

УДК 621.391

*В статті проведені класифікація та аналіз моделей продуктивності з'єднань TCP. Досліджено можливість використання класичних аналітичних моделей в об'єднаних мережах при передачі даних мультимедіа*

*Ключові слова: TCP, продуктивність, втрата сегменту, повторна передача*

*В статье проведены классификация и анализ моделей производительности соединений TCP. Исследована возможность использования классических аналитических моделей в объединенных сетях при передаче данных мультимедиа*

*Ключевые слова: TCP, производительность, потеря сегмента, повторная передача*

*In the article classification and analysis of TCP connection throughput are carried out. The possibility of the use of classical analytical models in internetworks with multimedia transmission is investigated*

*Key words: TCP, throughput, segment loss, retransmission*

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ TCP И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ОБЪЕДИНЕННЫХ СЕТЯХ

**А. С. Еременко**

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
Кафедра телекоммуникационных систем  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166  
Контактный тел.: (057) 702-13-20  
E-mail: alexere@ukr.net

## 1. Введение

Моделирование производительности соединений TCP (Transmission Control Protocol) является объектом научных исследований последние два десятилетия. Однако существующие на сегодняшний день аналитические модели производительности протокола управления передачей либо слишком упрощены и не всегда в состоянии отобразить сетевые процессы транспортного уровня IP-сети, либо сложны для практического использования. В данной статье предлагается сравнительный анализ существующих аналитических моделей и выбор адекватной модели для решения реальных практических задач.

## 2. Классификация аналитических моделей TCP

Аналитические модели для оценивания производительности соединений TCP могут быть классифицированы согласно нескольким критериям, например, известны или неизвестны время кругового обращения (Round-Trip Time) и вероятность потери сегмента.

В общем, модели производительности соединений TCP могут быть отнесены к следующим основным классам:

1. Модели, в которых известны и вероятность потери сегмента.

В таких моделях подразумевается, что время кругового обращения, которое является временем, прошедшим с момента отправки сегмента источником до момента получения источником соответствующего подтверждения получения этого сегмента адресатом, и характеристики потерь известны. К этому классу

можно отнести модель Падхи [1] и основанные на ней, например, [3], [4].

2. Модели, в которых неизвестны и вероятность потери сегмента

В таких моделях предполагается, что известны только базовые параметры (сетевая топология, количество конечных узлов, скорости передачи данных, задержки распространения, размеры буферов и т.д.), на основании которых вычисляются метрики производительности, соответствующие качеству обслуживания.

3. Конечность или бесконечность потоков

TCP соединения, предназначенные для групповой пересылки данных и поддерживающие передачу данных по протоколу передачи файлов FTP (File Transfer Protocol), длительные по времени соединения TCP называются постоянными или бесконечными. TCP соединения, предназначенные для передачи небольшого количества данных, называются конечными, нестойкими или кратковременными.

Рассмотрим модели, позволяющие проводить эффективный анализ производительности соединений TCP в объединенных сетях, функционирующих в условиях разнородного трафика.

## 3. Использование модели Падхи для вычисления производительности соединений TCP, обеспечивающих передачу данных в мобильных сетях

Одной из составляющих сетей последующего поколения являются мобильные сети. Причем объем трафика данных, передаваемого мобильными устройствами (смартфонами, портативными компьютерами и др.), стремительно возрастает. По прогнозам [5] трафик мобильных данных к 2014 году по сравнению с 2009

