



Моделирование динамики информационных потоков в маршрутах вычислительных сетей

А. А. Карандашев^а, аспирант, orcid.org/0000-0002-0358-0165

В. Л. Оленев^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-1817-2754, Valentin.Olenev@guap.ru

Г. С. Бритов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-0452-523X

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: при разработке современных узкоспециализированных программных систем по проектированию сетей с червячной коммутацией необходимо составлять таблицы маршрутизации. Для этого требуется получить эффективные конфигурации беступиковых маршрутов, прокладываемых на начальных стадиях проектирования сети. **Цель:** провести моделирование динамики инерционных процессов накопления данных в узлах-приемниках вычислительных сетей при передаче пакетов из узлов-передатчиков. **Результаты:** получены три примера схем сетей, которые позволяют рассмотреть классические сетевые структуры с разной степенью вычислительной нагрузки. Для каждой сети построены матрицы, описывающие ее структуру. Показаны результаты моделирования, проведенного при помощи специально разработанных сценариев в математическом программном обеспечении. Представлены результирующие графики весовой и переходной характеристик, а также целый ряд характеристик каждого исследуемого маршрута. Проведенное моделирование позволило убедиться в отсутствии информационного коллапса в беступиковых маршрутах. Отдельное исследование двух одновременно функционирующих путей передачи данных в сети с червячной коммутацией показывает устойчивый характер динамических процессов, что говорит о корректности предложенных моделей беступиковых червячных маршрутов. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы при проектировании вычислительных сетей в специализированном программном обеспечении. Анализ динамических характеристик призван помочь в принятии решений о выборе беступиковых маршрутов, предлагаемых разработчиком сети с червячной коммутацией.

Ключевые слова – динамика передачи данных, информационные потоки, беступиковые маршруты, червячная коммутация, весовая характеристика, переходная характеристика, процесс накопления данных, модели маршрутов.

Для цитирования: Карандашев А. А., Оленев В. Л., Бритов Г. С. Моделирование динамики информационных потоков в маршрутах вычислительных сетей. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 3, с. 39–50. doi:10.31799/1684-8853-2023-3-39-50, EDN: AUBKNL

For citation: Karandashev A. A., Olenev V. L., Britov G. S. Modeling the dynamics of information flows in the routes of computer networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 39–50 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-39-50, EDN: AUBKNL

Введение

Моделирование динамики маршрутов вычислительных сетей (ВС) представляет собой актуальную задачу при построении ВС и изучении их динамических характеристик. Так, в работе [1] рассмотрена проблема динамики маршрутов для современных сетевых структур. Проблемы или исследования, повлекшие за собой высокие темпы развития сетей, а также применение новых технических решений в этой сфере, описываются в работах [2–5]. Однако добавление новой аппаратуры и увеличение количества каналов передачи данных не всегда улучшает работу сети, а иногда даже сказывается негативно [6]. Кроме того, изменение классических сетей и замена оборудования дорого обходятся при использовании классических протоколов [7–9]. Поэтому разработка узкоспециализированных протоколов может помочь в решении проблем, которые не решить простым добавлением каналов передачи или добавлением

новых сетевых устройств [10]. При проектировании подобных систем с применением не только новых устройств, но и стандартов, важно проводить моделирование и оценивать характеристики получаемых сетей, чтобы удешевить и ускорить процесс разработки, не потеряв при этом в надежности получаемого продукта. Важно уметь правильно выделить основные характеристики разрабатываемых сетей и корректно оценить их. Так, в работах [11–13] исследованы проблемы моделирования, выделения параметров оценки и методов мониторинга ВС. Вместе с этим в работах [14–16] проведены параллели между социальными и вычислительными сетями и выделены метрики для оценки динамики и характеристик информационных потоков в социальных сетях. Согласно исследованиям [17, 18] задача определения и оценивания характеристик также актуальна для сферы информационной безопасности, для выявления атак в реальном времени и безопасности энергосистем.

Тем не менее множество узкоспециализированных систем по-прежнему остаются недостаточно изученными и не имеют четко выделенных характеристик для изучения соответствующих динамических процессов. Примером могут быть ВС с червячной коммутацией, для которых рассматриваемая задача до сих пор не имеет решения даже с использованием нейронных сетей, актуальность применения которых при разработке современных сетевых структур рассмотрена в работах [19–22].

Целью статьи является представление полученных динамических характеристик инерционных процессов, описывающих накопление данных информационных потоков в узлах-приемниках ВС при передаче пакетов из узлов-передатчиков. В связи с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

1) выделить отличительные особенности сетей с червячной коммутацией и беступиковой маршрутизацией;

2) разработать динамические модели узлов и беступиковых маршрутов в ВС с червячной коммутацией;

3) представить набор динамических характеристик процессов накопления данных от узла-источника к узлу-приемнику сети;

4) провести моделирование динамики информационных потоков.

В представленном исследовании используются формализмы теории сетей и теории систем управления.

Сети с червячной коммутацией и беступиковая маршрутизация

В сетях с червячной коммутацией используется особый способ маршрутизации пакетов – «на лету». В таких сетях данные не буферизируются в коммутаторе, а сразу же передаются на выходной порт. Если же он занят, то блокируется входной порт пакета. Он будет заблокирован, пока требуемый выходной порт не освободится. Таким образом, при коммутации «на лету» нет необходимости в буферной памяти в маршрутизаторах, за счет чего увеличивается скорость передачи данных в сети сравнительно с маршрутизацией, опирающейся на коммутацию пакетов с промежуточной буферизацией. При использовании промежуточной буферизации весь пакет сначала принимается в буфер маршрутизатора, затем определяется выходной канал, и только после этого пакет передается дальше. Если же необходимый выходной порт занят, то прием по входному порту приостанавливается.

Червячная коммутация позволяет увеличить производительность сети и понизить стоимость

оборудования, так как при отсутствии промежуточной буферизации не нужны дорогие буферы данных в каждом коммутирующем устройстве.

Однако беступиковая маршрутизация накладывает ограничения на возможные маршруты в сети передачи данных. Под «тупиком» понимается ситуация, когда заголовок пакета блокируется из-за того, что следующий канал занят передачей этого же пакета. Также «тупиком» считается состояние, когда несколько пакетов взаимно блокируют друг друга. В таком случае каждый пакет «упирается» в занятый другим пакетом виртуальный канал.

Отсутствие циклических зависимостей является необходимым и достаточным условием детерминированной беступиковой маршрутизации [23]. В сетях с червячной коммутацией особенно важно избегать блокировок типа «тупик» при передаче данных, поскольку пакеты не буферизируются и занимают весь канал на пути своего следования по размеру передаваемого пакета. Такие сети часто используются там, где необходима быстрая и надежная передача данных. Это дорогостоящие системы, где критически важно, чтобы данные не застревали в сети при передаче, приводя к сбоям при работе всей системы.

Современные методы анализа динамики вычислительных сетей

Современные методы анализа динамики ориентированы на маршруты для ВС с червячной коммутацией [24]. Последние исследования в рамках текущей тематики сосредоточены на изучении динамики блокировки ВС вирусами [25], разработке марковской модели поведения сетевых объектов вычислительных систем [26], разработке алгоритмической основы BeCAUSE для анализа сети [27].

