую систему автоматизации здания. В отличие от основных инженерных систем жизнеобеспечения, местоположение которых не изменяется со временем, структура разбиения пространства здания на множество ЛПП является динамической. Она непрерывно изменяется из-за изменений договоров аренды и купли–продажи помещений. Изменения структуры разбиения пространства здания на множество ЛПП с необходимостью влечёт за собой изменения в топологии АСУЗ и АСУМС. В этих условиях традиционные проводные каналы связи оказываются неэффективными. Изменения топологии проводных систем требуют дополнительных затрат на приобретение кабельно-проводниковых материалов и дополнительных строительно-монтажных работ. При этом ранее проложенные сети уже, возможно, не будут использоваться никогда и затраты на их прокладывание не окупятся.

Три популярные беспроводные технологии: Wi-Fi, ZigBee и EnOcean [1, 2, 3] – эффективны в зданиях малой этажности, а также в качестве локальных подсистем внутри отдельных помещений. Железобетонные перекрытия являются серьезным препятствием для

широкого применения этих технологий в системах автоматизации многоэтажных зданий.

В связи с вышеизложенным особый интерес для создания информационных каналов АСУЗ и АСУМС представляют Power Line технологии, использующие для передачи сигналов сеть электроснабжения здания. Решения в области передачи информации по высоковольтным линиям без ответвлений на участке прохождения высокочастотного сигнала известны и хорошо изучены [4, 5]. Что же касается применения PL-технологий в условиях сильно разветвлённых сетей электроснабжения многофункциональных зданий, то здесь необходимо в каждом проекте индивидуально исследовать условия прохождения высокочастотных сигналов с учётом шунтирующего действия нагрузок и многочисленных ответвлений. Целью этих исследований является определение параметров высокочастотного сигнала в различных точках заданной сети электроснабжения при заданном местоположении источника сигнала. Методология построения топологической структуры сети для передачи информации по цепям электроснабжения здания должна опираться на результаты подобных исследований.

В связи с тиражированием PL-технологий в различных проектах АСУЗ и АСУМС актуальной является задача создания универсальной адаптивной цифровой модели процессов распространения высокочастотных сигналов по разветвлённой древовидной сети электроснабжения многоэтажного многофункционального здания. Данная работа посвящена решению этой задачи. Отличительная особенность предлагаемого решения заключается в оригинальной методологии построения объектно ориентированных цифровых моделей древовидных PL-сетей из двух типов унифицированных функциональных модулей, а также в механизме автоматической перенастройки структуры модели при изменении мест расположения источников высокочастотных сигналов. Не претендуя на полноту и точность описания процессов передачи сигналов в PL-сетях, предлагаемая модель позволяет существенно упростить и оптимизировать их проектирование.

Моделирование процесса распространения сигналов в древовидной сети методом встречных информационных потоков

Электромагнитный процесс распространения сигнала в линии с распределёнными параметрами описывают так называемыми *телеграфными уравнениями* Хевисайда [6]

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

где $i(l, t)$ – ток в линии, $u(l, t)$ – напряжение между прямым (фазным) и обратным (нулевым) проводами линии, R, L, C – соответственно погонные сопротивление, индуктивность и ёмкость линии, G – погонная проводимость изоляции между прямым и обратным проводами.

Следуя Хевисайду, линию с распределёнными параметрами моделируют цепочкой элементарных четырёхполюсников. Каждый четырёхполюсник является моделью бесконечно малого участка линии, на котором распределённые параметры заданы погонными величинами: ёмкостью, индуктивностью и активным сопротивлением. Учитывая специфику сетей электроснабжения зданий, сделаем ряд упрощающих допущений.

1. При построении модели элементарного участка будем пренебрегать импедансом обратного провода (глухо заземлённой нейтрали распределительной сети), приближённо считая потенциал нулевого провода (многократно заземлённого) всюду равным нулю. Вследствие этого допущения участки сети в первом приближении могут быть представлены

элементарными трёхполюсниками, как показано на рис. 1.

2. Учитывая сравнительно малую протяжённость участков сети электроснабжения здания (порядка нескольких десятков метров) проводимостью изоляции между проводами линии пренебрегаем.

