

Управление перегрузками при передаче информации от одного отправителя нескольким получателям

А. В. Бахарев, Б. П. Зеленцов, В. П. Максимов, В. П. Шувалов

В статье рассмотрены два алгоритма управления перегрузками, используемые в протоколе Р2М при передаче от одного отправителя нескольким получателям. Приведены результаты экспериментальных исследований алгоритма для мгновенной оценки трендов и представлена методика обработки экспериментальных данных о характере переходов из одного состояния в другое.

Ключевые слова: протокол Р2М, алгоритмы LTEA и ITEA, пропускная способность, сетевые потери, фрагментация буфера, матрица переходных вероятностей, коэффициент неготовности, средняя частота аварий.

1. Введение

Объем данных, передаваемых по сети Интернет, растет из года в год. К 2020 году, в соответствии с отчетом EMC Corporation, он вырастет до 44 триллионов гигабайт, что составит по сравнению с 2013 годом 10-кратный прирост [1]. Таким образом, обеспечение возможности работы с большими объемами информации для многих отраслей становится актуальной задачей. Одной из важнейших характеристик информации является ее актуальность, которая может быть обеспечена путем ее высокоскоростной передачи. Следует заметить, что обеспечение передачи информации с высокой скоростью, приближающейся к пропускной способности канала, является далеко не тривиальной задачей даже в условиях необходимости доставки информации от одного источника одному получателю [2–5]. Еще сложнее становится задача при наличии нескольких получателей [6–9]. Решение этой задачи требует: создания эффективного метода управления перегрузками; разработки методов гарантированной доставки информации от одного отправителя нескольким получателям, позволяющих использовать максимально возможные в текущих условиях ресурсы канала и разделить их между несколькими получателями; обеспечения возможности передачи данных в среде с потерями пакетов и высокими значениями задержек; разработки алгоритмов управления потоками.

Описанный в [7] алгоритм передачи информации от одного отправителя нескольким получателям Р2М (Point to Multipoint), в отличие от известных [10–13], позволяет обеспечить скорость передачи данных, близкую к пропускной способности тракта за счет применения ряда новаций, включая использование эффективного метода управления перегрузками.

Целью статьи является формирование модели системы управления перегрузками и получение оценок числовых характеристик функционирования этой системы на основе собранных статистических данных.

2. Управление перегрузками в протоколе P2M

Функциональная схема управления перегрузками изображена на рис. 1. Для управления перегрузками используется информация, предоставляемая получателем. Данная информация собирается обработчиком отчетов.

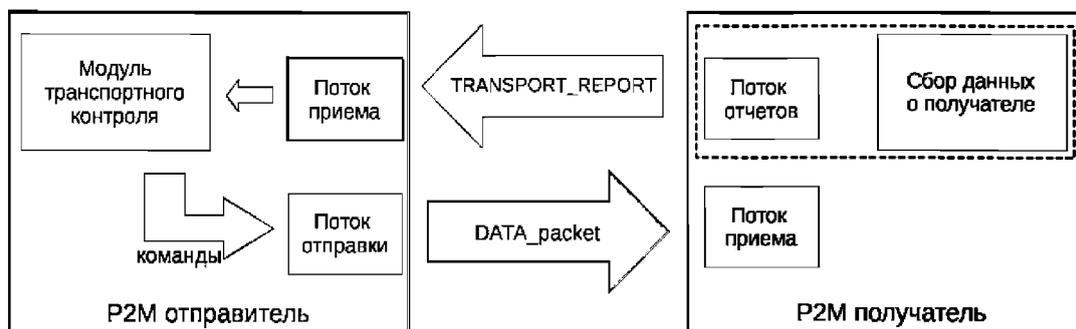


Рис. 1. Функциональная схема алгоритма управления перегрузками в P2M

Собираются следующие данные (отчеты):

- Потери в сессии для определённого получателя. Они вычисляются на интервале времени `RECEIVER_LOSS_CALCULATION_WINDOW`. Величина данного интервала является частью конфигурации ядра P2M.
- Доля свободного места в буфере приема получателя. Определяется через соответствующий интерфейс между буфером приёма и потоком обработчика отчётов.

