УДК 621.391

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА С РАЗРАБОТКОЙ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Проведено аналіз існуючих методів нейромережного розв'язання задачі маршрутизації з використанням нейронних мереж Хопфілда. Запропонована функція Ляпунова для розв'язання задачі маршрутизації з врахуванням пропускної здатності каналів зв'язків та кількості каналів зв'язку, задіяних у маршруті.

An analysis of existing methods of solving the problem of neural network routing using Hopfield neural networks. Lyapunov function is proposed to solve the routing problem with the capacity of communication channels and the number of channels involved in the route.

Проведен анализ существующих методов нейросетевого решения задачи маршрутизации с использованием нейронных сетей Хопфилда. Предложена функция Ляпунова для решения задачи маршрутизации с учетом пропускной способности каналов связей и количества каналов связи, задействованных в маршруте.

М.А. ПАВЛЕНКО,
А.А. РОМАНЮК,
Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба
В.Ю. ЯКОВЛЕВ
Национальная комиссия, осуществляющая государственное регулирование в сфере связи и информатизации

Введение

На сегодняшний день можно наблюдать бурное развитие и усложнение телекоммуникационных систем (ТКС) и технологий. Это обусловлено стремлением к повышению качества обслуживания (QoS, Quality of Service) со стороны операторов и провайдеров, а также роста требований к скорости и качеству обмена информацией со стороны потребителей услуг связи, что, в свою очередь, обусловливает актуальность решения задач по обеспечению эффективного использования сетевых ресурсов. Одной из ключевых задач обеспечения эффективного использования сетевых ресурсов является маршрутизация. При этом математической основой решения задач маршрутизации сетевого трафика в существующих протоколах (RIP, EIGRP, OSPF, IS-IS, BGP и пр.) выступает модель поиска «кратчайшего» пути на графе [1]. В некоторых работах также предложен ряд эвристических решений в области управления сетевыми ресурсами ТКС, общим недостатком которых является невысокое качество получаемых решений, что вызывает затруднения при их реализации в протоколах управления реального времени, а также необоснованность использования канальных и буферных ресурсов [2].

Выходом из сложившейся ситуации является использование новых подходов к решению задач управления ресурсами ТКС и задач маршрутизации в частности. Например, существующие протоколы (RIP, OSPF, EIGRP, IS-IS, PNNI) обеспечивают периодический или апериодический (по требованию) перерасчет управляющих воз-

действий (маршрутных таблиц, порядка использования канальных и буферных ресурсов) в соответствии с текущим изменением состояния ТКС. Как правило, при реализации данных протоколов учитывается незначительное число параметров системы, значения которых устанавливаются административно, либо задаются путем статистического усреднения результатов измерений. Однако при этом необходимо учитывать, что ТКС – это сложная динамическая многопараметрическая и слабодетерминированная система, допускающая возможность реализации различных стратегий управления и способов управления. Поэтому достичь необходимого уровня адекватности математического описания ТКС в ходе обеспечения оптимального управления ее ресурсами возможно лишь в рамках моделей, учитывающих особенности динамического функционирования системы. В данной работе с целью повышения адекватности математического описания ТКС предлагается рассмотреть возможность использования для решения задачи маршрутизации нейронной сети Хопфилда.

В общем случае при решении задачи маршрутизации (определения кратчайшего пути) рассматривается граф G:

$$G = (V, L), \tag{1}$$

где V – множество вершин графа, количество которых равно N, причем каждая вершина моделирует собой узел (маршрутизатор) ТКС; L – множество дуг графа, каждая дуга моделирует связь между узлами. Количество дуг графа равно M.

Каждой дуге графа присваивается определенный вес, который может соответствовать какой-либо метрике, например, пропускной способности канала (условно назовем это стоимостью):

$$C = \left[c_{ij} \right], \tag{2}$$

где c_{ij} – «стоимость» передачи пакетов между узлами i и j. При этом будем считать, что $c_{ij} = c_{ji}$.

Под путем P из узла s в узел d через вершины графа $n_i, \overline{i = 1, N}$ будем понимать упорядоченное множество:

$$P_{sd} = \{s, n_1, n_2, ..., d\}. \tag{3}$$

Тогда для нахождения кратчайшего пути по критерию C необходимо определить минимум следующего выражения:

$$\mathbf{min}\left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} c_{ij} v_{ij} \right), \tag{4}$$

где v_{ij} – доля интенсивности поступающего в ТКС потока, протекающего между узлами i и j.

При этом должно выполняться правило сохранения потока в узле ТКС, что можно записать в следующем виде:

$$\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} v_{ij} - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} v_{ji} = \phi_i , \qquad (5)$$

при этом $v_{ij} \in \{0,1\}$,

$$\phi_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i = s, \\ -1, & \text{если } i = d, \\ 0, & \text{во всех иных случаях.} \end{cases} \qquad (6)$$

Рассмотрим существующие подходы к решению данной задачи.

I. Анализ известных решений

Полиномиально-алгоритмическое решение задачи нахождения кратчайшего пути было получено и описано в работе [3]. На базе этих методов происходит развитие современных полиномиально-алгоритмических методов оптимизации.