3. Учитывая, что на частотах порядка 100 кГц длина волны сигнала $\lambda = \frac{2\pi}{\omega}(LC)^{-1/2}$ в сетях электроснабжения имеет порядок $10^2 \dots 10^3$ м, превышая протяжённость участков между точками её ветвления, пренебрегаем искажениями сигнала вследствие отражений волны.

Схематическое изображение модели линии, с учётом принятых допущений показано на рис. 1.

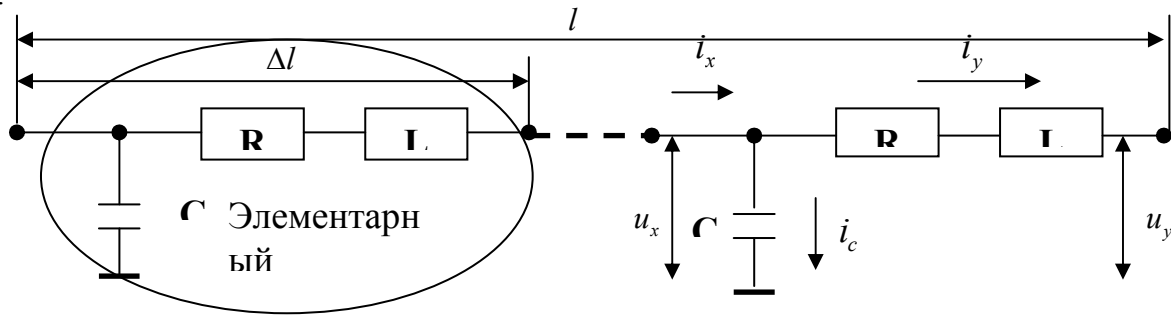


Рис. 1. Линия распространения сигнала, составленная из элементарных трёхполюсников

Заменяя приближённо бесконечно малое приращение линии конечным малым её участком, преобразуем *телеграфные уравнения* в частных производных к виду конечно-разностных уравнений, описывающих элементарный трёхполюсник как функциональный модуль, преобразующий вектор входных переменных трёхполюсника $[u_x(t), i_x(t)]$ в вектор выходных переменных $[u_y(t), i_y(t)]$

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

Эти уравнения получены из (1) заменой $\frac{\partial}{\partial l} u(l, t) = \frac{u_y(t) - u_x(t)}{\Delta l}$ и $\frac{\partial}{\partial l} i(l, t) = \frac{i_y(t) - i_x(t)}{\Delta l}$. Такая замена не вносит существенных искажений в картину распространения сигнала, если отношение длины Δl элементарного участка линии к длине $\lambda = \frac{2\pi}{\omega}(LC)^{-1/2}$ распространяющейся по ней волны стремится к нулю.

Особенность древовидной RL-сети заключается в том, что в узлах её ветвления втекающие токи элементарных трёхполюсников суммируют таким образом, что получаемый суммарный ток равен вытекающему току предыдущего трёхполюсника (см. рис. 2).

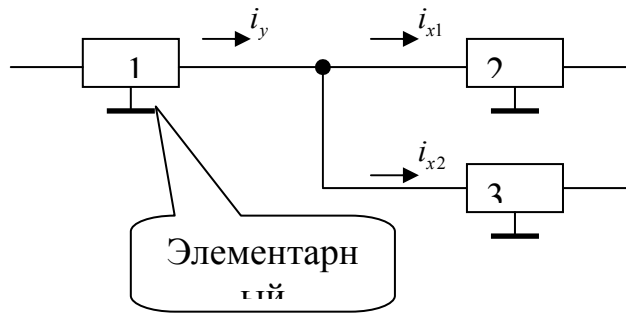


Рис. 2. Пример фрагмента древовидной сети с узлом ветвления

В том фрагменте цепи, который изображён на рис. 2, вытекающий ток i_y трёхполюсника № 1, расположенного слева от узла ветвления сети, равен сумме $i_y = i_{x1} + i_{x2}$ втекающих токов, трёхполюсников № 2 и № 3, расположенных справа от узла. При этом напряжение на входах трёхполюсников № 2 и № 3, расположенных справа от узла, равно напряжению на выходе трёхполюсника № 1, расположенного слева от узла сети $u_{x2} = u_{x3} = u_{y1}$. Следовательно, учитывая характер причинно-следственных связей в древовидной сети, необходимо при построении модели элементарного трёхполюсника (МЭТ) втекающий ток рассматривать как выходную переменную, а вытекающий – как входную. При этом напряжение, подаваемое на элементарный трёхполюсник со стороны втекающего тока, является входным, а напряжение со стороны вытекающего тока – выходным (рис. 3).