Собираемые протоколом данные анализируются в реальном времени и помогают отправляющей стороне принять решение об установлении новой скорости передачи данных.

3. Алгоритмы ITEA/LTEA

В P2M управление перегрузками базируется на двух алгоритмах предсказания ситуации в сети:

- ITEA (Instant Trend Estimation Algorithm) – алгоритм мгновенной оценки трендов. Характеризуется низкой сложностью и быстрой реакцией на отчёты. Применение данного алгоритма делает трафик более импульсивным (особенно в сетях с потерями более 1 %).
- LTEA (Long-term Trend Estimation Algorithm) – алгоритм долговременной оценки трендов. Алгоритм характеризуется более высокой сложностью по сравнению с ITEA и требует больше входных данных (в случае P2M – собранных отчётов). Он проводит более многогранную и точную оценку поведения трафика, обладая более низкой скоростью реакции на отчёт по сравнению с ITEA.

Для каждого из алгоритмов определяются два варианта рекомендуемой скорости:

- Losses-Centric Data Rate (LCDT) – рекомендуемая скорость передачи данных для конкретного получателя, принимая во внимание лишь тенденцию изменения уровня потерь у получателя.
- Buffer-Centric Data Rate (BCDT) – рекомендуемая скорость передачи данных для конкретного получателя, принимая во внимание лишь тенденцию изменения количества свободного места в приёмном буфере получателя.

Рекомендуемая скорость R для определенного получателя вычисляется по формуле:

$$R = a \cdot R_{LCDT} + b \cdot R_{BCDT}, \quad (1)$$

где a и b – весовые коэффициенты, $a + b = 1$.

В то время как LTEA опирается лишь на два последних отчета, LTEA расширяет данный подход путем использования методики PCT/PDT (Pairwise Comparison Test, Pairwise Difference Test). При разработке P2M была проведена адаптация этих подходов к выявлению тенденций собираемых метрик. Оба приведённых статистических метода являются взаимодополняющими при решении проблемы выявления ложноположительных и ложноотрицательных тенденций. Вводятся два новых понятия: PCT – общая тенденция метрики и LPDT (Last PDT) – последний индикатор тенденции метрики. Сочетание двух данных величин позволяет выполнять точное прогнозирование и обоснованное выставление скорости передачи данных. Вычисление характеристик происходит с помощью выражений [2]:

$$V_{PCT} = \frac{\sum_{i=2}^M V_i (V_i > V_{i-1})}{M-1}, \quad (2)$$

$$V_{LPDT} = V_M - V_{M-1}, \quad (3)$$

где V – значения метрики (количество свободного места в буфере или сетевые потери); M – количество собранных отчетов.

Характеристика V_{PCT} лежит в диапазоне:

$$0 \leq V_{PCT} \leq 1, \quad (4)$$

V_{LPDT} может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Тенденция считается положительной (способствующей повышению скорости) при соблюдении следующих условий:

$$V_{PCT} \geq 0.6, \quad (5)$$

$$V_{LPDT} \geq 0. \quad (6)$$

Фактически выполнение условий (5) и (6) означает следующее: больше половины пар значений показывают положительную или нулевую тенденцию, а на последних отчётах не наблюдается скачков, приводящих к ложноположительной или ложноотрицательной оценке тенденции.

В P2M тенденция считается возрастающей лишь начиная с 0.6. Это гарантирует большую точность выявления тенденции. Более того, знаки сравнения также изменяются в зависимости от типа метрики (например, для потерь положительная тенденция является плохим знаком). В LTEA вводится интервал бездействия для метрики потерь. Под этим понимается, что при определенных сочетаниях PCT/LPDT скорость не изменяется, даже если тенденция явно положительная/отрицательная. Это позволяет сгладить влияние скачков потерь на характер изменения скорости.