Одним из подходов к решению задачи маршрутизации является использование нейронных сетей. Одной из первых работ по решению задачи маршрутизации является работа Хопфилда [4, 11-14]. В работе [5] рассматривается подход к решению оптимизационных задач на примере решения задачи коммивояжера. Решение данной задачи было предложено проводить с использованием нейронной сети с обратными связями, называемой в дальнейшем нейронной сетью Хопфилда [5]. Основным результатом, предложенным в работах [6-10], является использование функции Ляпунова в качестве решающей функции оптимизационной задачи. Однако представленная в них функция

$$E = \frac{\mu_1}{2}\sum_x\sum_i\sum_{j\neq i} v_{xi}v_{xj} + \frac{\mu_2}{2}\sum_i\sum_x\sum_{y\neq x} v_{xi}v_{yi} + \frac{\mu_3}{2}\Big(\sum_x\sum_i v_{xi} - N\Big)^2 + \frac{\mu_4}{2}\sum_x\sum_i\sum_{y\neq x} c_{xy}v_{xi}\left(v_{y,i+1} + v_{y,i-1}\right), \qquad (7)$$

где μ_l $(l = \overline{1,4})$ – весовые коэффициенты, позволяла находить замкнутый путь на графе, длина которого гарантировано близка или равна минимальному пути.

Таким образом, использование выражения (7) не позволяет решить задачу маршрутизации в общем виде.

Следующий шаг к решению задачи маршрутизации был сделан в работе [4]. Авторы предложили следующий вид функции Ляпунова:

$$E = \frac{A}{2}\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} v_{ik}c_{ij}v_{jk+1} + \frac{B}{2}\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} v_{ik}v_{jk} + \frac{C}{2}\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} v_{ij} - N\right)^2, \qquad (8)$$

где A, B, C – также некоторые весовые коэффициенты.

Использование данной функции позволяет найти маршруты на произвольном графе и между произвольными узлами s и d, но она имела один существенный недостаток: для нахождения пути требовалось точно знать, какое количество узлов будет задействовано в формировании пути, что накладывало существенные ограничения на область применения данного подхода.

Усовершенствование функции *Ляпунова*, представленной в работе [4], было предложено в работе [5], где ее авторы предложили следующую оптимизационную функцию:

$$E=\frac{\mu_1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}c_{ij}\cdot v_{ij}+\frac{\mu_2}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\gamma_{ij}\cdot v_{ij}+\frac{\mu_3}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ij}-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ji}\right)^2+\frac{\mu_4}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ij}\cdot\left(1-v_{ij}\right)+\frac{\mu_5}{2}\left(1-v_{ds}\right). \quad (9)$$

Это была, по сути, первая функция *Ляпунова*, которая находила решение задачи нахождения кратчайшего пути из узлами s в узел d и была нечувствительна к изменению топологии ТКС и к динамическому изменению весов c_{ij}. Однако при реализации данной функции оказалось, что с ростом числа узлов в ТКС сеть склонна находить пути неоптимальной длины, а также циклические пути (петли).

Для преодоления приведенных трудностей в работе [6] предложена следующая функция *Ляпунова*:

$$E_{PC}=\frac{\mu_1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}c_{ij}\cdot v_{ij}+\frac{\mu_2}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\gamma_{ij}\cdot v_{ij}+\frac{\mu_3}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ij}-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ji}-\phi_i\right)^2+$$
$$+\frac{\mu_4}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ij}\cdot\left(1-v_{ij}\right)+\frac{\mu_5}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}v_{ij}\cdot v_{ji}. \quad (10)$$

Данная функция позволяет избежать петель при нахождении пути и обеспечивает более быструю сходимость к оптимальному решению, которое соответствует маршруту минимальной *длины*. Однако *для* более быстрой сходимости в работе [7] предложена усовершенствованная функция *Ляпунова*:

$$E_{AR}=E_{PC}+\frac{\mu_6}{2}\left[\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\left(\sum_{\substack{k=1\\ k\neq i,j}}^{N}v_{ik}-1\right)\cdot v_{ij}^2\right]+\frac{\mu_7}{2}\left[\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\left(\sum_{\substack{k=1\\ k\neq i,j}}^{N}v_{ik}-1\right)\cdot v_{ij}^2\right]. \quad (11)$$

Как видно (11) является развитием функции (10) за счет введения двух дополнительных слагаемых, которые и обеспечивали более быструю сходимость расчетной процедуры.

Дальнейшее развитие идей маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда получено в работе [8]. Предложенная в данной статье функция *Ляпунова* (энергии нейронной сети) имеет следующий вид:

$$E_{PKH} = \frac{\mu_1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\left(v_{ij}\cdot\sum_{\substack{k=1\\ k\neq 1}}^{N}\left(1-c_{ik}\right)\cdot c_{ij}\right) + \frac{\mu_2}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\gamma_{ij}\cdot v_{ij} +$$

$$+\frac{\mu_3}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N} v_{ij} - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N} v_{ij} - \phi_i\right)^2 + \frac{\mu_4}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N} v_{ij}\cdot\left(1-v_{ij}\right) + \frac{\mu_5}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq 1}}^{N}\left(v_{ij}\cdot\sum_{\substack{k=1\\ k\neq 1}}^{N} v_{ki}\right), \qquad (12)$$

где $v_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{если связь между узлами } i \textit{ и } j \textit{ участвует в решении;} \\ 0, \textit{в другом случае,} \end{cases}$

$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{если связь между узлами } i \textit{ и } j \textit{ не существует;} \\ 0, \textit{в противном случае.} \end{cases}$

Использование функции (12) позволяет получить более высокую скорость сходимости решений для достаточно большого количества узлов в ТКС.