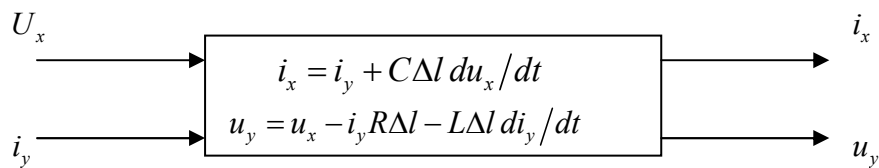


Рис. 3. Модель элементарного трёхполюсника (МЭТ)

Для получения замкнутой системы дифференциальных уравнений при моделировании древовидной RL-сети необходимо учесть нагрузку на конечных ветвях дерева электрической сети. В общем случае в качестве модели нагрузки можно рассматривать пассивный двухполюсник, включающий индуктивность, ёмкость и резистор (рис. 4).

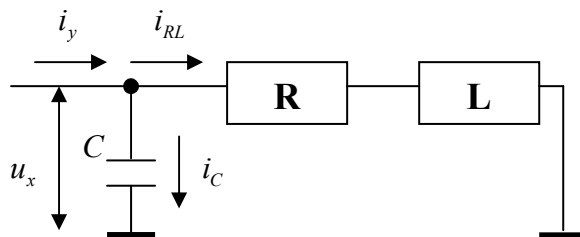


Рис. 4. Пассивный конечный двухполюсник (нагрузка)

Модель конечного двухполюсника (МОД) описываем системой уравнений

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

Здесь, в отличие от (1) и (2), символами R, L, C обозначены не погонные, а сосредоточенные величины.

Пример построения модели длинной линии с нагрузкой в конце линии показан на рис. 5

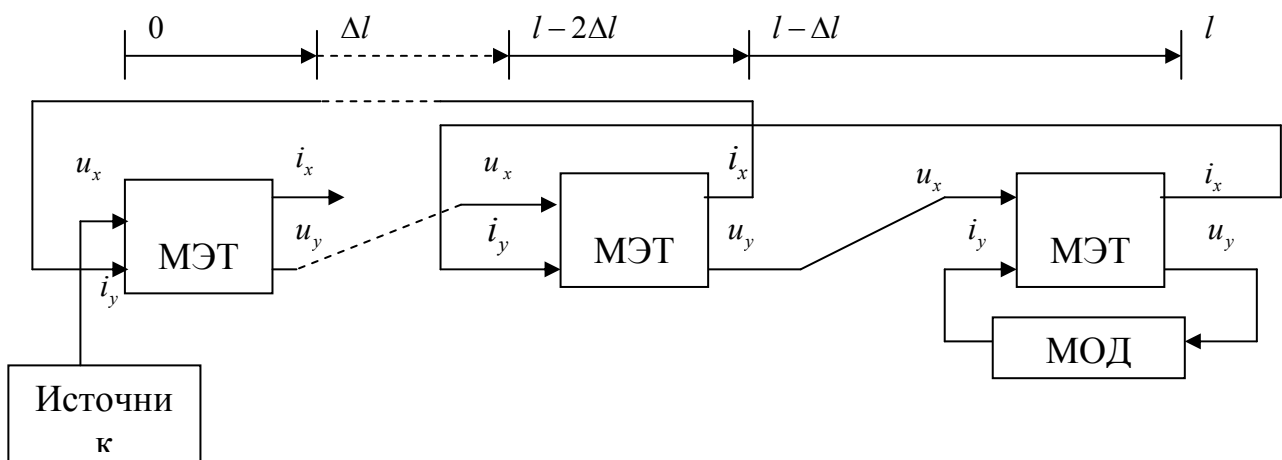


Рис. 5. Модель длинной линии

Пример построения модели древовидной сети в точке ветвления показан на рис. 6.