4. Описание эксперимента

Передача данных осуществляется на сети с каналами связи, обеспечивающими максимальную скорость 1 Гбит/с на получателя. В модуле управления перегрузками P2M имеется надстройка, отвечающая за регистрацию каждого запроса на изменение скорости отправки данных. Собираются два показателя: количество свободного места в буфере получателя и сетевые потери. Анализ каждого из показателей позволяет предложить рекомендуемую скорость. Новая рекомендуемая скорость рассматривается как «запрос на изменение скорости».

В зависимости от величины и вектора изменения скорости фиксируются переходы по состояниям буфера и состояниям потерь для разных уровней потерь и значений задержек.

Собранные и анализируемые в статье данные включают в себя числа переходов из состояния в состояние для алгоритма ПТЕА. ПТЕА предоставляет значительно больше возможностей для статистического анализа поведения Р2М в различных условиях, хотя протокол ЛТЕА показал себя как наиболее стабильное решение для применения на практике. Было показано, что с ростом сетевых потерь имеет все меньше смысла опираться на значение потерь как на основной показатель управления перегрузками. Это вызвано тем, что высокие потери вызывают высокую фрагментацию буфера приема, которая оказывает ключевое влияние на производительность протокола. И хотя фрагментация буфера является следствием потерь в сети, именно она напрямую отражает состояние протокола в данный момент времени. Таким образом, анализ фрагментации буфера в сочетании с анализом сетевых потерь открывает более широкие возможности по управлению перегрузками и потоками и позволяет быстрее и точнее реагировать на возникновение потерь.

Такая система управления перегрузками описывается следующими пятью состояниями:

Состояние 1: стабилизация скорости, вызванная стабилизацией фрагментации буфера приема.

Состояние 2: понижение скорости передачи данных в связи с возможными проблемами в буфере приема.

Состояние 3: повышение скорости, вызванное освобождением места в буфере приемника.

Состояние 4: сброс скорости на 40 % в связи с отсутствием свободного места в буфере приема или в связи с высокой фрагментацией буфера приема.

Состояние 5: резкий сброс скорости (на 60 %) в связи с отсутствием свободного места в буфере приема или в связи с высокой фрагментацией буфера приема.

Состояние 5 будем считать аварийным.

В данной работе в качестве примера приведён только один граф для переходов по состояниям буфера для 0 % потерь и RTT (Round-trip delay time), равном 150 мс, при наличии трех получателей с предельной скоростью для каждого получателя 1 Гбит/с (рис. 2).

Процесс переходов от состояния к состоянию происходит в дискретном времени. Это означает, что переход между любыми двумя состояниями может произойти только в течение одного шага. При этом шагом будем называть интервал времени между двумя отчетами. После попадания в новое состояние процесс находится в этом состоянии случайное число шагов, при этом минимальное число шагов нахождения в новом состоянии равно 1. На графе показаны числа шагов, полученных за время наблюдения: число шагов нахождения в каждом состоянии и числа переходов между всеми состояниями.

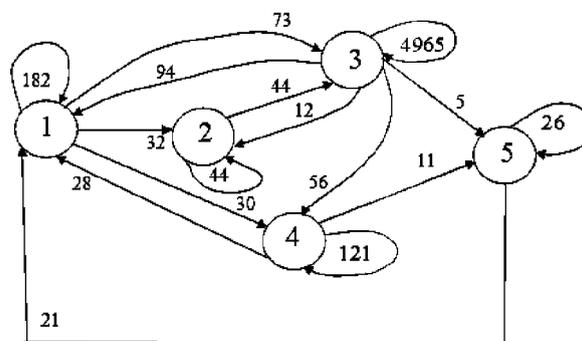


Рис. 2. Граф переходов между состояниями

Поясним числа, представленные на рис. 2, применительно к состоянию 3. Если программа, анализирующая отчеты, фиксировала переход в состояние 1, а было состояние 3, то счи-

тался переход из состояния 3 в состояние 1. Таких переходов было 94. Число 4965 говорит о том, что в течение 4965 шагов, выдаваемых через равные промежутки времени Δt , фиксировалось состояние 3. При этом число переходов из состояния 3 в состояние 3 было $4965 - (73 + 44) = 4848$ отчетов.