Таблица 1

Достоинства и недостатки различных аналитических моделей производительности соединения ТСР

| Тип модели                      | Преимущества   | Недостатки   |
|---------------------------------|--|--|
| На основе теории восстановления | Производительность представлена аналитическим выражением, простым для реализации.  | Модели предполагают известность и вероятность потерь сегмента, оценивают производительность единичного соединения ТСР, большинство таких моделей получены в предположении, что ТСР соединение является долговременным.   |
| С фиксированной точкой          | Объединение моделей отдельных соединений и сети в целом в составную модель с базовыми параметрами, такими как топология сети и характеристики трафика, что позволяет получать метрики производительности сети и источника трафика. | Численный метод нахождения фиксированной точки зачастую требует значительных усилий при реализации.  |
| На основе теории управления     | Подход успешно апробирован при реализации новых протоколов управления потоками и AQM (Active Queue Management).  | Функция полезности, полученная для TCP-Reno и TCP-Vegas, учитывает динамику высокого уровня только для тех протоколов, которые включают механизм предотвращения перегрузки без медленного старта и тайм-аута повторной передачи; также такой анализ не применим для моделирования передачи файлов произвольного размера, а экспериментальные исследования показали неверность результатов при анализе длительных соединений при использовании TCP-Reno и механизма управления очередями Drop-Tail. |
| Разделение процессора           | Применимы для создания инженерных рекомендаций для управления пропускной способностью узких мест сети при известных параметрах интенсивности входящего потока и средних требований к обслуживанию входящего процесса.              | Потеря сегмента и необходимость повторной передачи потерянного сегмента не включены в модели TCP-сети с разделением процессора; невозможность моделирования и рассмотрения различных реализаций протокола TCP и исследования производительности режимов предотвращения перегрузки, медленного старта, повторной передачи потерянного сегмента по таймауту и механизма экспоненциального отката.  |
| Потоковые модели                | Включают статистические свойства процесса потерь сегментов, при этом производительность является функцией корреляции потерь сегментов.   | Не смотря на то, что корреляция моментов времени между потерями сегментов может быть смоделирована, такая модель включает в себя только фазу предотвращения перегрузки и половинное уменьшение окна передачи в случае потерь сегментов; детализация и совершенствование модели путем учета максимального размера окна передачи и таймаута повторной передачи потерянного сегмента значительно усложняют модель.  |

возрастет в 40 раз, при этом передача видео составит порядка 66% от всего объема передаваемых данных.

Здесь следует отметить, что последние исследования относительно передачи видео в объединенных сетях (в частности в Интернете) [6], [7] показали мощную конкурентоспособность протокола TCP и его преимущества по сравнению с UDP (User Datagram Protocol) при потоковой передаче мультимедийных данных.

Рассмотрим комплексную модель расчета производительности соединения ТСР, предложенную в [4]. Здесь в качестве модели ТСР используется модель Падхи, однако простота модели компенсируется вычислением ее входных параметров с учетом особенностей функционирования протоколов канального уровня на стыке мобильной сети и сети передачи данных. На рис. 1 показана структурная схема такой модели, которая включает в себя следующие этапы: создание и расчет модели сети для получения входных параметров для вычисления производительности, далее – расчет модели Падхи.

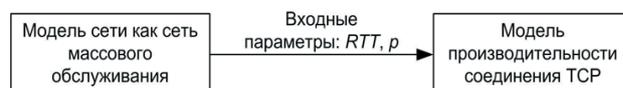


Рис. 1. Структурная схема комплексной модели расчета производительности соединения ТСР

Модель Падхи (или PFTK) является одной из самых известных моделей производительности соединений ТСР, входными параметрами которой являются время кругового обращения (RTT) и вероятность потери сегмента (p). Эта модель представляет собой явное выражение производительности ТСР (T) в виде функции от указанных выше переменных:

$$T(p, RTT) = \begin{cases} \frac{\frac{1-p}{p} + E[W] + \hat{Q}(E[W]) \frac{1}{1-p}}{RTT \left( \frac{b}{2} E[W_u] + 1 \right) + \hat{Q}(E[W]) RTO \frac{f(p)}{1-p}}, & \text{если } E[W_u] < W_{max}; \\ \frac{\frac{1-p}{p} + W_{max} + \hat{Q}(E[W]) \frac{1}{1-p}}{RTT \left( \frac{b}{8} W_{max} + \frac{1-p}{p W_{max}} + 2 \right) + \hat{Q}(W_{max}) RTO \frac{f(p)}{1-p}}, & \text{в ином случае;} \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$  – вероятность потери сегмента;

$b$  – количество сегментов, получение которых гарантируется одним подтверждением (в простейшем случае  $b=1$ );

RTO – тайм-аут повторной передачи;

RTT – время кругового обращения сегмента или флайта сегментов;

$W_{max}$  – максимальный размер окна перегрузки;

$E[W_u]$  – среднее значение текущего размера окна при отсутствии потерь сегментов.