В 2021 г. был предложен новый метод улучшения динамики для телекоммуникационных сетей [28]. Задача исследования динамики информационных потоков формулировалась на основе системного подхода, заключающегося в том, что в качестве системного выбирался многомерный показатель, учитывавший не только связи элементов, но и степень использования этих связей при функционировании сети. Это позволяло распределять информационные потоки путем изменения элементов матрицы маршрутизации в модели открытой сети массового обслуживания в целях оптимизации системы.

В работе [28] представлены не только методика, но и законченный алгоритм улучшения динамики, однако не дана оценка характеристик в явном виде и метод не адаптирован для сети с червячной коммутацией.

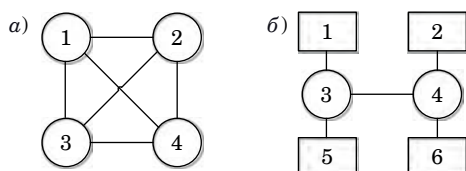
Последние исследования показывают актуальность изучения динамики информационных потоков для сетей с червячной коммутацией, так как для этого класса сетей методов изучения динамических характеристик на данный момент не существует. Для достижения заявленной в статье цели необходимо решить задачу по составлению динамических моделей узлов и беступиковых маршрутов в ВС с червячной коммутацией.

Вычислительная сеть как объект динамического моделирования информационных потоков

Вычислительная сеть представляет собой совокупность устройств, соединенных друг с другом с помощью каналов связи. Математической моделью ВС служит неориентированный граф, вершинами которого являются узлы сети, а ребрами – каналы связи. Примеры подобного описания ВС представлены на рис. 1, а и б. Каналы передачи данных в самой сети могут быть дуплексными. Дуплексные каналы позволяют с помощью прямой и обратной передачи данных организовывать в коммутаторах разнообразные маршруты информационных потоков, в том числе замкнутые. В замкнутых маршрутах из-за образования положительной обратной связи возможен информационный коллапс, когда в узле-приемнике происходит бесконечное накопление данных. Направление, в котором каждый дуплексный канал будет использоваться для каждого конкретного маршрута, зависит от заданных информационных потоков и схемы ВС.

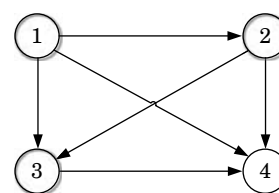
Узлы на рис. 1, а представляют устройства, совмещающие в себе функции вычислителя и коммутатора. В то же время могут быть сети, где узлы исполняют роль либо вычислителя, либо коммутатора (см. рис. 1, б).

В приведенной на рис. 2 схеме ВС с четырьмя узлами источниками пакетов с данными являются узлы № 1, 2, 3, а приемниками являются узлы № 2, 3, 4. Причем каждый узел представляет собой вычислитель-коммутатор. Узлы № 2 и 3,



■ **Рис. 1.** ВС с дуплексными каналами и двумя видами узлов: а – вычислитель и коммутатор вместе; б – вычислитель и коммутатор отдельно

■ **Fig. 1.** Networks with duplex channels and two types of nodes: а – calculator and switch together; б – calculator and switch separately



■ **Рис. 2.** ВС с четырьмя узлами
■ **Fig. 2.** Network with four nodes

получая данные от соседа, выполняют свою коммутационную задачу и передают данные дальше. В таком случае в сети возможны различные червячные маршруты передачи пакетов с данными от узлов-источников к узлам-приемникам. Их можно разделить как по длине, учитывая количество проходимых каналов связи, так и по типу узла-источника:

- короткие беступиковые маршруты с одним каналом связи между вершинами графа сети: $1 \rightarrow 2$; $1 \rightarrow 3$; $1 \rightarrow 4$;

- длинные беступиковые маршруты с двумя и более каналами связи в маршруте между вершинами графа сети: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$; $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4$; $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$;

- маршруты, источником информационного потока которых является узел № 2: $2 \rightarrow 3$; $2 \rightarrow 4$; $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$;

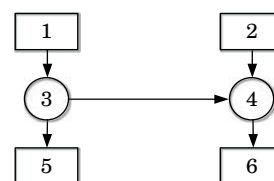
- маршрут, источником информационного потока которого является узел № 3: $3 \rightarrow 4$.

Если ВС строится из узлов различных типов (рис. 3), то в такой сети узлы, показанные прямоугольниками, соответствуют вычислителям, а узлы, показанные кругами, соответствуют коммутаторам. Здесь возможны различные червячные маршруты:

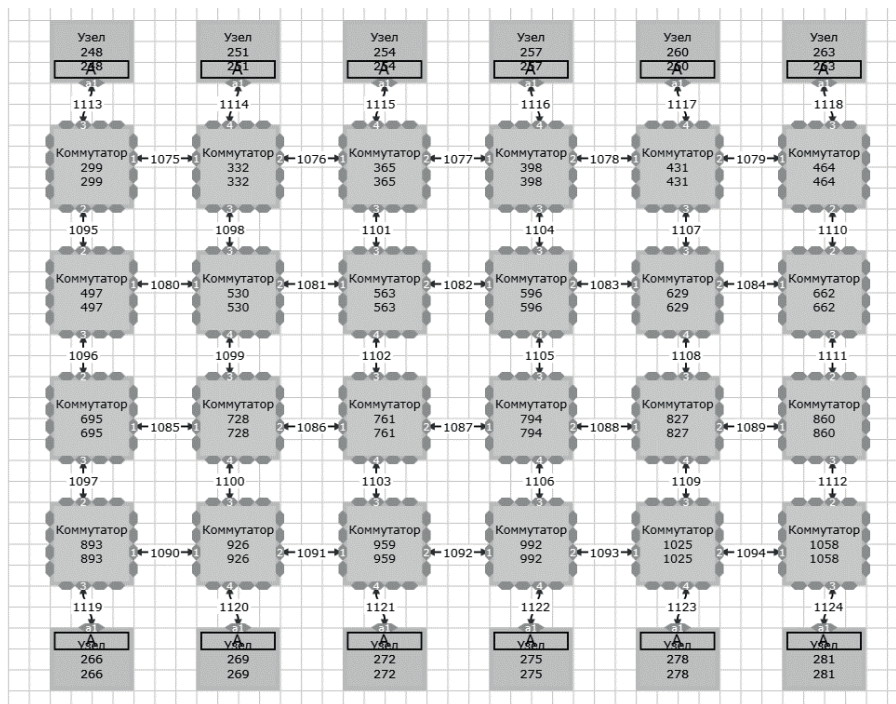
- маршруты, источником информационного потока в которых является узел № 1: $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$; $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$;

- маршрут, источником информационного потока в котором является узел № 2: $2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$.