В работе [9] проведен анализ возможностей по использованию для решения задачи маршрутизации нейронных сетей, отличных от сетей Хопфилда [10]. Полученные при этом результаты свидетельствуют о том, что более приемлемыми для решения задач данного вида являются именно нейронные сети Хопфилда.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что исследования в данной области необходимо проводить в направлении поиска оптимизационных функций, которые позволят находить искомые решения за более короткое время (обеспечивая быструю сходимость) и на большем количестве узлов, а также исследовать возможность использования нейронных сетей Хопфилда для решения задачи маршрутизации по нескольким метрикам.

Таким образом, целью данной статьи является исследование возможностей по решению задачи маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда, определение предельных размеров ТКС, для которых возможно эффективное получение решений, а также разработка функции Ляпунова для решения задачи маршрутизации по нескольким метрикам.

II. Разработка функции Ляпунова с заданными свойствами для решения задачи маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда

При исследовании возможностей нейронных сетей для решения задачи маршрутизации [8] было показано, что необходимо использовать нейронную сеть Хопфилда, структура которой приведена на рис. 1 [5].

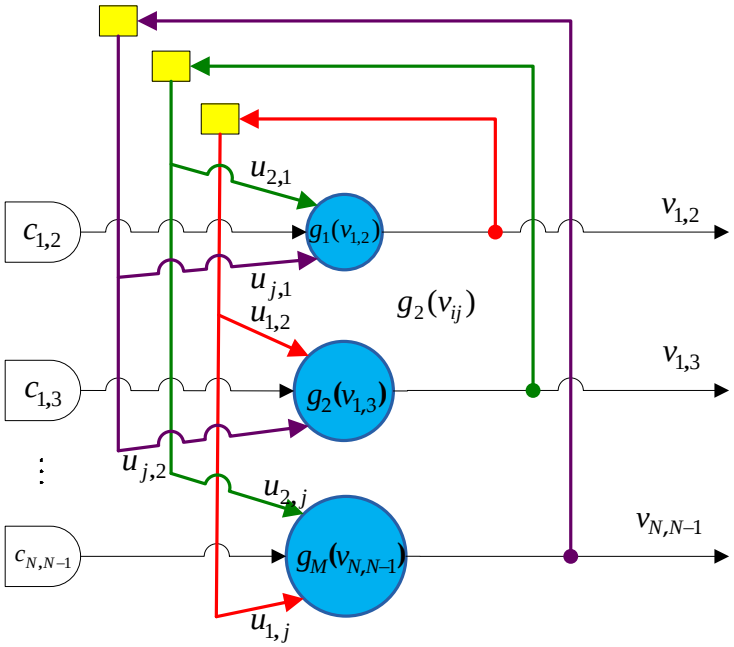

Рис. 1. Структура нейронной сети Хопфилда

При исследовании искусственной нейронной сети (ИНС) будем использовать сигмоидальную активационную функцию следующего вида:

$$v_{ij} = g_k(u_{ij}) = \frac{1}{1+e^{-au_{ij}}}, \tag{13}$$

где a – коэффициент, определяющий крутизну активационной функции; u_{ij} – веса связей нейронной сети.

При малых значениях a активационная функция имеет пологий склон, а при больших значениях a активационная функция стремится к пороговой функции.

Для проведения исследования возможностей ИНС Хопфилда при решении задачи нахождения пути наименьшей длины будут использоваться четыре структуры ТКС с количеством узлов 5, 10, 15 и 20, представленные на рис. 2 – рис. 5.

Для исследования воспользуемся формой функции Ляпунова (12), предложенной в работе [8]. Данная функция является усовершенствованным вариантом (11) и поэтому представляет интерес для дополнительных исследований и проверок.

Эта нейронная сеть содержит $N \times N$ нейронов $V = \|v_{ij}\|$, соответствующих количеству узлов в сети. Для более полного представления процесса поиска пути минимальной длины, необходимо понимать, какая роль отводится слагаемым функции (12) и весовым коэффициентам μ_1, μ_2, μ_3, μ_4, μ_5, которые находятся при составляющих функции (13).

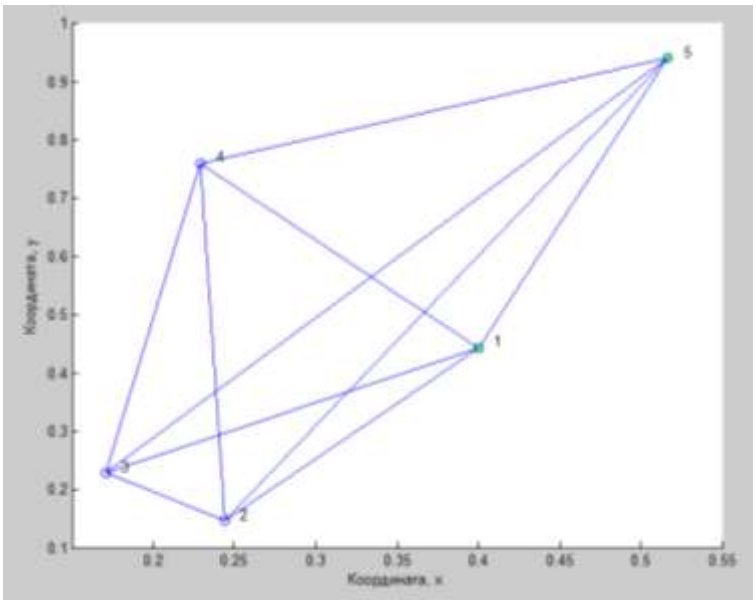

Рис. 2. ТКС с пятью узлами (полносвязная)