При этом  $E[W_u]$  можно определить согласно формуле:

$$E[W_u] = \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{8(1-p)}{3bp} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2}. \tag{2}$$

Вероятность  $\hat{Q}(w)$  того, что в рамках окна передачи размером  $w$  произойдет потеря по тайм-ауту, может быть вычислена по формуле:

$$\hat{Q}(w) = \min \left[ 1, \frac{(1-(1-p)^3)(1+(1-p)^3(1-(1-p)^{w-3}))}{1-(1-p)^w} \right]. \tag{3}$$

Наконец,  $f(p)$  – сокращенная запись следующего выражения:

$$f(p) = 1 + p + 2p^2 + 4p^3 + 8p^4 + 16p^5 + 32p^6. \tag{4}$$

Таким образом, имеем два неизвестных параметра для вычисления производительности соединения TCP, согласно указанной модели, время кругового обращения и вероятность потери. Т.к. большую часть RTT составляет время ожидания в буферах сетевых устройств, а потери сегментов данных происходят вследствие переполнения буферов и ошибок радио интерфейсов, на канальном уровне объединенная сеть может быть представлена сетью массового обслуживания. Для упрощения модели микроповедение управления TCP-потокм не включено. А вместо этого, предполагается, что TCP-трафик является потоком сегментов с постоянной интенсивностью, что не противоречит свойствам потоковой передачи.

Далее, в предположении о постоянной скорости TCP-трафика, посредством модели системы как сети массового обслуживания (СМО) на канальном уровне рассчитываются значения RTT и  $p$  для транспортного уровня. Когда RTT и  $p$  становятся известны, может быть рассчитана интенсивность (производительность) соединения TCP согласно модели Падхи. При этом модель сети как СМО должна включать места возможных перегрузок и особенности протоколов других уровней (сетевого, канального), оказывающих значительное влияние на задержку и отбрасывание протокольных единиц обмена соответствующего уровня, и тем самым провоцирующих повторные передачи сегментов на транспортном уровне.

Такой подход является эффективным для исследования взаимодействия и функционирования протоколов смежных уровней мобильных сетей в рамках объединенной сети, что подтверждено исследованиями и результатами имитационного моделирования в [4].

#### 4. Аналитическая модель TCP NewReno

В [8] была предложена усовершенствованная стохастическая модель производительности соединения TCP NewReno (широко применяемого на сегодняшний день) в установленном режиме при передаче больших массивов данных как функции времени кругового обращения и скорости потерь.

Данная модель отличается от более ранних тем, что:

- включает аналитическое описание механизма быстрого восстановления TCP NewReno;
- достоверное описание механизма тайм-аута;
- модель является более гибкой и репрезентативной, описывает различные сценарии потерь в TCP.

Модель состоит из двух частей, в первой из которых подразумевается, что события потери идентифицируются при получении трех повторных подтверждений ACK и нет событий потерь по тайм-ауту. Игнорируя начальную фазу медленного старта, эволюция размера окна перегрузки может быть представлена последовательностью статистически идентичных циклов. Причем каждый цикл состоит из периода предотвращения перегрузки (размер окна увеличивается на один сегмент за раунд от  $W/2$  до  $W$ ), за которым следует обнаружение потери сегмента и период быстрого восстановления. Каждый из таких циклов называется периодом предотвращения перегрузки и быстрого восстановления CAFR (Congestion Avoidance/Fast Recovery). Таким образом, производительность соединения TCP может быть вычислена на основе анализа каждого такого цикла CAFR. Причем средняя производительность соединения в общем случае вычисляется согласно выражению:

$$T_{NoTO} = \frac{S_{CAFR}}{D_{CAFR}}, \tag{5}$$

где  $T_{NoTO}$  – производительность соединения TCP без учета потерь по тайм-ауту;

$S_{CAFR}$  – ожидаемое количество сегментов, успешно переданных в течение периода CAFR;

$D_{CAFR}$  – ожидаемая длительность периода CAFR.