Другим примером ВС может служить схема, представленная на рис. 4. Такая сеть имеет топологию «решетка 4 × 6». В сети 12 узлов, которыми являются вычислители, и 24 узла, которыми являются коммутаторы. Причем каждое вычислительное устройство передает данные



■ **Рис. 3.** ВС с двумя видами узлов
■ **Fig. 3.** Network with two types of nodes



■ **Рис. 4.** ВС с топологией «решетка 4 × 6»
 ■ **Fig. 4.** Network with “4 x 6 grid” topology

каждому другому вычислительному устройству в сети. Благодаря большому количеству коммутаторов и сложной сетевой структуре возможно большое количество различных беступиковых маршрутов между каждой парой узлов, что позволяет рассмотреть новый подход к оценке динамических характеристик беступиковых маршрутов сетей с червячной коммутацией в условиях большой вычислительной нагрузки [29].

Червячным маршрутом, проходящим по сети рис. 4, служит маршрут с узлом-источником № 248 и узлом-приемником № 251. Самый короткий маршрут из возможных беступиковых маршрутов между заданными вычислителями имеет следующий вид: узел 248 → коммутатор 299 → коммутатор 332 → узел 251.

Для указанных маршрутов выполним моделирование процесса накопления данных в конечных узлах. Полученные результаты моделирования используются для анализа беступиковости маршрутов и отсутствия информационного коллапса, возникающего в замкнутых маршрутах.

Динамические модели узлов вычислительной сети

Динамическими моделями узлов ВС, которыми являются вычислители и коммутаторы, могут служить аperiodические звенья 1-го порядка. Каналы в сети считаются идеальными.

Известно, что в передаточной функции аperiodического звена 1-го порядка имеется только два параметра: $K_{зв}$ — коэффициент передачи звена, $T_{зв}$ — постоянная времени звена. Параметр $K_{зв}$ показывает, как осуществляется обработка данных в вычислителе. Если он равен 1, то объем входных данных сохраняется. Этот объем может уменьшиться или увеличиться. Параметр $T_{зв}$ [мкс] показывает время, которое вычислительное устройство тратит на прием, обработку и передачу данных.

Время переходного процесса принято измерять следующим образом: $T_{п.п} = 3T_{зв}$. Пока не закончится переходный процесс, нельзя считать, что звено готово принимать новый пакет данных. Длина обрабатываемого пакета должна быть не меньше времени переходного процесса, иначе произойдет потеря данных.

Обычно выделяют две временные характеристики звена — весовую и переходную. Каждая из них представляет собой затухающие экспоненты с коэффициентом затухания $K_{зт} = 1/T_{зв}$.

Оценка постоянной времени $T_{зв}$ связана с допуском на получение результата обработки данных Δ и следует из вида весовой функции $h(t)$ в момент времени переходного процесса:

$$h_{зв}(T_{п.п}) = \frac{K_{зв}}{T_{зв}} \cdot e^{-\frac{3T_{зв}}{T_{зв}}} = \frac{K_{зв}}{T_{зв}} \cdot 0,0498 = \Delta.$$

Следовательно, постоянная времени вычисляется следующим образом:

$$T_{зв} = \frac{0,0498 \cdot K_{зв}}{\Delta}.$$

Постоянная времени $T_{зв}$ определяет инерцию звена сети при накоплении данных.

Например, если $K_{зв} = 1$, $\Delta = 0,05$, то $T_{зв} \approx 1$ мкс. Получается простая передаточная функция звена $W_{зв}(s) = 1/(s + 1)$. При $T_{п.п} = 3T_{зв} = 3$ мкс процесс накопления данных в каждом звене заканчивается с точностью 0,05.

Таким образом, информация о динамических характеристиках звена сети включает время накопления данных ($T_{п.п} = 3T_{зв}$) и относительный объем данных в стационарном режиме ($W_{зв}(0) = K_{зв}$). Для проведения моделирования и достижения цели статьи необходимо построить динамическую модель беступиковых маршрутов, по которым передаются информационные потоки в сети с червячной коммутацией.

Динамическая модель маршрута вычислительной сети

Маршрут ВС может быть представлен цепочкой звеньев согласно последовательному перечислению номеров узлов в схеме сети. Так, маршрут $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$ в вычислительной сети, приведенной на рис. 3, является последовательным соединением узла № 1 (вычислительного устройства 1), узла № 3 (коммутатора 3), узла № 4 (коммутатора 4) и узла № 6 (вычислительного устройства 6).

Следовательно, динамическая модель маршрута представляет собой последовательное соединение апериодических звеньев 1-го порядка. В таком случае передаточная функция маршрута вычисляется как произведение их передаточных функций. Коэффициент передачи будет произведением коэффициентов передачи вычислительного устройства и коммутатора. Порядок динамической системы будет равен количеству звеньев. Полюсами ее служат обратные значения постоянных времени звеньев, взятые со знаком минус.

В общем случае для построения формулы передаточной функции маршрута в ВС необходимо задать три матрицы: **A**, **B** и **C**. Матрица **A** определяет цепочку связанных узлов, где столбцы определяют направление, откуда передается пакет с данными. Строки определяют направление, куда пакет приходит. Матрицы **B** и **C** определяют номера начальной и конечной точек маршрута. Для рассмотренного маршрута $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$ матрицы будут иметь вид

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Согласно матрице **A** на вход коммутатора 3 приходит выход вычислительного устройства 1, и выход коммутатора 3 поступает на вход коммутатора 4, а его выход поступает на вход вычислительного устройства 6. Матрицы **B**, **C** определяют, что начальным является вычислитель 1, а конечным – вычислитель 6.

После построения указанных матриц должна быть сформирована диагональная матрица передаточных функций. Для рассматриваемого маршрута она будет иметь вид

$$W(s) = \begin{bmatrix} W_c(s) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_k(s) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_k(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_k(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_k(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_c(s) \end{bmatrix}.$$

Тогда передаточную функцию маршрута можно вычислить следующим образом:

$$W_m(s) = C \cdot (E - W(s) \cdot A) \cdot W(s) \cdot B.$$

Здесь **E** – единичная матрица. С помощью программы-сценария математического программного обеспечения передаточная функция рассматриваемого маршрута будет рассчитана при числовых значениях параметров передаточных функций вычислителей и коммутаторов в следующем разделе.

Моделирование динамики маршрутов вычислительной сети

Моделирование динамики [30, 31] представленных выше маршрутов позволит проверить предлагаемые динамические модели.

Моделирование динамики накопления данных в конечном узле маршрута $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ для сети рис. 2 выполнено в специально разработанной программе в математическом пакете MatLab. Для этого маршрута матрицы имеют следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Учитывая передаточную функцию отдельно звена

$$W_{зв} = \frac{1}{s + 1},$$

можно получить передаточную функцию для всего маршрута

$$W_m = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1}.$$

В результате проведенного моделирования получены четыре полюса маршрута: $-1,0002 + 0,0000i$; $-1,0000 + 0,0002i$; $-1,0000 - 0,0002i$; $-0,9998 + 0,0000i$.

Поведение весовой и переходной характеристик показано на рис. 5.

Из графика переходной характеристики видно, что время переходного процесса $T_{п.п}$ занимает ≈ 12 мкс, время разгона $T_p \approx 3$ мкс, а время запаздывания $T_3 \approx 1$ мкс.

При моделировании реакции системы на входной сигнал подавался единичный импульс длительностью 5 мкс (рис. 6, а). Этот показатель почти в 2 раза меньше времени переходного про-

цесса. Выходной сигнал системы представлен на рис. 6, б.