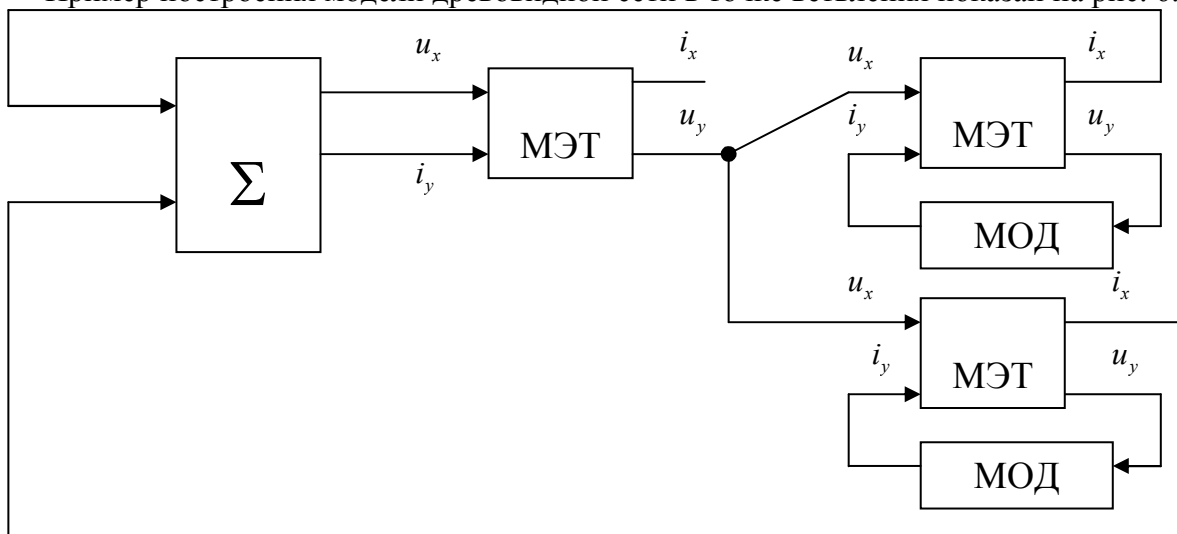


Рис. 6. Модель древовидной сети в точке ветвления

Вариация дерева сети при изменении места расположения источника сигналов

Цифровая модель разветвлённой PL-сети даёт направление решения нахождения параметров высокочастотного сигнала в различных точках заданной сети электроснабжения при различном местоположении источника сигнала. Пусть, например, поставлена задача создать информационный PL-канал между двумя заданными ЛПП многофункционального сооружения. Результат моделирования процесса распространения сигнала по сети электроснабжения, связывающей эти ЛПП, может свидетельствовать о том, что параметры сигнала в точках его приёма обеспечивают требуемый уровень надёжности проектируемого информационного канала. В противном случае требуется ретрансляция сигнала. Для того чтобы исследовать параметры сигналов, распространяющихся от разных источников из различных точек сети, необходимо уметь соответствующим образом перестраивать структуру модели.

Исходному дереву сети поставим в соответствие анизотропный ациклический древовидный граф [7]. Этот граф отражает топологию сети электроснабжения. Модель распространения сигнала, построенная по исходному дереву, соответствует размещению источника сигнала в корневом узле, откуда начинается распределение энергии в сети электроснабжения.

Для того чтобы исследовать распространение сигнала от источника, расположенного в произвольном узле сети, необходимо перестроить дерево таким образом, чтобы его корнем оказался узел, в котором помещён источник сигнала. При такой вариации дерева может измениться направленность его рёбер, а инцидентность (связность двух любых вершин) остаётся без изменений. Рассмотрим формальный алгоритм вариации дерева на примере.

На рис. 7 показан граф G_0 дерева сети. Вершины графа соответствуют точкам разветвления сети электроснабжения. Так как ветвления осуществляют в распределительных устройствах, то места возможной установки источников и приёмников сигналов также совпадают с точками разветвления.

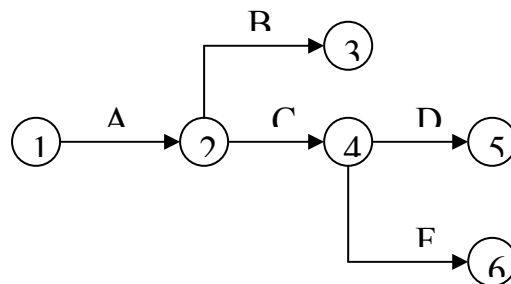


Рис. 7. Структура сети электроснабжения

Рёбрам этого графа соответствуют участки сети электроснабжения, выполненные, как правило, кабелями различных марок, длин и сечений. В цифровой модели PL-сети каждому ребру графа G_0 ставят в соответствие вектор параметров, включающий количество элементарных трёхполюсников на моделируемом участке, длину элементарного участка сети, а также погонные значения сопротивления, индуктивности и ёмкости. Эти векторы остаются неизменными при всех вариациях дерева сети. На рис. 7 рёбра графа G_0 обозначены буквами латинского алфавита.