Дальнейший анализ первой части модели приводит к конечному выражению для  $T_{NoTO}$  [NewReno] следующего вида:

$$T_{NoTO} = \frac{\frac{1}{p} + \frac{W^2q}{1+Wq}}{\left(\frac{W}{2} + Wq + \frac{5}{2}\right)RTT}, \tag{6}$$

где  $p$  – вероятность события потери (скорость);  
 $q$  – вероятность потери сегмента в рамках события потери (пачечность потерь);

$W$  – среднее значение максимального размера окна перегрузки;

RTT – среднее время кругового обращения.

При этом  $W$  определяется согласно выражению:

$$W = \frac{10pq - 5p + \sqrt{p(24 + 32q + 49p)}}{p(3 + 4q)}. \tag{7}$$

Вторая часть модели включает в себя события потерь по тайм-ауту (полная модель). В данном случае также рассматривается эволюция окна перегрузки

как последовательность статистически идентичных циклов. При этом каждый цикл состоит из нескольких периодов CAFR, за которыми следует период CATOSS, представляющий собой последовательность периодов предотвращения перегрузки (Congestion Avoidance, CA), тайм-аута (Time Out, TO) и медленного старта (Slow Start, SS).

Анализ полной модели (с учетом модели потерь с двумя параметрами, приведенной на рис. 2) приводит к получению следующего выражения для производительности соединения TCP с учетом потерь по тайм-ауту:

$$T = \frac{\frac{1}{p} + \frac{W^2q}{1+Wq}}{N \cdot RTT + p_{TO} \left( (1+2p+4p^2)RTO + \left(1 + \log \frac{W}{4}\right)RTT \right)}, \quad (8)$$

где  $p_{TO}$  – вероятность того, что событие потери соответствует тайм-ауту;

$RTO$  – средняя длительность первого тайм-аута повторной передачи в серии тайм-аутов;

$W$  – среднее значение максимального размера окна перегрузки, которое определяется согласно выражению (7).

Значение  $N$  определяется как

$$N = \left( \frac{W}{2} + \frac{3}{2} + (1-p_{TO})(1+Wq) \right). \quad (9)$$

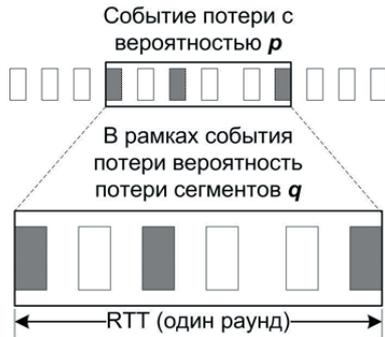


Рис. 2. Модель потерь сегментов с двумя параметрами: вероятность  $p$  характеризует появление события потери, а  $q$  – пачечность потерь в рамках события потери

Проанализируем производительность соединения TCP с учетом и без учета потерь по тайм-ауту. Пусть в рамках соединения TCP производится потоковая передача данных (видео). Средние характеристики тестового соединения получены при помощи анализатора сетевого трафика Wireshark [19] и утилиты tcptrace [20]. Таким образом, средние значения временных параметров таковы, что  $RTT_{CP} = 0,092$  А, а  $RTO_1 = 0,097$  А, а вероятность потерь изменяется в пределах от  $1,2 \cdot 10^{-4}$  до  $8 \cdot 10^{-4}$ , причем потери ассоциируются с событиями получения трех повторных подтверждений. Как правило, оценка двух параметров потерь может быть достаточно сложной, однако в [NewRepo] показано, что эффективной будет даже аппроксимация  $p=q$ . Вероятность потерь по тайм-ауту принимается равной  $p_{TO} = 0,00001$ . Тогда проанализируем функции производительности TCP (6) и (8) при вероятности потерь, изменяющейся в пределах

от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$ , и усредненных временных параметрах  $RTT$  и  $RTO$  (рис. 3).