Если длина пакета данных меньше 12 мкс, то происходит потеря данных в размере $\approx 15\%$, как это видно на рис. 6, б. T_p составляет 11 мкс.

Выявлены следующие динамические характеристики рассматриваемого маршрута:

- стационарный коэффициент передачи = 1;
- степень устойчивости ≈ 1 .

Полученные данные подтверждают беступиковость рассмотренного маршрута. Если при моделировании маршрута с «тупиком» стационарный коэффициент передачи будет становиться бесконечным или отрицательным, то весовая и переходная характеристики будут стремиться к бесконечности.

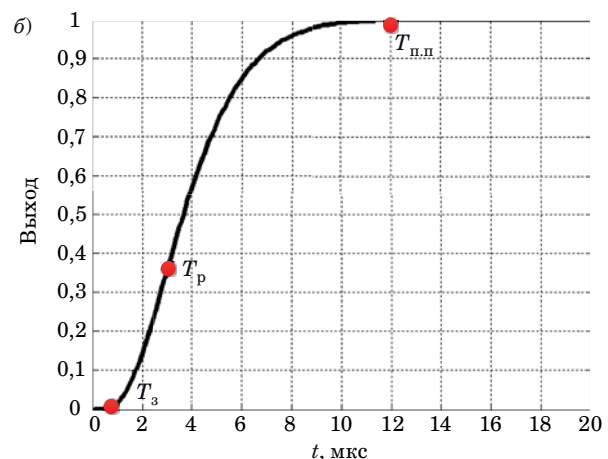
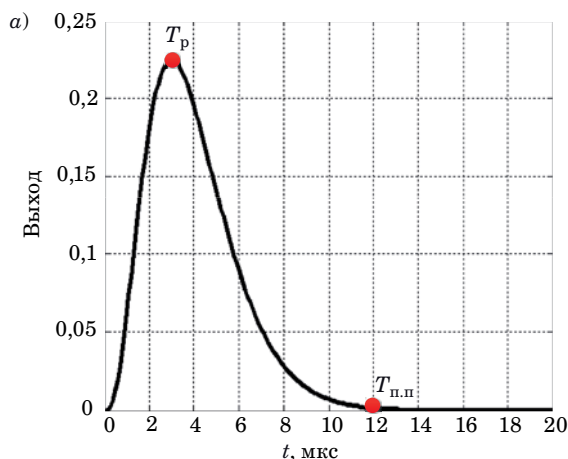
Моделирование динамики накопления данных в конечном узле маршрута $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$ для сети рис. 3 выполнялось при помощи двух отдельных типов устройств: вычислителей и коммутаторов. Матрицы **A**, **B** и **C** для маршрута имеют вид, представленный выше. Передаточные функции вычислительного устройства и коммутатора заданы следующим образом:

$$W_c = \frac{1}{s + 1}; W_k = \frac{1}{4 \cdot s + 1}.$$

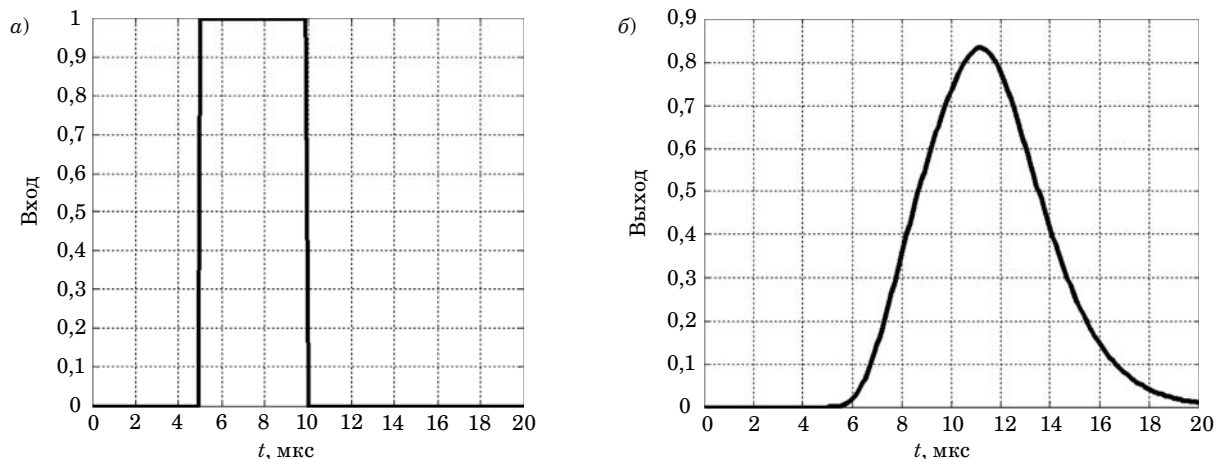
Получена передаточная функция маршрута

$$W_m = \frac{0,0625}{s^4 + 2,5s^3 + 2,062s^2 + 0,625s + 0,0625}.$$

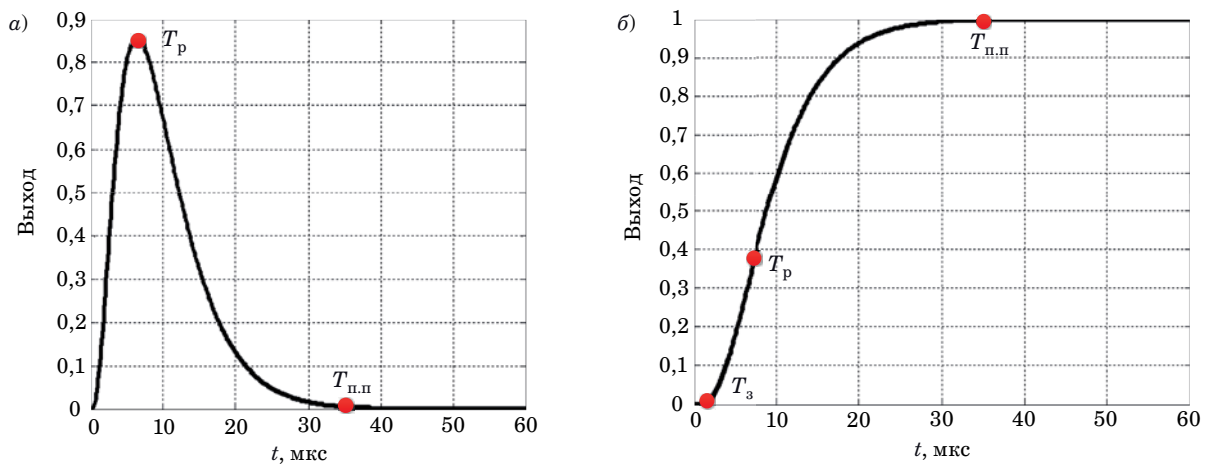
В результате моделирования, проведенного в математическом программном обеспечении, были построены весовая и переходная характеристики (рис. 7, а и б). Определены четыре полюса рассматриваемого маршрута: $-1,0000 + 0,0000i$; $-1,0000 - 0,0000i$; $-0,2500 + 0,0000i$; $-0,2500 -$



■ **Рис. 5.** Весовая (а) и переходная (б) характеристики маршрута $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$
 ■ **Fig. 5.** Weight (а) and transient (б) characteristics of route $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$



■ **Рис. 6.** Входной импульсный сигнал (а) и выходной сигнал (б) ВС
 ■ **Fig. 6.** Input pulse signal (а) and output signal (б) network



■ **Рис. 7.** Весовая (а) и переходная (б) характеристики маршрута 1 → 3 → 4 → 6
 ■ **Fig. 7.** Weight (а) and transient (б) characteristics of route 1 → 3 → 4 → 6

– 0,0000i, – которые определяют степень устойчивости маршрута 0,25.