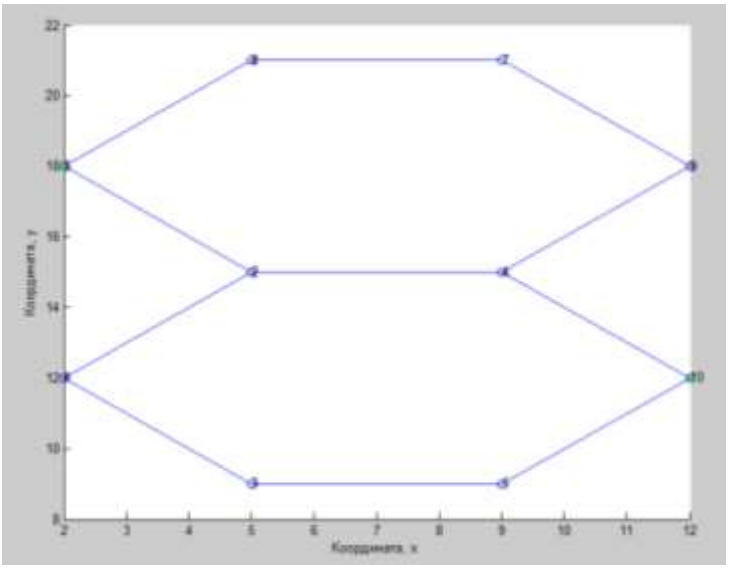

Рис. 3. ТКС с десятью узлами

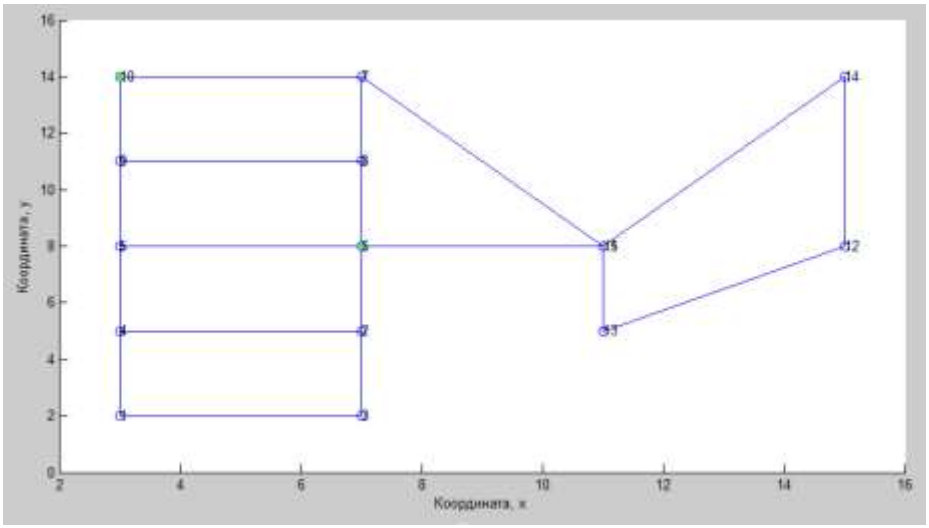

Рис. 4. ТКС с пятнадцатью узлами

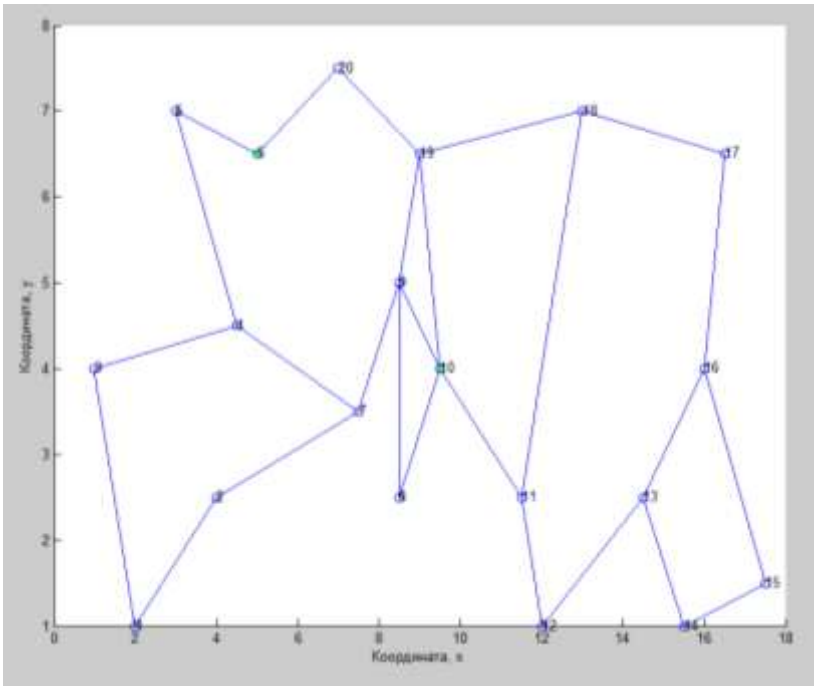

Рис. 5. ТКС с двадцатью узлами

Коэффициент μ_1 и соответствующая составляющая функции (12) влияют на скорость поиска минимальной стоимости передачи пакетов по маршруту из узла s в узел d. Введение составляющей функции при коэффициенте μ_2 обусловлено использованием только существующих связей. Например, некоторые дуги в графе могут отсутствовать, поэтому соответствующий коэффициент c_{ij} будет равен бесконечности. В этом случае γ_{ij} будет равен 1. В свою очередь это приведет к увеличению функции (13), а это недопустимо при решении задачи минимизации. При решении задач маршрутизации это гарантирует исключение несуществующих путей за счет блокировки включения в маршрут несуществующих каналов (связей).