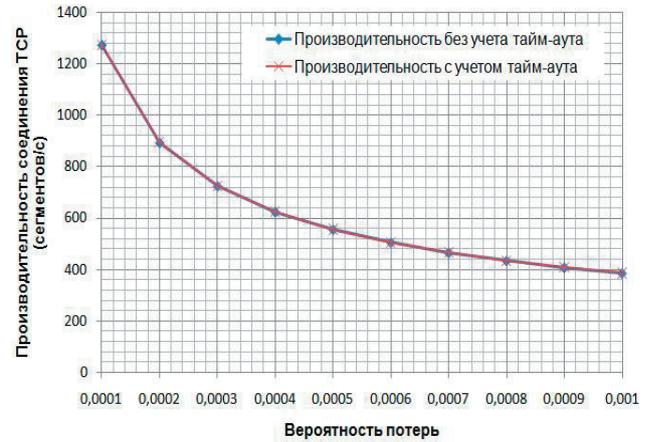


Рис. 3. Изменения производительности TCP при различных значениях вероятности потерь

Очевидно, что при вероятности потерь по тайм-ауту, стремящейся к нулю, что подтверждается экспериментальными исследованиями, значения производительности практически совпадают. Из этого следует, что на практике можно пренебречь учетом событий потерь по тайм-ауту и для расчета производительности соединений TCP использовать только первую часть модели, а именно выражение (6). Также все принятые допущения не противоречат свойствам потоковой передачи данных.

## 5. Применение машинного самообучения

Альтернативой использованию аналитических моделей для получения средних значений производительности соединений TCP является применение машинного самообучения. Во многих исследованиях было показано, что базовые аналитические модели производительности TCP (в том числе и модель Падхи), в общем, не являются достаточно точными. В [9] показано, что в большинстве случаев прогнозируемые этими моделями значения производительности превышают границы TCP-толерантности.

В качестве методов машинного обучения в [9], [10], [11] предлагается использовать следующие методы управляемого обучения:

1. Деревья решений (бинарные деревья решений). Для осуществления прогнозирования с учетом наблюдаемых входных параметров проходит путь от исходной вершины к конечной. Этот метод является самым быстрым по скорости обучения. В применении к производительности TCP может применяться для определения типа потерь.

2. Многослойные перцептроны (разновидность искусственных нейронных сетей). Нейронные сети представляют собой объединение взаимосвязанных частиц, перцептронов, которые вычисляют среднее взвешенное значение их входных параметров и имеют нелинейную передаточную функцию. Этот метод дает более точные модели по сравнению с деревьями решений, но их сложно интерпретировать. Также этот ме-

год более зависим от таких параметров, как скорость вычисления и вычислительные ресурсы.

Преимущества использования методов самообучения:

1. Значительно более точные.
2. Имеют те же входные параметры, что и базовые аналитические модели.
3. Не нуждаются в значительных вычислительных ресурсах.

Общая структурная схема применения управляемого машинного обучения для вычисления производительности соединения TCP представлена на рис. 4.