Таким образом, если отчетов было $182+444+4965+121+66 = 5338$, а время испытаний было 5 минут, то каждый отчет выдавался через 1.5 секунды.

5. Методика обработки результатов эксперимента

Используя полученные экспериментальные данные, сформируем методику обработки результатов эксперимента на основе математической модели процесса изменения состояний, целью которой является получение характеристик аварийного состояния, что позволит анализировать и управлять перегрузками при передаче информации. Математическая модель основана на теории однородной цепи Маркова в дискретном времени, в основе которой находится матрица переходных вероятностей между состояниями за один шаг. Эта матрица формируется по исходным экспериментальным данным, которые представлены в виде матрицы числа шагов.

5.1. Матрица числа шагов

Представим исходные данные в виде матрицы числа шагов $S = (s_{ij})$, где s_{ij} ($i \neq j$) – число переходов между состояниями w_i и w_j ($w_i \rightarrow w_j$) за время наблюдения, s_{ii} – число шагов нахождения в состоянии w_i за время наблюдения.

Замечание. Матрица S обозначена от английского *step* (шаг).

Число шагов s_{ij} складывается из двух составляющих:

- 1) числа переходов в состояние из других состояний;
- 2) числа шагов нахождения в этом состоянии после попадания в него.

Введем обозначения:

s_i^{in} – число переходов в состояние w_i из других состояний за время наблюдения, равное сумме элементов i -го столбца матрицы S без диагонального элемента;

s_i^{out} – число переходов из состояния w_i в другие состояния за время наблюдения, равное сумме элементов i -й строки матрицы S без диагонального элемента.

Формулы для этих параметров:

$$s_i^{\text{in}} = \sum_{k, k \neq i} s_{ki}; \quad s_i^{\text{out}} = \sum_{k, k \neq i} s_{ik}, \quad \forall i. \quad (7)$$

Из смысла приведённых определений следует, что для всех i

$$s_{ii} \geq s_i^{\text{in}}, \quad s_{ii} \geq s_i^{\text{out}}, \quad \sum_i s_i^{\text{in}} = \sum_i s_i^{\text{out}}. \quad (8)$$

Если приведенные соотношения не выполняются, то экспериментальные данные содержат противоречивые сведения.

По приведённым соотношениям можно сформулировать правило для контроля правильности составления матрицы S : диагональный элемент s_{ii} должен быть не меньше суммы недиагональных элементов i -го столбца и i -й строки; другими словами: сумма входящих шагов в любое состояние или сумма исходящих шагов из любого состояния не должна превышать числа шагов нахождения в этом состоянии.

Матрица числа шагов, сформированная по приведенному графу:

$$S = \begin{pmatrix} 182 & 32 & 73 & 30 & 0 \\ 0 & 44 & 44 & 0 & 0 \\ 94 & 12 & 4965 & 56 & 5 \\ 28 & 0 & 0 & 121 & 11 \\ 21 & 0 & 0 & 0 & 26 \end{pmatrix}.$$

Число шагов за время наблюдения, найденное путем суммирования диагональных элементов матрицы S , равно:

$$n_s = \sum_i s_{ii} = 5338. \quad (9)$$

Следует заметить, что экспериментальные исследования проводились при разных объемах выборки. Так, увеличение объема выборки (n_s) на порядок ($n_s \approx 53380$) привело к изменению соотношения между выборочными характеристиками на величину, не превышающую 5 %.