Структуру графа представим матрицей инцидентности. Учитывая анизотропность графа, отражающую направление передачи сигнала, условимся обозначать его рёбра номерами соединяемых вершин так, что на первом месте указана вершина – исток сигнала, а на втором – сток сигнала. Например, на рис. 7 это рёбра 1 – 2; 2 – 3; 2 – 4; 4 – 5; 4 – 6. В матрице истокам пусть соответствуют строки, а стокам – столбцы. Матрица инцидентности для исходного дерева имеет вид, представленный в табл. 1.

Таблица 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	

Элементами g_{ij} этой матрицы являются рёбра графа. Если ребро активировано в модели, соответствующий элемент матрицы будем обозначать прописной буквой. Если же элемент матрицы соответствует двум связанным вершинам, но соответствующее ребро не активировано в рассматриваемой модели, будем элемент матрицы обозначать строчной буквой.

Пусть, например, источник сигнала требуется разместить в узле 3. Для того чтобы синтезировать модель необходимо перестроить дерево сети так, чтобы его корнем явилась вершина 3.

Просматриваем строку 3. Каждый элемент строки 3 сравниваем с симметричным относительно главной диагонали элементом. Если элемент анализируемой строки – строчная буква, а симметричный ему элемент – прописная, то меняем обозначения обоих элементов на противоположные. Во всех остальных случаях оставляем прежние значения. В данном случае элемент $g_{32} = b$ следует активировать ($g_{32} \rightarrow B$), а симметричный ему элемент $g_{23} = B$ дезактивировать ($g_{23} \rightarrow b$).

Таблица 2

	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	

Просматриваем строки, номера которых равны вторым индексам (номерам стоков) в обозначениях элементов строки 3, обозначенных прописными буквами. В данном случае это строка 2. В этой строке все элементы, обозначенные прописными буквами, оставляем без изменений (элемент C оставляем без изменений), а статус элементов, обозначенных строчными буквами, изменяем на противоположный (элемент $g_{21} = a$ активируем $g_{21} \rightarrow A$, симметричный ему элемент $g_{12} = A$ дезактивируем $g_{12} \rightarrow a$). Элементы, у которых вторые индексы указывают строки, изменённые на предыдущем шаге, остаются без изменений (в данном случае это элемент $g_{23} = b$).

Таблица 3

	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	

Просматриваем строки, номера которых равны вторым индексам (номерам стоков) элементов строки 2, обозначенных прописными буквами. В данном случае это строки 1, 4. В строке 1 элемент $g_{12} = a$ не изменяется, так как строка 2 была изменена на предыдущем шаге. В строке 4 элемент $g_{42} = c$ не изменяется, так как строка 2 была изменена на предыдущем шаге. Следовательно, процесс преобразования графа закончен. Его вид при размещении источника сигнала в узле 3 показан на рис. 8а.