Согласно графикам, $T_{п.п} \approx 50$ мкс, $T_p \approx 7$ мкс, $T_з \approx 5$ мкс.

Выявлены следующие динамические характеристики рассматриваемого маршрута:

- стационарный коэффициент передачи = 1;
- степень устойчивости $\approx 0,25$.

При моделировании реакции системы на входной сигнал подавался единичный импульс длительностью 5 мкс (рис. 8, а). Длительность входного сигнала почти в 10 раз меньше времени переходного процесса. Выходной сигнал системы показан на рис. 8, б. Длина пакета данных должна быть не меньше 50 мкс. Потеря данных $\approx 60\%$, как это видно на рис. 8, б.

Моделирование динамики накопления данных в конечном узле маршрута узел 248 → ком-

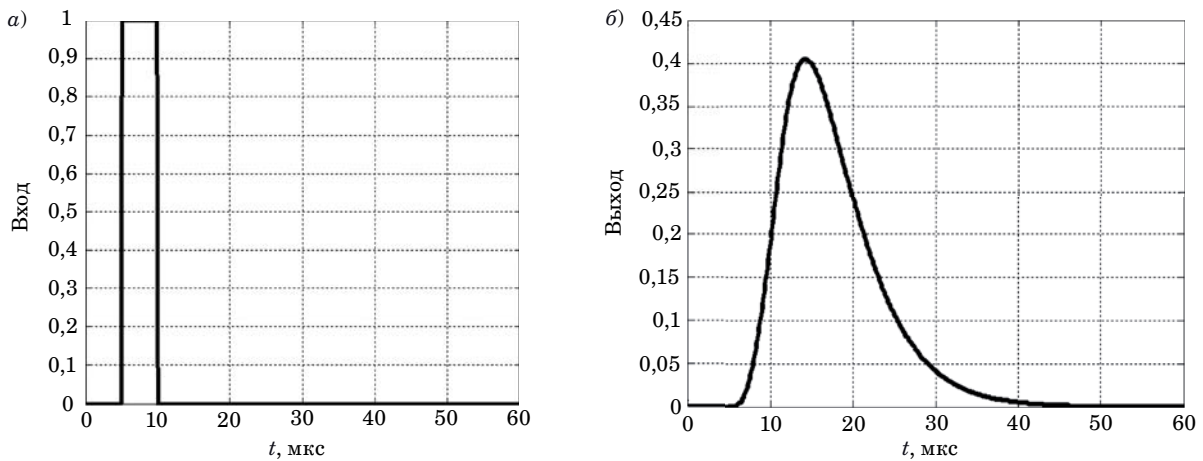
мутатор 299 → коммутатор 332 → узел 251 сетевой структуры рис. 4 выполнялось при помощи матриц и передаточных функций звеньев маршрута, построенных аналогично ранее рассмотренным случаям. При этом передаточная функция самого маршрута имеет вид

$$W_m = \frac{0,01563}{s^4 + 1,75s^3 + 0,9375s^2 + 0,2031s + 0,01563}$$

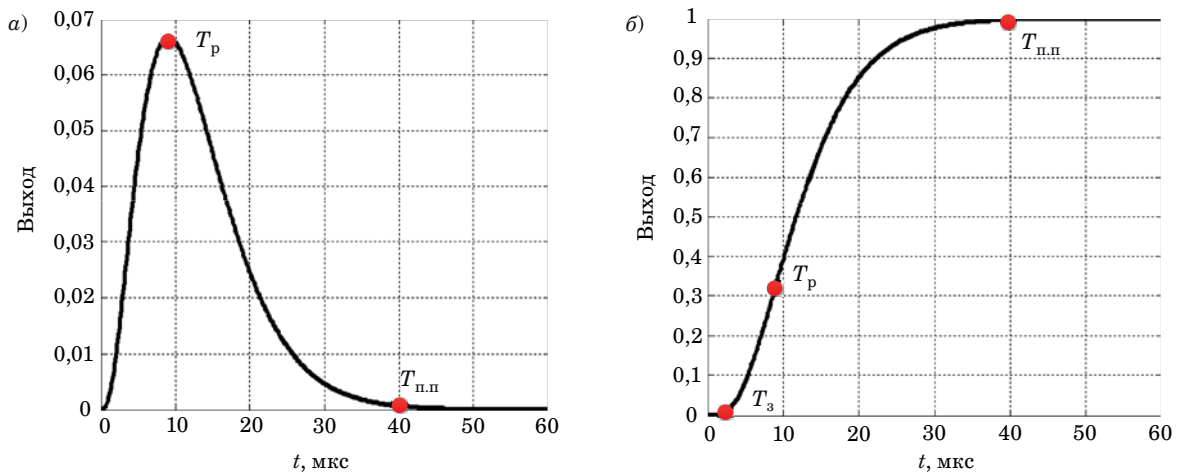
Весовая и переходная характеристики маршрута узел 248 → коммутатор 299 → коммутатор 332 → узел 251 показаны на рис. 9, а, б.

Динамические характеристики для данного маршрута имеют следующие параметры:

- стационарный коэффициент передачи = 1;
- степень устойчивости $\approx 0,2500$;
- время переходного процесса 40 мкс;



■ **Рис. 8.** Оценка потери данных при помощи входного импульсного сигнала (а) и выходного сигнала (б) ВС
 ■ **Fig. 8.** Input pulse signal (а) and output signal (б) network



■ **Рис. 9.** Весовая (а) и переходная (б) характеристики маршрута узел 248 → коммутатор 299 → коммутатор 332 → узел 251
 ■ **Fig. 9.** Weight (а) and transient (б) characteristics of route node 248 → switch 299 → switch 332 → node 251

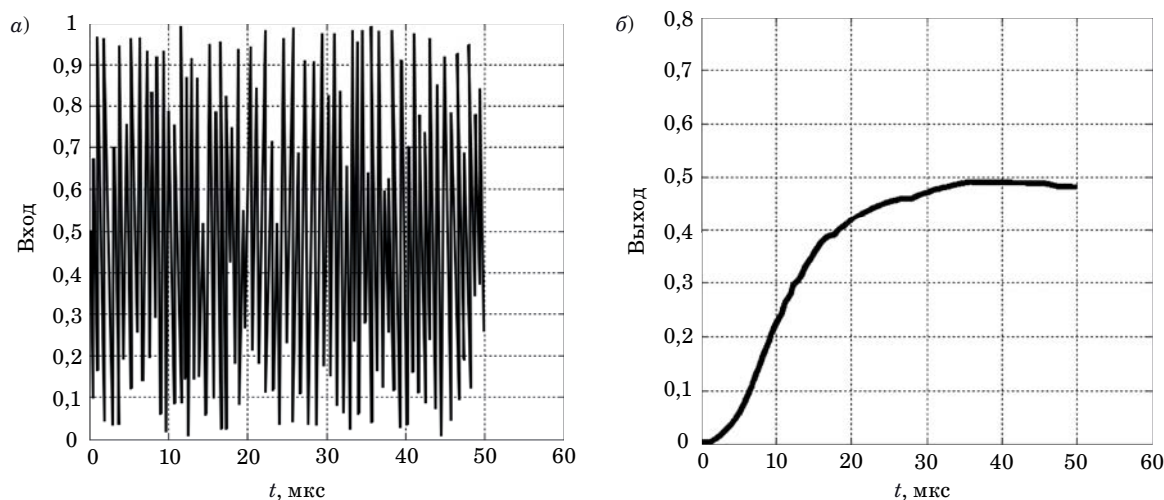
- время разгона 9 мкс;
- время запаздывания 2 мкс.