Числа вхождений в состояния из других состояний и числа переходов из состояний в другие состояния за время наблюдения приведены ниже:

$$\begin{aligned} s_1^{\text{in}} &= 143; \quad s_2^{\text{in}} = 44; \quad s_3^{\text{in}} = 117; \quad s_4^{\text{in}} = 86; \quad s_5^{\text{in}} = 16; \\ s_1^{\text{out}} &= 135; \quad s_2^{\text{out}} = 44; \quad s_3^{\text{out}} = 167; \quad s_4^{\text{out}} = 39; \quad s_5^{\text{out}} = 21. \end{aligned}$$

Таким образом, соотношения (8) выполняются.

Итак, по результатам испытания получена матрица числа шагов S . Формирование модели системы начинается с построения матрицы переходных вероятностей по матрице S , при этом диагональные и недиагональные элементы матрицы переходных вероятностей находятся по разным алгоритмам.

5.2. Нахождение диагональных переходных вероятностей

Известно, что математическое ожидание числа шагов нахождения в состоянии w_i однородной цепи Маркова при попадании в это состояние связано с вероятностью p_{ii} соотношением [14]:

$$n_{ii} = 1/(1 - p_{ii}), \quad (10)$$

где p_{ii} – диагональный элемент матрицы переходных вероятностей, или вероятность того, что в течение одного шага состояние w_i не изменится после попадания в него.

Статистическим аналогом вероятностного параметра n_{ii} является среднее число шагов нахождения в состоянии w_i , приходящееся на одно вхождение в это состояние из других состояний, полученное в результате эксперимента. Обозначим это число шагов через s_{ii}^* . Очевидно:

$$s_{ii}^* = s_{ij} / s_i^{\text{in}}. \quad (11)$$

Итак, s_{ij}^* является статистическим аналогом параметра n_{ij} . Ввиду этого при увеличении числа шагов за время эксперимента статистический параметр s_{ij}^* асимптотически приближается к параметру n_{ij} . Будем считать статистический параметр s_{ij}^* точечной оценкой параметра n_{ij} . В дальнейшем по приведённым исходным данным будут получены точечные оценки переходных вероятностей, которые будем называть переходными вероятностями, и сохраним за ними общепринятые обозначения p_{ij} . Приравняв статистический параметр s_{ij}^* и среднее число шагов n_{ij} , получим формулу для диагонального элемента матрицы переходных вероятностей (точнее формулу для точечной оценки условной вероятности того, что после попадания в состояние w_i процесс останется в этом же состоянии на следующем шаге):

$$p_{ii} = (s_{ii}^* - 1) / s_{ii}^* = (s_{ii} - s_i^{\text{in}}) / s_{ii}. \quad (12)$$

5.3. Нахождение недиагональных переходных вероятностей

Вероятность выхода из состояния w_i на одном шаге равна $1 - p_{ii}$. Из (12) следует, что $1 - p_{ii} = s_i^{\text{in}} / s_{ii}$. Примем естественное допущение: условная вероятность перехода $w_i \rightarrow w_j$ пропорциональна числу переходов s_{ij} , то есть она равна $s_{ij} / s_i^{\text{out}}$. Поэтому переходная вероятность p_{ij} является произведением вероятности выхода из w_i на условную вероятность перехода $w_i \rightarrow w_j$, то есть

$$p_{ij} = (s_i^{\text{in}} \cdot s_{ij}) / (s_i^{\text{out}} \cdot s_{ii}), \quad i \neq j. \quad (13)$$

Полученные вероятности p_{ii} и p_{ij} образуют стохастическую матрицу переходных вероятностей $P = (p_{ij})$. Матрица переходных вероятностей, сформированная по приведённой матрице числа шагов, имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} 0.214 & 0.186 & 0.425 & 0.175 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.013 & 0.002 & 0.976 & 0.008 & 0.001 \\ 0.510 & 0 & 0 & 0.289 & 0.200 \\ 0.615 & 0 & 0 & 0 & 0.385 \end{pmatrix}.$$

Примечание. Вычисления проведены в системе MathCAD, результаты вычислений представлены числами с тремя знаками после запятой.