Слагаемое с коэффициентом μ_3 введено для обеспечения выполнения условия сохранения потока в узле в соответствии с условием (5). Слагаемое с коэффициентом μ_4 вводилось для обеспечения выполнения условия $v_{ij} \in \{0,1\}$, не позволяя получить преимущество какому либо нейрону. Для реализации процесса поиска решения задачи нахождения кратчайшего пути необходимо определить алгоритм изменения весов связей в нейронной сети. Для этого определим матрицу весов в сети $U = \left\| u_{ij} \right\|$. В частном случае изменение весов связей в ИНС можно проводить, используя следующее выражение [2,3,5]:

$$\frac{\partial u_{ij}}{dt} = -u_{ij} - \frac{\partial E}{\partial v_{ij}}. \qquad (14)$$

Это позволит, используя метод градиентного спуска, минимизировать функцию (13) и найти устойчивое состояние сети Хопфилда, что будет соответствовать кратчайшему пути между узлами s и d. При исследовании возможности решения задачи поиска кратчайшего пути использовалась система MATLAB. При моделировании были заданы значения коэффициентов и переменных, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Коэффициенты для решения задачи нахождения пути минимальной длины

Параметр	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	a
Значение	950	2500	1900	100	500	50

Таблица 2. Результаты проведенных исследований

Количество узлов в сети, N	s	d	Оценка количества правильных решений, %	$P_{\min}$	$P_{\max}$
5	1	5	97,2	0,51	1,68
	2	3	100	0,11	1,28
	3	5	84,2	0,79	1,60
	5	4	99,9	0,33	1,59
	4	2	88,9	0,61	1,77
10	1	10	3	0,47	1,68
	2	7	10	0,34	1,59
	5	3	99	0,34	1,79
	3	9	87	0,37	1,63
	6	4	92	0,22	1,59
15	1	15	90	1,77	2,14
	6	12	87	2,32	3,22
	14	6	93	3,18	3,85
	7	12	92	1,87	3,73
	4	6	90	2,77	3,14
20	1	20	87	3,32	4,22
	5	17	93	3,18	4,85
	18	3	92	2,87	5,73
	17	4	93	3,18	7,85
	4	11	92	3,87	6,73

Некоторые результаты, полученные при проведении исследования, отражены на рис. 6 и 7, где представлены данные о полученных маршрутах, их длине и процентной доле таких путей в общем множестве рассчитанных маршрутов при реализации всех опытов.

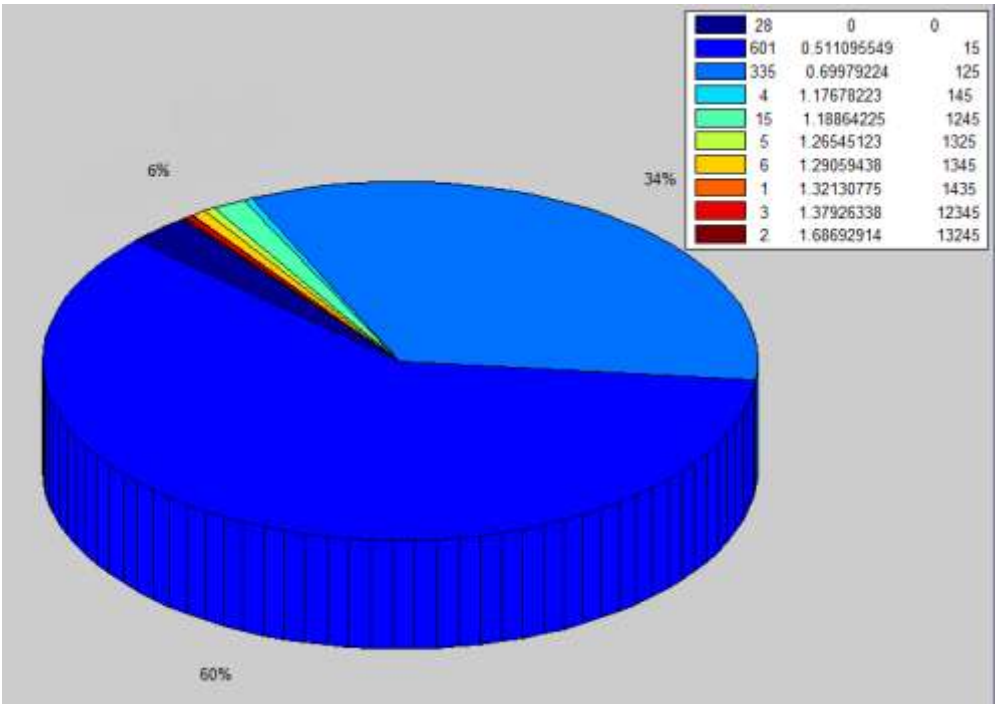

Рис. 6. Пример распределения результатов решения задачи поиска кратчайшего пути для ТКС, состоящей из 5 узлов