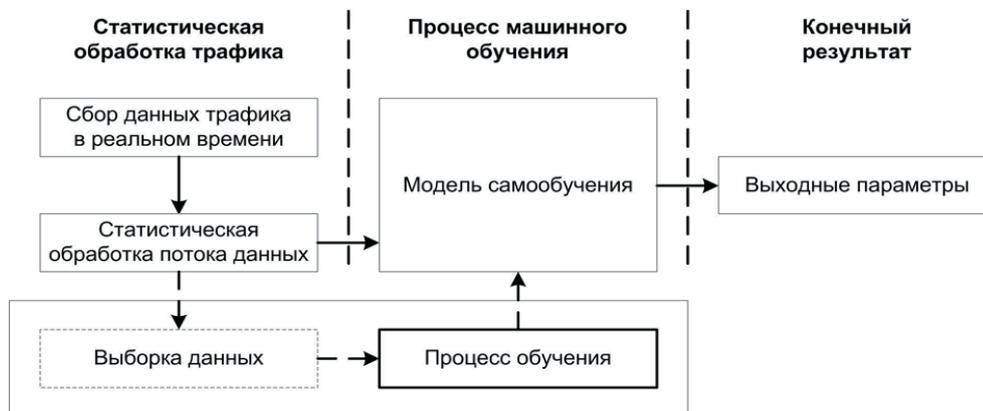


Рис. 4. Структурная схема управляемого машинного обучения

## 6. Выводы

В статье был проведен анализ различных моделей производительности соединений TCP и приведена их общая классификация. Было показано, что классические аналитические модели производительности соединений TCP, предложенные в ранних исследованиях, не утратили актуальности и могут быть применены в современных разработках комплексных решений в условиях передачи разнородного трафика в рамках объединенной сети.

Модель Падхи является одной из важнейших в области математического моделирования функционирования протокола TCP, а использование существующих аналитических моделей в комплексных решениях задач вычисления производительности, основанных на модели Падхи, обладают рядом преимуществ: модель проверена временем, подвергалась многочисленным модификациям и была применена к различным практическим задачам.

Было рассмотрено использование модели Падхи в комплексных решениях, когда недостатки и ограничения модели компенсируются за счет вычисления входных параметров на основе модели

сети, учитывающей функционирование протоколов смежных с транспортным уровнем и технологические особенности сетей, формирующих объединенную сеть. Также было показано, что рассматриваемая модель применима для потоковой передачи мультимедийных данных. Анализ усовершенствованной модели производительности соединения TCP NewReno, включающей все фазы его

функционирования, показал, что на сегодняшний день возможно практическое использование упрощенного варианта модели без потери качества оценивания производительности.

В качестве альтернативного решения задачи вычисления производительности соединения TCP предложено машинное самообучение. Данное направление в настоящее время широко исследуется, однако не имеет широкого распространения на практике и требует дальнейших исследований и практической реализации.

## Литература

1. Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D., Kurose J. Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation [Text] / Proc. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 1998. – Vol.28, №4. – pp. 303–314.
2. Mathis, M., Semke, J., Mahdavi, J. The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm [Text] / Proc. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 1997. – Vol.27, №3. – pp. 67–82.
3. Cardwell, N., Savage, S., Anderson, T. Modeling TCP latency [Text] / Proceedings of the 2000 IEEE Computer and Communications Societies Conference on Computer Communications (INFOCOM-00). – 2000. – pp. 1742–1751.
4. Bodrog, L., Horvath, G., Vulkan, C. Analytical TCP throughput model for high-speed downlink packet access [Text] / Software, IET. – 2009. – Vol.3, Issue 6. – pp. 480–494.
5. Stockhammer, T. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP – Standards and Design Principles [Text] / MMSys '11 Proceedings of the second annual ACM conference on Multimedia systems. – 2011. – pp. 133–144.
6. Wang, B., Kurose, J., Shenoy, P., Towsley, D. Multimedia Streaming via TCP: An Analytic Performance Study [Text] / ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications. – 2008. – Vol. 4, № 2. – pp. 16:1–22.
7. Yan, J., Muhlbauer, W., Plattner, B. An Analytical Model for Streaming over TCP [Text] / Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking, Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – Volume 6869/2011 – pp. 370–381.
8. Parvez, N., Mahanti, A., Williamson, C. An analytic throughput model for TCP NewReno [Text] / IEEE/ACM Transactions, Networking. – 2010. – pp. 448–461.