После формирования матрицы P целесообразно выполнить проверочные процедуры [14], которые сводятся к проверке следующих соотношений:

$$\text{а) } \det(E - P) = 0; \quad \text{б) } P \cdot \dot{e} = \dot{e}, \quad (14)$$

где E – единичная матрица, \dot{e} – столбец, все элементы которого равны 1.

5.4. Предельные вероятности состояний

Процесс переходов между состояниями является эргодическим, то есть существуют отличные от нуля предельные вероятности всех состояний, не зависящие от начальных состояний. При использовании полученной матрицы P могут быть вычислены оценки предельных вероятностей состояний, которые в дальнейшем будем называть предельными вероятностями состояний, имея в виду, что они получены в результате обработки статистических данных. Итак, с учётом сказанного предельные вероятности могут быть вычислены по двум формулам [14]: первая формула основана на вычислении определителей, а вторая – на обращении матриц:

$$\text{а) } \pi_j = \frac{\Delta_j}{\sum_{k=1}^m \Delta_k} = \frac{\det(E - P_j)}{\sum_{k=1}^m \det(E - P_k)}; \quad \text{б) } \pi_j = \frac{1}{1 + \bar{p}_j \cdot (E - P_j)^{-1} \cdot \dot{e}}, \quad (15)$$

где P_j – матрица, полученная из исходной матрицы P вычеркиванием j -й строки и j -го столбца; E – единичная матрица; $\Delta_j = \det(E - P_j)$ – определитель матрицы $E - P_j$; \bar{p}_j – j -я строка матрицы P без элемента p_{jj} ; \dot{e} – столбец, все элементы которого равны 1.

Предельные вероятности состояний, вычисленные по приведённым формулам:

$$\pi_1 = 0.033; \pi_2 = 0.008; \pi_3 = 0.933; \pi_4 = 0.019; \pi_5 = 0.007.$$

Предельная вероятность состояния 5 является вероятностью аварийного состояния $\pi_5 = 0.007$. Вероятность аварийного состояния представляет собой среднюю долю времени нахождения в этом состоянии при длительном протекании процесса переходов между состояниями.

5.5. Другие характеристики, связанные с аварийным состоянием

Разобьём множество состояний системы на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4\}$, $V = \{5\}$, то есть аварийное состояние отнесено к подмножеству V . Матрицы переходных вероятностей на подмножествах U и V имеют вид:

$$P_{UU} = \begin{pmatrix} 0.214 & 0.186 & 0.425 & 0.175 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.013 & 0.002 & 0.976 & 0.007 \\ 0.510 & 0 & 0 & 0.289 \end{pmatrix}; \quad P_{VV} = (0.385).$$

По этим матрицам найдём среднее число шагов нахождения в состояниях подмножеств U и V [14, 15], которые фактически являются оценками этих параметров, полученных в результате обработки статистических данных:

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - P_{UU})^{-1} = \begin{pmatrix} 7.620 & 1.780 & 212.908 & 4.239 \\ 6.598 & 2.618 & 230.065 & 4.179 \\ 6.598 & 1.618 & 230.065 & 4.179 \\ 5.471 & 1.278 & 152.857 & 4.450 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$N_V = (E - P_{VV})^{-1} = (1.625), \quad (17)$$

где $n_U(i, j)$ – математическое ожидание числа шагов нахождения в j -м состоянии до выхода из подмножества U при условии, что i -е состояние является начальным при вхождении в подмножество U .