Для исследования данного маршрута в условиях высокозагруженной сети на вход системы подавался случайный сигнал, отражающий различные события в сети. Реакция системы на сложный сигнал показана на рис. 10, б. Как видно из графика, характер поведения выходного сигнала является стабильным и маршрут проложен верно.

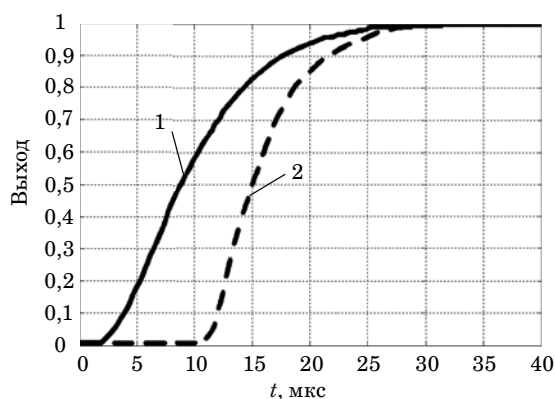
Результаты моделирования двух видов ВС показывают справедливость принятых подходов к построению динамических моделей сетей. Следует отметить, что все стационарные коэффициенты передачи равны 1. Все модели сетей устойчивы, их степени устойчивости равны 1 и 0,25. В замкнутых маршрутах из-за образова-

ния положительной обратной связи возможен информационный коллапс, когда в узле-источнике происходит бесконечное накопление данных. При этом стационарный коэффициент передачи становится бесконечным, а весовая и переходная характеристики стремятся к бесконечности.

Предложенная модель динамики накопления данных в информационных потоках позволяет получить результаты совместного прохождения червячных маршрутов через один коммутатор. Например, рис. 3 показывает, что через коммутатор 3 проходят два маршрута $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$; $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$. На рис. 11 показаны результаты моделирования процесса совместного использования рассматриваемых маршрутов. Оба маршрута не мешают друг другу.



■ **Рис. 10.** Входной случайный сигнал (а) и выходной сигнал (б) ВС
 ■ **Fig. 10.** Input random signal (а) and output signal (б) network



■ **Рис. 11.** Сравнение переходных характеристик маршрутов $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$ (линия 1) и $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$ (линия 2)
 ■ **Fig. 11.** Comparison of transient responses of routes $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6$ (line 1) and $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$ (line 2)

Выполненное моделирование относится к сетям не очень высокого порядка. Однако следует отметить, что построенные динамические модели являются линейными системами. Поэтому увеличение порядка сетей не приведет к получению любых новых результатов.

Заключение

В рамках проведенного исследования обоснована актуальность получения динамических характеристик, описывающих накопление данных информационных потоков в маршрутах ВС с беступиковой маршрутизацией и червячной

коммутацией. Выделены особенности таких сетей, представлены динамические модели узлов и беступиковых маршрутов. Впервые разработаны динамические модели узлов и беступиковых маршрутов в ВС с червячной коммутацией, и также впервые получен набор динамических характеристик процессов накопления данных от узла-источника к узлу-приемнику сети. Важным результатом работы являются данные моделирования процессов накопления данных в информационных потоках в беступиковых маршрутах ВС с червячной коммутацией. В частности, достигнута поставленная цель по получению динамических характеристик червячных маршрутов.

По результатам моделирования определено, что динамические характеристики соответствуют ожидаемым результатам. Оценены такие параметры, как стационарный коэффициент передачи, степень устойчивости, время переходного процесса, время разгона и время запаздывания.

Динамические модели маршрутов оказались устойчивыми, что обеспечивает стабильную работу всей системы. Для определения устойчивости использовались полюса передаточной функции маршрута. Согласно полученным результатам устойчивая динамика наблюдалась для всех исследуемых беступиковых маршрутов, что говорит об успешно пройденной проверке и корректности проложенных маршрутов рассматриваемых сетей. Все полученные параметры удовлетворяют ограничениям, принятым в сетях с червячной коммутацией.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании ВС в специализированном программном обеспечении.