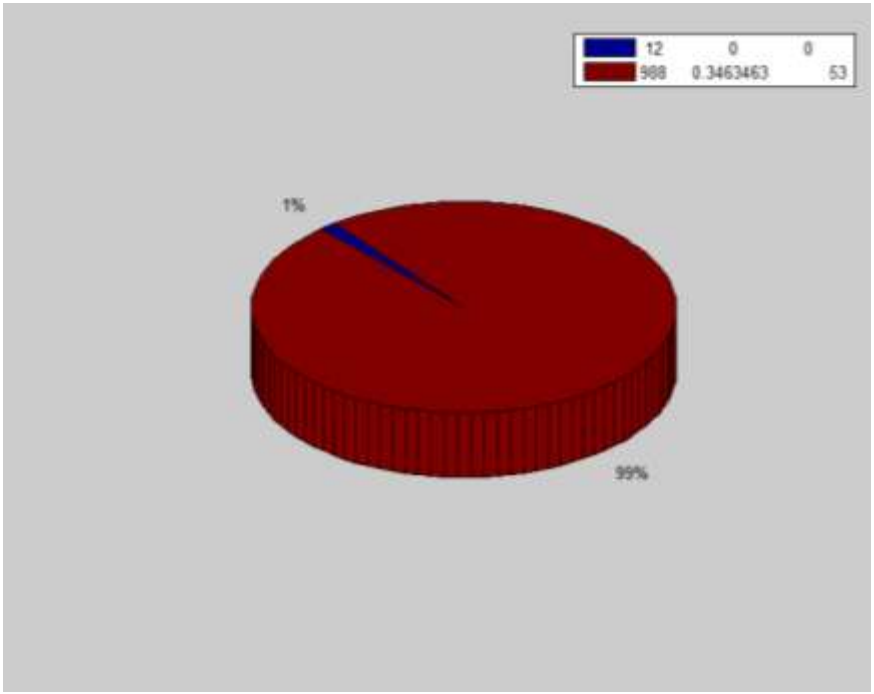

Рис. 7. Пример распределения результатов решения задачи поиска кратчайшего пути для ТКС, состоящей из 10 узлов

В дальнейшем было предложено регулировать число дуг, которые входят в маршрут. При этом была поставлена задача по разработке энергетической функции, которая минимизировала бы и суммарную «стоимость» маршрута из узла s в узел d, и количество дуг, из которых состоит маршрут. В результате проведенных исследований была предложена следующая функция энергии, в основе которой лежит выражение (12):

$$E = E_{PKH} + \frac{\mu_6}{2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^{N} v_{ij} \cdot h_{ij}\,, \tag{14}$$

где h_{ij} – элемент матрицы штрафов (H) за использование дуги из узла i в узел j,

при этом $h_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad i = j \ \text{ или } \ c_{ij} = 0; \\ h_{ij} > 0, & \text{если} \quad c_{ij} > 0. \end{cases}$

В отличие от функции (12) в выражении (14) введен новый член с коэффициентом μ_6, использование которого в конечном результате обеспечивает минимизацию количества дуг в получаемом решении. Количество дуг уменьшается при минимизации функции (14) за счет учета функций штрафа за каждую дополнительно использованную дугу. Кроме того, при использовании функции (14) необходимо определить значение коэффициента μ_6, что влияет на скорость сходимости ИНС и качество вырабатываемого решения.

При проведении исследований для примера использовалась структура ТКС, представленная на рис. 8.

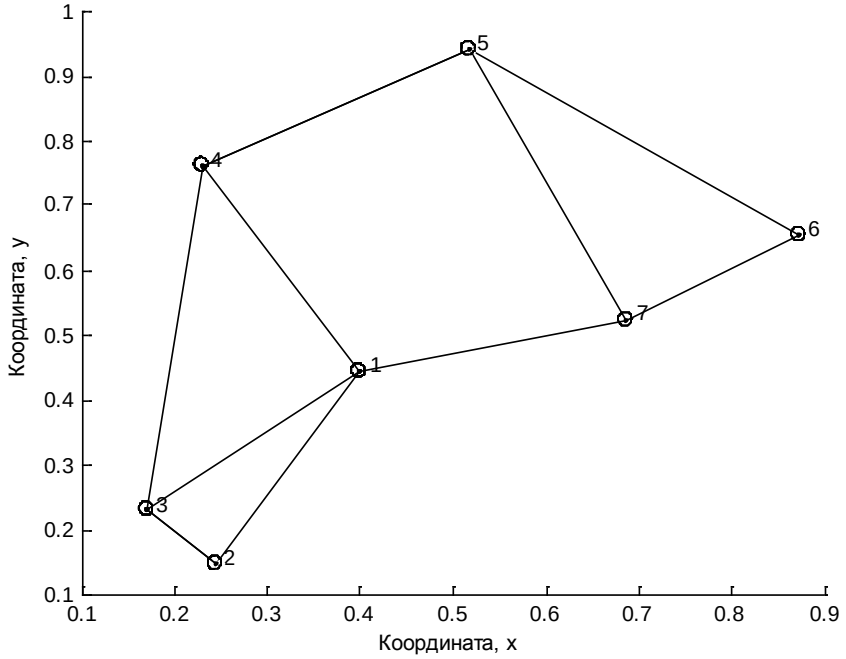

Рис. 8. Структура ТКС для исследования предложенной функции оптимизации

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты, представленные на рис. 9 – 12.