При переходе $V \rightarrow U$ состояние 1 всегда является начальным. Поэтому математическое ожидание числа шагов нахождения в состояниях подмножества U определяется строкой, соответствующей состоянию 1:

$$\bar{n}_U = (7.620 \quad 1.780 \quad 212.908 \quad 4.239).$$

Среднее число шагов нахождения в подмножествах U и V находится суммированием элементов этой строки и среднего числа шагов в состоянии 5:

$$n_U = \bar{n}_U \cdot \dot{e} = 226.547; \quad n_V = 1.625. \quad (18)$$

Под циклом понимается нахождение системы в подмножестве $U (V)$ и следующее за ним нахождение в подмножестве $V (U)$. Среднее число шагов между попаданиями в аварийное состояние является средним числом шагов одного цикла:

$$n_{UV} = n_U + n_V = 228.172. \quad (19)$$

Средняя частота аварий – это средняя частота цикла, или среднее число переходов между подмножествами, приходящееся на один шаг:

$$\omega_{UV} = 1/n_{UV} = 4.383 \cdot 10^{-3}. \quad (20)$$

Для проверки правильности проведенных вычислений можно выполнить проверочные процедуры, которые сводятся к вычислению ранее полученных характеристик другими методами:

а) вычисление предельных вероятностей подмножеств:

$$\pi_U = n_U / n_{UV} = 0.993; \quad \pi_V = n_V / n_{UV} = 0.007;$$

б) вычисление средней частоты цикла, которая определяется суммой произведений предельных вероятностей граничных состояний и соответствующих переходных вероятностей [14]:

$$\omega_{UV} = \pi_5 \cdot p_{51} = \pi_3 \cdot p_{35} + \pi_4 \cdot p_{45} = 4.383 \cdot 10^{-3}.$$

Полученные характеристики легко переводятся в единицы времени, поскольку продолжительность одного шага составляет 1.5 секунды. Итак,

$$t_U = 1.5 \cdot n_U = 339.8 \text{ сек} = 5.7 \text{ мин} = 0.094 \text{ час};$$

$$t_V = 1.5 \cdot n_V = 2.4 \text{ сек} = 0.041 \text{ мин} = 0.0007 \text{ час};$$

$$t_{UV} = t_U + t_V = 342.3 \text{ сек} = 5.7 \text{ мин} = 0.095 \text{ час};$$

$$\omega_{UV} = 1/t_{UV} = 10.5 \text{ 1/час},$$

где t_U , t_V , t_{UV} – продолжительности подмножеств состояний и цикла системы в единицах времени; ω_{UV} – средняя частота аварий в единицах времени.

Значения характеристик аварийного состояния, полученные по экспериментальным данным, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения характеристик аварийного состояния

1. Вероятность аварийного состояния	0.007
2. Среднее время между попаданиями в аварийное состояние	0.095 час
3. Средняя продолжительность аварийного состояния	2.4 сек
4. Средняя частота аварий	10.5 1/час

6. Заключение

Приведены алгоритмы управления перегрузками и рассмотрен подход, позволяющий по данным эксперимента построить математическую модель переходов между состояниями и вычислить оценки характеристик аварийного состояния процесса управления перегрузками. Применение счётчиков числа шагов переходов между состояниями и чисел шагов нахождения в состояниях позволяет получить объективные исходные данные для составления модели, которую можно использовать для систем, описываемых другими графами и другими исходными данными эксперимента. Таким образом, приведённый подход позволил создать универсальную методику обработки исходных данных, целью которой является получение прогнозируемых характеристик аварийного состояния.