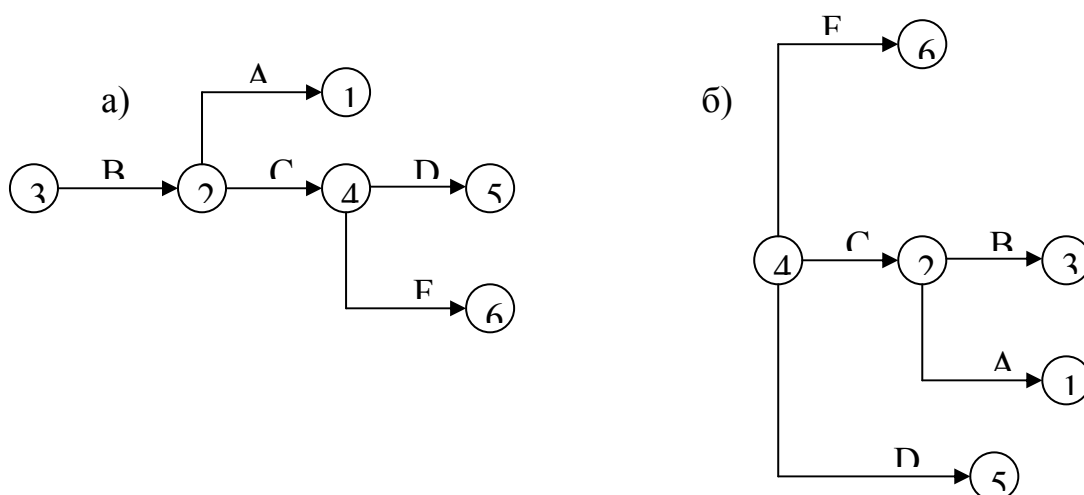


Рис. 8. Вариации графа PL-сети при изменении местоположения источника сигнала:

- а) источник помещён в узле 3;
- б) источник помещён в узле 4

Пусть, например, источник сигнала необходимо разместить в узле 4. Для того чтобы синтезировать модель, необходимо перестроить дерево сети так, чтобы его корнем стала вершина 4. Руководствуясь аналогичным алгоритмом, получим искомый граф (рис. 8б).

Пример использования модели при анализе условий прохождения информационных сигналов в системе электроснабжения многоэтажного здания

Топологическая схема исследуемой системы показана на рис. 9.

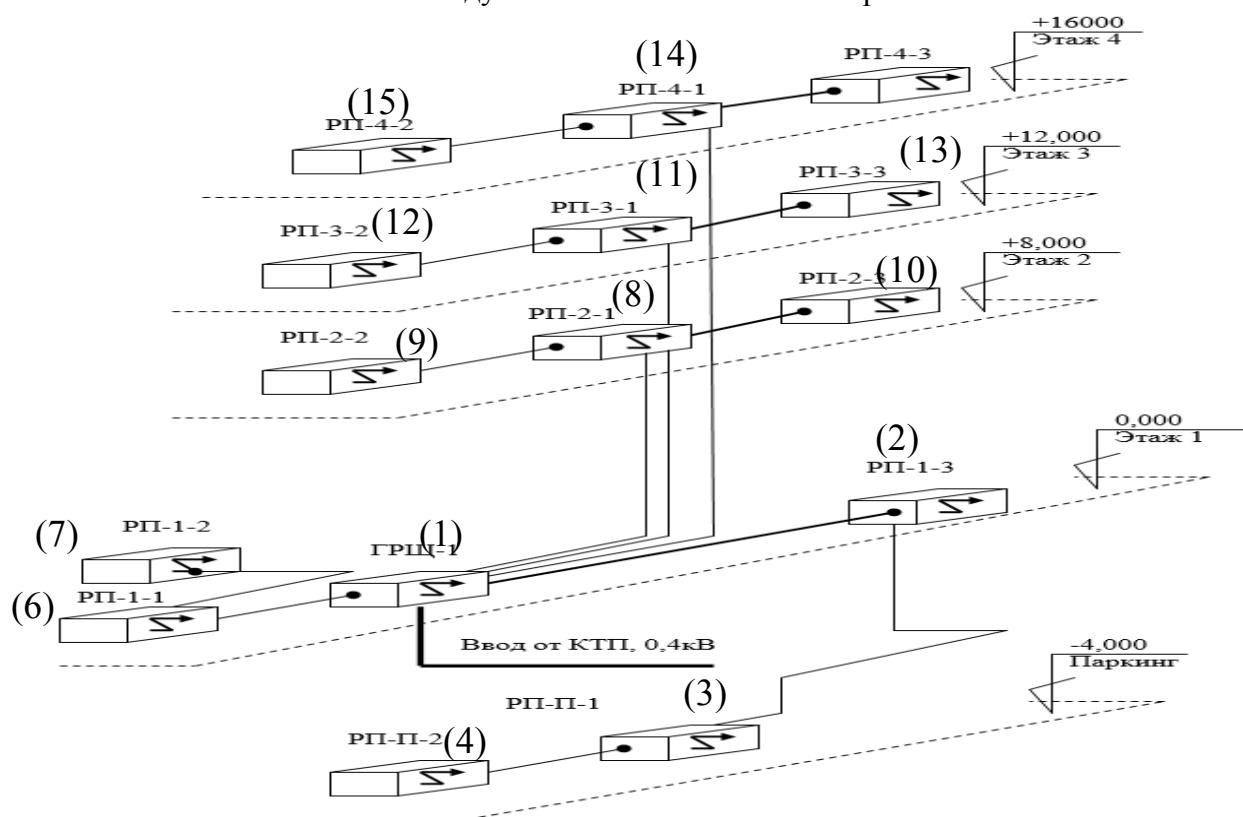


Рис. 9. Топологическая схема системы электроснабжения многоэтажного здания

Пример синтеза MATLAB-модели.