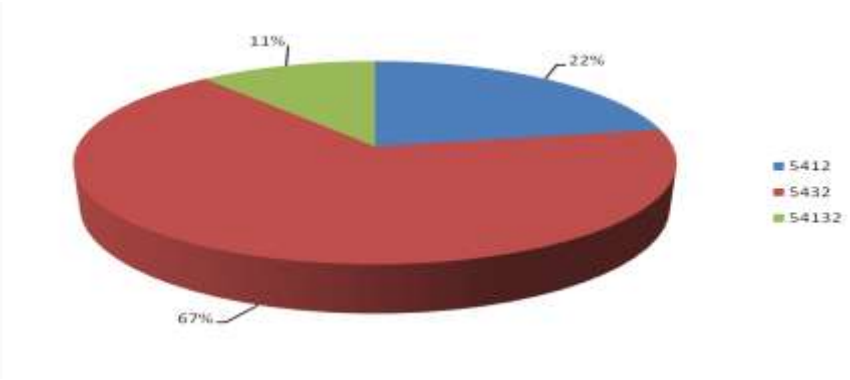

Рис. 9. Результаты решения задачи маршрутизации при использовании (14) *для* μ_6=500

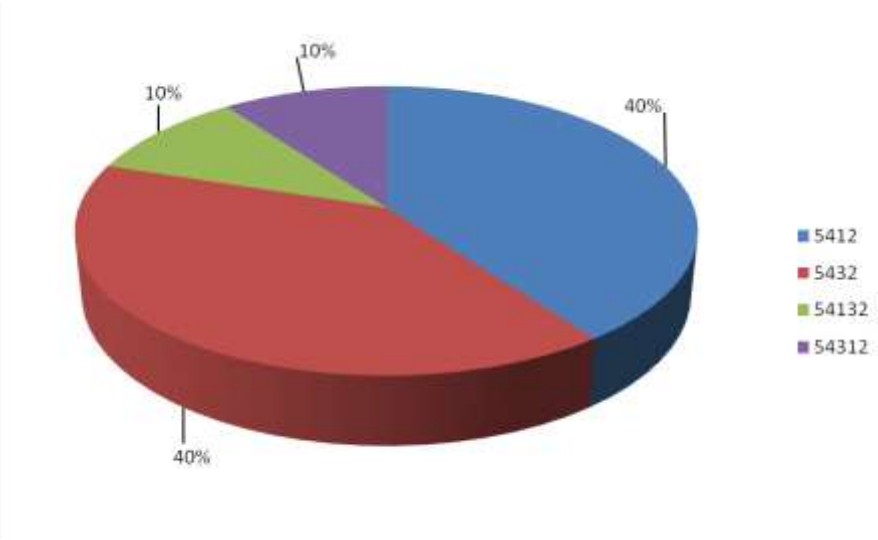

Рис. 10. Результаты решения задачи маршрутизации при использовании (14) *для* μ_6=1000

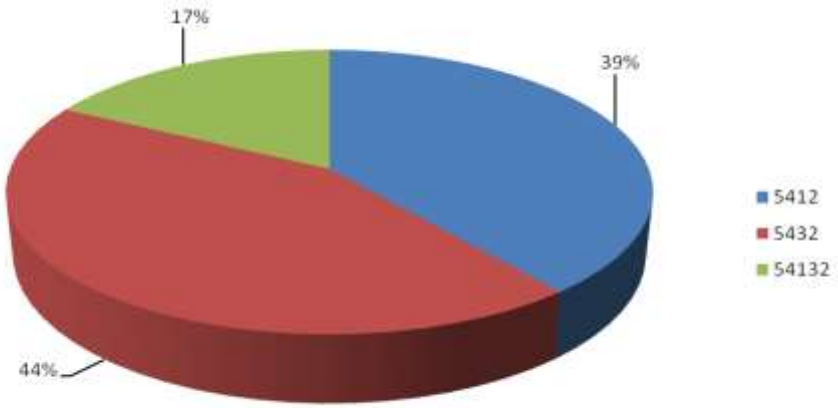

Рис. 11. Результаты решения задачи маршрутизации при использовании (14) *для* μ_6=250

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что коэффициенту μ_6 необходимо принимать значение 250, так как при этом сохраняется высокая скорость сходимости и обеспечивается высокое качество решения задачи поиска маршрута минимальной «стоимости» и с наименьшим количеством дуг.

Так в случае, если для оптимизации используется выражение (12), то получаем результат, представленный на рис. 12.