Литература

1. Gouveia P., Neves J., Segarra C., Liechti L., Issa Sh., Schiavoni V., Matos M. Kollaps: decentralized and dynamic topology emulation. *Proc. of the Fifteenth European Conf. on Computer Systems (EuroSys'20)*, April 2020, New York, NY, USA, 2020, Article 23, pp. 1–16. doi:10.1145/3342195.3387540
2. Mukul K. Evolution of routers. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2021, vol. 10, no. 10, pp. 510–518. doi:10.48175/IJARSCT-1284
3. Camarero C., Carmen M., Enrique V., Ramón B. Projective networks: Topologies for large parallel computer systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, vol. 28, no. 7, pp. 1–14. doi:10.48550/arXiv.1512.07574
4. Ebert A., Wu P., Mengersen K., Ruggeri F. Computationally efficient simulation of queues: The R Package queuecomputer. *Journal of Statistical Software*, 2020, vol. 95, no. 5, pp. 1–29. doi:10.18637/jss.v095.i05
5. Wong R. T. Telecommunications network design: Technology impacts and future directions. *Networks*, 2021, vol. 76, no. 3 pp. 205–224. doi:10.1002/net.21997
6. Fanou R., Huffaker B., Mok R. K., Claffy K. Unintended consequences: effects of submarine cable deployment on internet routing. *Passive and Active Measurement. PAM, Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12048, no. 1, pp. 211–227. doi:10.1007/978-3-030-44081-7_13
7. Al-Ani D. R., Al-Ani A. R. The performance of IPv4 and IPv6 in terms of routing protocols using GNS 3 simulator. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 130, no. 1, pp. 1051–1056. doi:10.1016/j.procs.2018.04.147
8. Bolanowski M., Byczek T. Measure and compare the convergence time of network routing protocols. *ITM Web of Conferences 21(1)*, 2018, vol. 21, no. 13, pp. 1–9. doi:10.1051/itmconf/20182100013
9. Sochor T., Sochorova H. Dynamic routing protocol convergence in simulated and real IPv4 and IPv6 networks. *Cybernetics and Automation Control Theory Methods in Intelligent Algorithms, Proc. of 8th Computer Science On-line Conf.*, 2019, vol. 986, no. 3, pp. 117–126. doi:10.1007/978-3-030-19813-8_13
10. Kala S. M., Sathya V., Seah W. K. G., Yamaguchi H., Higashino T. Evaluation of theoretical interference estimation metrics for dense Wi-Fi networks. *Intern. Conf. on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 6–8 Jan 2021, pp. 351–359. doi:10.1109/COMSNETS51098.2021.9352925
11. Osukhivska H., Tysh I., Lobur T., Shylinska I., Lupenko S. Method for estimating the convergence parameters of dynamic routing protocols in computer networks. *IEEE 16th Intern. Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 228–231. doi:10.1109/CSIT52700.2021.9648792
12. Xu L., Liang Y., Duan Z., Zhou G. Route-based dynamics modeling and tracking with application to air traffic surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, no. 1, pp. 209–221. doi:10.1109/TITS.2018.2890570
13. Семенов В. Ю. Исследование и анализ средств и методов мониторинга вычислительных сетей. *Решетневские чтения*, 2014, т. 2, № 18, с. 328–330.
14. Cordeiro M., Sarmiento R., Brazdil P., Gama J. Evolving networks and social network analysis methods and techniques. *Social Media and Journalism – Trends, Connections, Implications*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 101–134. doi:10.5772/intechopen.79041
15. Camacho D., Panizo-Lledot Á., Bello Orgaz G., Gonzalez-Pardo A., Cambria E. The four dimensions of social network analysis: An overview of research methods, applications, and software tools. *Information Fusion*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 88–120. doi:10.1016/j.inffus.2020.05.009
16. Mangat V. Modeling information flow in social networks: Metrics and evaluation. *Journal of Cognitive Human-Computer Interaction*, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 8–14. doi:10.54216/JCHCI.020101
17. Biyun C., Hongbin L., Bin Z. Real-time identification of false data injection attacks: A novel dynamic-static parallel state estimation based mechanism. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 1–9. doi:10.1109/ACCESS.2019.2929785
18. Kwon S., Yoo H., Shon T. IEEE 1815.1 – Based power system security with bidirectional RNN-based network anomalous attack detection for cyber-physical system. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 77572–77586, doi:10.1109/ACCESS.2020.2989770
19. Han S.-Y., Sun Q.-W., Zhao Q., Han R.-Z., Chen Y.-H. Traffic forecasting based on integration of adaptive subgraph reformulation and spatio-temporal deep learning model. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1–13. doi:10.3390/electronics11060861
20. Bonniot L. *Computer network modeling and root cause analysis with statistical learning*. Université Rennes 1, France, RISA (UMR 6074), 2021. 173 p.
21. Guideng X. Analysis on the influence of artificial intelligence in computer network technology. *2nd Intern. Conf. on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering (ISRME 2019)*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 437–440. doi:10.25236/isrme.2019.085
22. Guo K., Hu Y., Qian Zh., Liu H., Zhang K., Sun Y., Gao J., Yin B. Optimized graph convolution recurrent neural network for traffic prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 1138–1149. doi:10.1109/TITS.2019.2963722
23. Duato J. A necessary and sufficient condition for deadlock-free adaptive routing in wormhole networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1995, vol. 6, no. 10, pp. 1055–1067. doi:10.1109/71.473515
24. Ma F., Zhu Y., Yuen K. F., Sun Q., He H., Xu X., Shang Z., Xu Y. Exploring the spatiotemporal evolu-

tion and sustainable driving factors of information flow network: A public search attention perspective. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 1–25. doi:10.3390/ijerph19010489

25. **Лесько С. А., Жуков Д. О., Истратов Л. А.** Модели описания динамики блокировки узлов вычислительных сетей вирусами на основе использования перколяционных кинетических и стохастических методов. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, 2020, № 52, с. 22–32. doi:10.17223/19988605/52/3
26. **Terekovskiy I., Terekovska L., Mussiraliyeva Sh., Tsiutsiura M., Achkoski Ju.** Markov model of unsteady profile of normal behavior of network objects of computer systems. *Proc. of the Intern. Workshop on Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 1–13.
27. **Gray C., Mosig C., Bush R., Pelsser C., Roughan M., Schmidt T. C., Wahlisch M.** BGP beacons, network tomography, and Bayesian computation to locate route flap damping. *Proc. of the ACM Internet Meas-*

urement Conf. (IMC '20), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 492–505. doi:10.1145/3419394.3423624

28. **Evstafiev V., Rudenko N.** Improving the dynamics of information flows for optimizing telecommunication systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1029, no. 1, pp. 1–11. doi:10.1088/1757-899X/1029/1/012131
29. **Karandashev A. A., Olenev V. L.** Selection methods for deadlock-free routes' optimal configuration in on-board SpaceWire networks. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, IEEE, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 1–10. doi:10.1109/WECONF51603.2021.9470619
30. **Бритов Г. С.** Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2013, № 2, с. 75–82.
31. **Бритов Г. С.** Бизнес-процесс тестового диагностирования линейных динамических систем на основе передаточных функций. *Системный анализ и логистика*, 2016, т. 12, № 1, с. 4–11.

UDC 004.021

doi:10.31799/1684-8853-2023-3-39-50

EDN: AUBKNL

Modeling the dynamics of information flows in the routes of computer networks

A. A. Karandashev^a, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-0358-0165

V. L. Olenev^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-1817-2754, Valentin.Olenev@guap.ru

G. S. Britov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0452-523X

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: For the development of modern highly specialized software systems for designing wormhole routing networks, it is necessary to compile routing tables. This requires obtaining efficient configurations of deadlock-free routes laid at the initial stages of network design. **Purpose:** To make the simulation of the dynamics of inertial processes of data accumulation in the receiving nodes of computer networks during the transmission of packets from transmitter nodes. **Results:** Three examples of network schemes are obtained, which allows us to consider classical network structures with different degrees of computational load. For each network, we construct matrices that describe its structure. As a result of the simulation, using specially developed scenarios in the mathematical software, we have demonstrated the resulting graphs of weight and transient characteristics and provide a number of characteristics of each route under study. The simulation carried out makes it possible to make sure that there is no information collapse of the routes laid in deadlock-free routes. A separate study of two simultaneously functioning data transmission paths in a network with “worm” switching also shows stable transient characteristics, which thus indicates the correctness of the proposed dynamic models and the deadlock-free wormhole routes themselves. **Practical relevance:** The results of the study can be applied for the design of computer networks with the use of specialized software. Dynamic performance analysis is intended to help in making decisions about the choice of deadlock-free routes offered by a designer of a wormhole switching network.

Keywords – data transmission dynamics, information flows, deadlock-free routes, wormhole routing techniques, weight characteristics, transient characteristics, data accumulation process, route models.