Литература

1. Executive Summary: Data Growth, Business Opportunities, and the IT Imperatives // The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-sum-mary.html>.
2. *Kachan D., Siemens E., Shuvalov V.* Available bandwidth measurement for 10 Gbps networks // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015. P. 1–10.
3. *Kachan D., Siemens E., Shuvalov V.* Comparison of contemporary solutions for high speed data transport on WAN connections // Proceedings of ICNS 2013. Lisbon, Portugal, 2013. P. 34–43.
4. *Kachan D., Siemens E.* Comparison of contemporary solutions for high speed data transport on WAN connections // Journal of Communication and Computer. 2013. V. 10, № 6. P. 783–795.
5. *Kachan D., Siemens E.* Comparison of contemporary Protocols for Highspeed Data Transport via 10 Gbps WAN Connections // 2nd International Conference on Applied Innovations in IT. Koethen, Germany, 2014. P. 21–27.
6. *Bakharev A., Siemens E., Shuvalov V.* Analysis of Performance Issues in Point-to-Multipoint Data Transport for Big Data // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instruments Engineering proceedings. Novosibirsk, October 2–4, 2014. V. 4. P. 264–274.
7. *Bakharev A. V., Zelentsov B. P., Maximov V. P., Shuvalov V. P.* Achieving of reliable multigigabit data deliveru in presence of multiple receivers with P2M // 13th International Conference on Actual Problems of Electronic Instruments Engineering proceedings. Novosibirsk, 2016. V. 1, Part 2. P. 17–22.
8. *Bakharev A., Siemens E.* Actual Approaches for Multicast-based Reliable Data Transport and Their Deficiencies // 3rd Conference on Information Measurement Technics and Metrology, TPU. Tomsk, May 3–5, 2012. P. 38–43.

9. *Bakharev A., Siemens E.* Evaluation of Reliable Multicast Implementations with Proposed Adaptation for Delivery of Big Data in Wide Area Networks // Proceedings of ICNS-2013. Lisbon, Portugal, March 24–29, 2013. P. 160–164.
10. *Lin J. C., Paul S.* RMTP: a reliable multicast transport protocol // IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). 1996. V. 3. P. 1414–1424.
11. *Adamson R. B., Macker J. P.* Quantitative prediction of NACK-oriented reliable multicast (norm) feedback // IEEE MILCOM. 2002. V. 2. P. 964–969.
12. *McLeod R. D.* A UDP-based file transfer protocol with flow control using fuzzy logic approach // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology (CCECE). 2003. V. 2. P. 827–830.
13. *Gemmell J., Montgomery T., Speakman T., Crowcroft J.* The PGM reliable multicast protocol // IEEE Netw. 2003. V. 17, № 1. P. 16–22.
14. *Зеленцов Б. П.* Матричные модели функционирования оборудования систем связи // Вестник СибГУТИ. 2015. № 4. С. 62–73.
15. *Кемени Д., Снелл Д.* Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 272 с.

*Статья поступила в редакцию 20.01.2017;
переработанный вариант – 29.06.2017.*

Бахарев Александр Владимирович

к.т.н., научный сотрудник, Hochschule Anhalt University of Applied Sciences,
e-mail: albacharev@gmail.com.

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ (630102, Новосибирск,
ул. Кирова, 86), e-mail: zelentsov@mail.ru.

Максимов Владимир Павлович

к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики СибГУТИ, e-mail: maximov@gmail.com.

Шувалов Вячеслав Петрович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой передачи дискретных сообщений и метрологии
СибГУТИ, тел. (383) 269-82-43, e-mail: shvp04@mail.ru.

Congestion control algorithms applied in P2M transport protocol

A. Baharev, B. Zelentsov, V. Maksimov, V. Shuvalov

This paper considers two congestion control algorithms applied in P2M transport protocol. P2M is a reliable data transport protocol targeting a field of point to multipoint data delivery. It features an ability to maintain up to 10 simultaneous data streams (1gbps), or more, but with lower data rate. Combination of ITEA and LTEA congestion control techniques enables P2M to be RTT and loss-tolerant. This is an essential feature while in real world there will never be multiple data streams with the same medium parameters. This paper reveals some of the statistical analysis results and describes different protocol states in terms of proposed congestion control solutions.

Keywords: protocol P2M, ITEA and LTEA congestion control, network losses, buffer fragmentation, transfer probability matrix, non-readiness coefficient, average outage frequency.