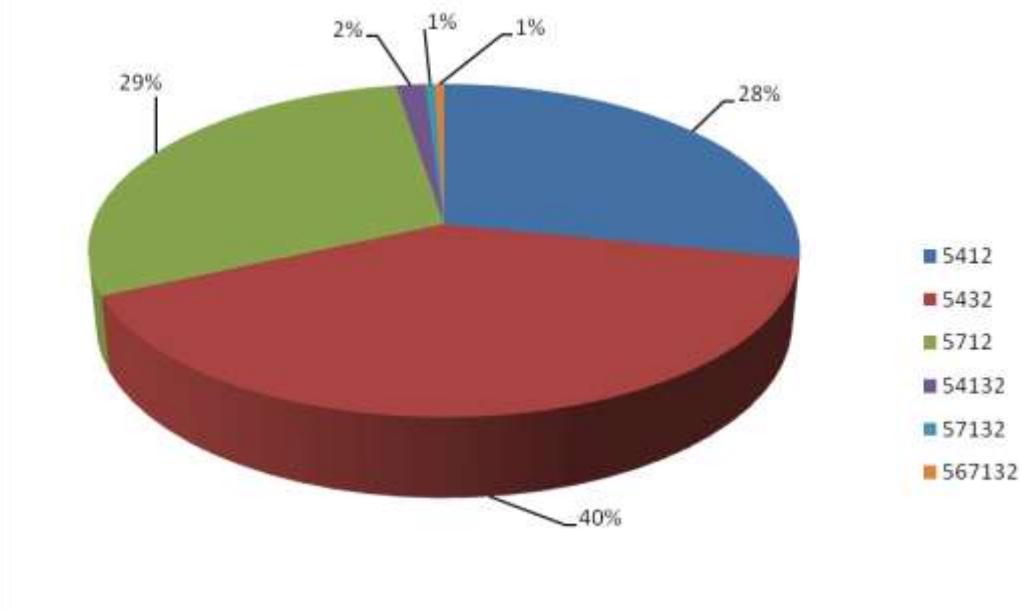

Рис. 12. Результаты решения задачи маршрутизации при использовании выражения (12) без регулирования числа используемых дуг

Из рис. 12 видно, что полученные решения могут содержать решения из четырех пяти и шести дуг, а при использовании выражения (14) решения содержат только маршруты из четырех и пяти дуг (рис. 11). При этом ИНС в ходе поиска маршрутов стремится находить больше решений, которые содержат пути меньшей длины с меньшим количеством дуг (рис. 11). Это позволяет утверждать, что предложенный вид функции (14) позволяет решать задачу маршрутизации с нахождением пути минимальной стоимости и с использованием минимального количества дуг .

Выводы

В статье проведен анализ существующих методов решения задачи маршрутизации с использованием нейронных сетей Хопфилда. Полученные данные позволяют утверждать, что на сегодняшний день завершился первичный этап накопления знаний и опыта по разработке нейросетевого метода решения задачи маршрутизации. Поэтому решение задачи маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда требует поиска и исследования таких функций энергии сети, которые обеспечивали бы быструю сходимость и высокое качество решения задачи маршрутизации.

В работе представлен результат проведенного исследования по разработке функции Ляпунова для нейронной сети Хопфилда, которая обеспечивает быструю сходимость нейронной сети к требуемым решениям, а также позволяет уменьшить количество ребер в вырабатываемом маршруте. Полученный результат позволяет утверждать, что использование нейросетевого подхода к решению задачи маршрутизации позволяет находить решения при решении задачи маршрутизации как по одной, так и по нескольким метрикам. В статье показана возможность решения данной задачи с использованием двух метрик. При этом не требуется полный перебор вариантов решения, а время решения задачи с одной и двумя метриками не отличается и составляет 0,0064 ± 0,002 секунды, что позволяет использовать данный подход в реальных устройствах маршрутизации.

Возможными направлениями дальнейших исследований могут быть отыскания методов конструирования функций Ляпунова для задач маршрутизации с заданными свойствами. Также перспективным является внедрение нейросетевых методов решения таких задач, как балансировка буферных и канальных ресурсов [11], решение задачи многопутевой маршрутизации [12], а также задач маршрутизации со многими метриками как линейными, так и нелинейными. Решение задачи нахождения метода конструирования функции Ляпунова для решения оптимизационных задач с использованием в нейронных сетях Хопфилда позволит найти широкое применение данных нейронных сетей во многих областях научных исследований.

Список литературы:

1. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – №1(9). – С. 3-26.

2. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Мельникова Л.И., Андрушко Д.В.* Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях // Прикладная радиоэлектроника. - 2005. – Том.4. – № 4. – С. 372-382.

3. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи даннях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 544с.

4. *Hopfield J.J., Tank D. W.* '"Neural' computations of decisions optimization problems // Biol. Cybern. – 1986. – Vol. 52.– P. 141-152.

5. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. Издание 2: Пер. с англ. –М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

6. *Zhang L., Thomopoulos C. A.* Neural network implementation of the shortrest path algorithm for trac routing in communication networks // In Proceedings of International Conference Neural Networks. – 1989. – P. 591.

7. *Ali M., Kamoun F.* Neural networks for shortest path computation and routing in computer networks // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1993. – Vol. 4, No. 6. – P. 941–953.

8. *Park D.C., Choi S.E.* A Neural Network based Multi-destination Routing Algorithm for Communication Network // Proc. of IJCNN. – 1998. – P. 1673-1678.

9. *Ahn C.W., Ramakrishna R.S.* Neural Network Based Near-Optimal Routing Algorithm // Proc. of ICONIP. – 2002. – Vol. 4. - P. 1771-1776.

10. *Павленко М.А.* Анализ возможностей искусственных нейронных сетей для решения задач однопутевой маршрутизации в ТКС [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 2 (4). – С. 118 – 127. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_pavlenko_perceptron.pdf.

11. *Лемешко А.В.* Многоуровневое управление трафиком в сети MPLSTE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Ахмад М. Хайлан // Проблеми телекомунікацій. – 2010. – № 1 (1). – С. 35 44. Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_traffic.pdf.

12. *Лемешко А.В.* Динамическая модель балансировки буферных и канальных ресурсов транспортной сети телекоммуникационной системы [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Д.В. Симоненко // Проблеми телекомунікацій. – 2010. – № 2 (2). – С. 42 –49. Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_dynamic.pdf.

13. *Лемешко А.В.* Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной // Праці УНДІРТ. – 2004. – 4 (40). – С. 12-18.

14. *Lemeshko A.V.* Probabilistic-Temporal Model of QOS-Routing with Precomputation of Routes under the Terms of Non-Ideal Reliability of Telecommunication Network // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, Issue 13. – P. 1151-1166 p.