Модель № 1: источник сигнала находится в вершине 1 (рис. 10).

Узел связанный с источником:

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

Рис. 10. Таблица задания структуры системы

Результат автоматического синтеза модели № 1 (рис. 11).

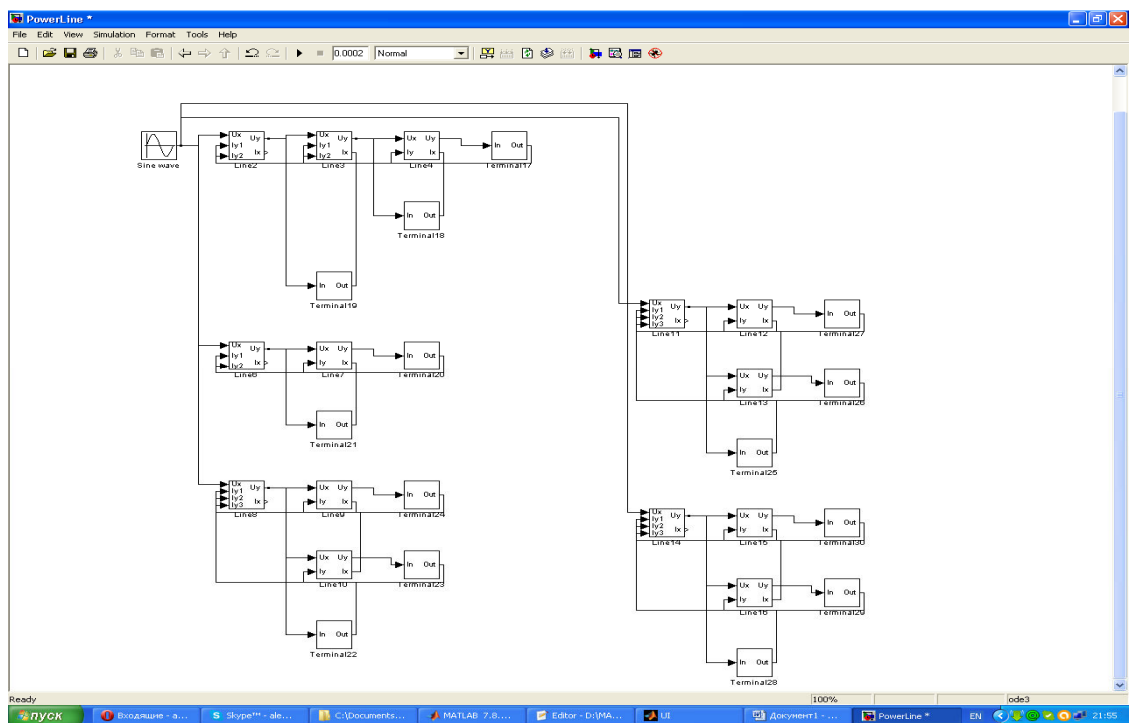


Рис. 11. Синтезированная программа модели

Результаты моделирования PL-сети приведены в табл. 4.

Таблица 4

Относительные амплитуды сигналов в зависимости от
мест расположения источников и приёмников

	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	-

Выводы

1. Разработана универсальная, с возможностью автоматической перенастройки, адаптивная цифровая модель процессов распространения высокочастотных сигналов по разветвлённой древовидной сети электроснабжения многоэтажного многофункционального здания.

2. Разработанная модель обеспечивает возможность в конкретных проектах PL-сетей обоснованно с точки зрения надёжности и помехозащищённости информационной сети выбирать местоположение источников, приёмников и ретрансляторов высокочастотных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Заславский Александр Михайлович – к. т. н., доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем, e-mail: am-47@mail.ru.

Сущевский Антон Валериевич – магистр, e-mail: a.sushchevskiy@ukr.net.
Национальный горный университет.