9. El Khayat, I., Geurts, P., Leduc, G. Machine-learned versus analytical models of TCP throughput [Text] / Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. – 2007. – Vol.51, Issue 10. – pp. 2631–2644.
10. Nguyen, T.T.T., Armitage, G. A Survey of Techniques for Internet Traffic Classification using Machine Learning [Text] / Communications Surveys & Tutorials, IEEE. – 2008. – Vol.10, Issue 4. – pp. 56–76.
11. Mirza, M., Sommers, J., Barford, P., Zhu, X. A machine learning approach to TCP throughput prediction [Text] / SIGMETRICS '07 Proceedings of the 2007 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems. – 2007. – pp. 97–108.
12. ITU-T Y.2007 ITU-T Recommendation Y.2007 (2010), Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models, 2010, 37 p.
13. Meyn, S. Control Techniques for Complex Networks [Text] / S. Meyn. – Cambridge University Press. Pre-publication Press for on-line viewing, 2007. – 615 p.
14. Chiang, M. Layering as Optimization Decomposition: A Mathematical theory of Network Architectures [Text] / M. Chiang, S.H. Low, A.R. Calderbank, J.C. Doyle // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol.95, No.1. – pp. 255–312.
15. RFC 4614 Duke, M., Braden, R., Eddy, W., Blanton, E. A Roadmap for Transmission Control Protocol (TCP) Specification Documents, 2006. – 33 p.
16. RFC 3782 Floyd, S., Henderson, T., Gurtov, A. The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm, 2004. – 19 p.
17. Afanasyev, A., Tilley, N., Reiher, P., Kleinrock, L. Host-to-Host congestion control for TCP [Text] / IEEE Communication Surveys and Tutorials. – 2010. – Vol.12, Issue 3. – pp. 304–342.
18. Еременко, А.С., Персиков, А.В. Управление передачей трафика транспортной сетью NGN с учетом повторных передач [Текст] / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №.5/2 (29) – С. 4–12.
19. Аналізатор мережних протоколів Wireshark [Електронний ресурс]. – Режим доступу: \www/ URL: <http://www.wireshark.org/> – 20.08.2011 г. – Загл. с экрана.
20. Аналізатор файлів TCP [Електронний ресурс]. – Режим доступу: \www/ URL: <http://www.tcptrace.org/> – 20.08.2011 г. – Загл. с экрана.

*У роботі розглянуті питання дослідження та контролю міцності з'єднань з натягом, зібраних термічним способом, по акустичних та частотно-теплових параметрах*

*Ключові слова: з'єднання з натягом, термічний спосіб складання*

*В работе рассмотрены вопросы исследования и контроля прочности соединений с натягом, собранных термическим способом, по акустическим и частотно-тепловым параметрам*

*Ключевые слова: соединения с натягом, термический способ сборки*

*Work examines questions of study and control of strength of the connections with the interference, assembled by thermal method, on the acoustic and frequency- thermal parameters*

*Keywords: connection with the interference, the thermal method of assembling*

УДК 621.88.084.1

## КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ З'ЄДНАНЬ З НАТЯГОМ, ЗІБРАНИХ ТЕРМІЧНИМ СПОСОБОМ

**А.С. Зенкін**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедру  
Кафедра метрології, стандартизації та сертифікації\*

**І.Л. Оборський**

Кандидат технічних наук, доцент, заступник завідувача  
кафедру

Кафедра машин легкої промисловості\*

\*Київський національний університет технологій та  
дизайну

вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, Україна, 01011

Контактний тел.: 050-380-94-90; (044) 234-98-57

E-mail: [ivan.oborskiy@mail.ru](mailto:ivan.oborskiy@mail.ru)

### 1. Вступ

На сьогоднішній день однією з задач складального виробництва у машинобудуванні являється вдосконалення технології складання з'єднань з натягом, які

отримали широке застосування в різноманітних машинах та механізмах завдяки своїй простоті, технологічності виготовлення та економічності [1].

Однією з причин повільного впровадження термічних методів складання являється відсутність над-