For citation: Karandashev A. A., Olenev V. L., Britov G. S. Modeling the dynamics of information flows in the routes of computer networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 39–50 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-39-50, EDN: AUBKNL

References

- Gouveia P., Neves J., Segarra C., Liechti L., Issa Sh., Schiavoni V., Matos M. Kollaps: decentralized and dynamic topology emulation. *Proc. of the Fifteenth European Conf. on Computer Systems (EuroSys'20)*, April 2020, New York, NY, USA, 2020, Article 23, pp. 1–16. doi:10.1145/3342195.3387540
- Mukul K. Evolution of routers. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2021, vol. 10, no. 10, pp. 510–518. doi:10.48175/IJAR-SCT-1284
- Camarero C., Carmen M., Enrique V., Ramón B. Projective networks: Topologies for large parallel computer systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, vol. 28, no. 7, pp. 1–14. doi:10.48550/arXiv.1512.07574

4. Ebert A., Wu P., Mengersen K., Ruggeri F. Computationally efficient simulation of queues: The R Package queuecomputer. *Journal of Statistical Software*, 2020, vol. 95, no. 5, pp. 1–29. doi:10.18637/jss.v095.i05
5. Wong R. T. Telecommunications network design: Technology impacts and future directions. *Networks*, 2021, vol. 76, no. 3 pp. 205–224. doi:10.1002/net.21997
6. Fanou R., Huffaker B., Mok R. K., Claffy K. Unintended consequences: effects of submarine cable deployment on internet routing. *Passive and Active Measurement. PAM, Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12048, no. 1, pp. 211–227. doi:10.1007/978-3-030-44081-7_13
7. Al-Ani D. R., Al-Ani A. R. The performance of IPv4 and IPv6 in terms of routing protocols using GNS 3 simulator. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 130, no. 1, pp. 1051–1056. doi:10.1016/j.procs.2018.04.147
8. Bolanowski M., Byczek T. Measure and compare the convergence time of network routing protocols. *ITM Web of Conferences 21(1)*, 2018, vol. 21, no. 13, pp. 1–9. doi:10.1051/itm-conf/20182100013
9. Sochor T., Sochorova H. Dynamic routing protocol convergence in simulated and real IPv4 and IPv6 networks. *Cybernetics and Automation Control Theory Methods in Intelligent Algorithms, Proc. of 8th Computer Science On-line Conf.*, 2019, vol. 986, no. 3, pp. 117–126. doi:10.1007/978-3-030-19813-8_13
10. Kala S. M., Sathya V., Seah W. K. G., Yamaguchi H., Higashino T. Evaluation of theoretical interference estimation metrics for dense Wi-Fi networks. *Intern. Conf. on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 6–8 Jan 2021, pp. 351–359. doi:10.1109/COMSNETS51098.2021.9352925
11. Osukhivska H., Tysh I., Lobur T., Shylinska I., Lupenko S. Method for estimating the convergence parameters of dynamic routing protocols in computer networks. *IEEE 16th Intern. Conf. on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 228–231. doi:10.1109/CSIT52700.2021.9648792
12. Xu L., Liang Y., Duan Z., Zhou G. Route-based dynamics modeling and tracking with application to air traffic surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, no. 1, pp. 209–221. doi:10.1109/TITS.2018.2890570
13. Semenov V. Yu. Research and analysis of tools and methods for monitoring computer networks. *Reshetnevskie chteniya*, 2014, vol. 2, no. 18, pp. 328–330 (In Russian)
14. Cordeiro M., Sarmento R., Brazdil P., Gama J. Evolving networks and social network analysis methods and techniques. *Social Media and Journalism – Trends, Connections, Implications*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 101–134. doi:10.5772/intechopen.79041
15. Camacho D., Panizo-Lledot Á., Bello Orgaz G., Gonzalez-Pardo A., Cambria E. The four dimensions of social network analysis: An overview of research methods, applications, and software tools. *Information Fusion*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 88–120. doi:10.1016/j.inffus.2020.05.009
16. Mangat V. Modeling information flow in social networks: Metrics and evaluation. *Journal of Cognitive Human-Computer Interaction*, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 8–14. doi:10.54216/JCHCI.020101
17. Biyun C., Hongbin L., Bin Z. Real-time identification of false data injection attacks: A novel dynamic-static parallel state estimation based mechanism. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 1–9. doi:10.1109/ACCESS.2019.2929785
18. Kwon S., Yoo H., Shon T. IEEE 1815.1 – Based power system security with bidirectional RNN-based network anomalous attack detection for cyber-physical system. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 77572–77586, doi:10.1109/ACCESS.2020.2989770
19. Han S.-Y., Sun Q.-W., Zhao Q., Han R.-Z., Chen Y.-H. Traffic forecasting based on integration of adaptive subgraph reformulation and spatio-temporal deep learning model. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1–13. doi:10.3390/electronics11060861
20. Bonniot L. *Computer network modeling and root cause analysis with statistical learning*. Université Rennes 1, France, RISA (UMR 6074), 2021. 173 p.
21. Guideng X. Analysis on the influence of artificial intelligence in computer network technology. *2nd Intern. Conf. on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering (ISRME 2019)*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 437–440. doi:10.25236/isrme.2019.085
22. Guo K., Hu Y., Qian Zh., Liu H., Zhang K., Sun Y., Gao J., Yin B. Optimized graph convolution recurrent neural network for traffic prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 1138–1149. doi:10.1109/TITS.2019.2963722
23. Duato J. A necessary and sufficient condition for deadlock-free adaptive routing in wormhole networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1995, vol. 6, no. 10, pp. 1055–1067. doi:10.1109/71.473515
24. Ma F., Zhu Y., Yuen K. F., Sun Q., He H., Xu X., Shang Z., Xu Y. Exploring the spatiotemporal evolution and sustainable driving factors of information flow network: A public search attention perspective. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 1–25. doi:10.3390/ijerph19010489
25. Lesko S. A., Zhukov D. O., Istratov L. A. Models of describing the dynamics of blocking nodes of computer networks by viruses based on the use of percolation, kinetic and stochastic methods. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2020, no. 52, pp. 22–32 (In Russian). doi:10.17223/19988605/52/3
26. Tereikovskiy I., Tereykovska L., Mussiraliyeva Sh., Tsiutsiura M., Achkoski Ju. Markov model of unsteady profile of normal behavior of network objects of computer systems. *Proc. of the Intern. Workshop on Conflict Management in Global Information Networks (CMiGIN 2019)*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 1–13.
27. Gray C., Mosig C., Bush R., Pelsser C., Roughan M., Schmidt T. C., Wahlisch M. BGP beacons, network tomography, and Bayesian computation to locate route flap damping. *Proc. of the ACM Internet Measurement Conf. (IMC '20)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 492–505. doi:10.1145/3419394.3423624
28. Evstafiev V., Rudenko N. Improving the dynamics of information flows for optimizing telecommunication systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1029, no. 1, pp. 1–11. doi:10.1088/1757-899X/1029/1/012131
29. Karandashev A. A., Olenov V. L. Selection methods for deadlock-free routes' optimal configuration in on-board SpaceWire networks. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, IEEE, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 1–10. doi:10.1109/WECONF51603.2021.9470619
30. Britov G. S. Verification, validation and testing of computer models of linear dynamic systems. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 2, pp. 75–82 (In Russian).
31. Britov G. S. Tests of business processes for diagnosing linear comprehensive systems based on transfer functions. *The System Analysis and Logistics*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 4–11 (In Russian).