

УДК 681.324

С.П. Сущенко, П.В. Приступа, П.А. Михеев, В.В. Поддубный

Оценка эффективности прямой коррекции ошибок протокольных блоков данных транспортного протокола

Предложена модель транспортного соединения, управляемого транспортным протоколом с технологией прямой коррекции ошибок в режиме селективного отказа в виде цепи Маркова с дискретным временем, учитывающая влияние протокольных параметров, уровня ошибок в каналах связи, длительности круговой задержки и технологических параметров прямой коррекции ошибок на пропускную способность транспортного соединения. Проведен анализ зависимости преимуществ транспортного протокола с прямой коррекцией ошибок перед классическим транспортным протоколом.

Ключевые слова: транспортный протокол, прямая коррекция ошибок, тракт передачи данных, цепь Маркова, пропускная способность транспортного соединения, размер окна, длительность тайм-аута, круговая задержка, уровень потерь.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-35-39

Важнейшим показателем качества взаимодействия абонентов компьютерных сетей является пропускная способность транспортных соединений. Данный показатель в значительной мере определяется транспортным протоколом и его параметрами – шириной окна и длительностью тайм-аута [1]. Моделирование абонентского соединения и анализ его потенциальных возможностей выполнялись в [2–9] и других работах. Моделирование классического транспортного протокола с решающей обратной связью выполнено в [2–7]. Но результаты получены при существенных ограничениях на параметры протокола и факторы, определяющие быстродействие транспортного соединения. В современных транспортных протоколах для снижения объема повторно передаваемого трафика получают широкое распространение технологии прямой коррекции ошибок [10–17]. Примером реализации такой технологии является протокол QUIC кампании Google [10].

В [11, 12] выполнено имитационное исследование ряда сценариев работы транспортного протокола с возможностями простейших механизмов прямой коррекции ошибок для проводных и беспроводных сред передачи данных. Целесообразность применения технологии прямой коррекции ошибок в приложениях реального времени при передаче мультимедийного трафика иллюстрируется на натурных экспериментах в [13–16], дается оценка трудоемкости восстановления искаженных данных, издержек и возможных технологических ограничений в различной коммуникационной среде.

Математическая модель транспортного протокола с технологией прямой коррекции ошибок в межсегментном пространстве рассмотрена в [17]. Для редуцированного признакового пространства параметров, характеристик и факторов, определяющих эффективность прямой коррекции ошибок, найдены области предпочтительного применения данной технологии.

Однако исследование эффективности методов прямой коррекции ошибок [10–17] проводилось преимущественно на качественном уровне, числен-

но и в стендовых экспериментах при значительных ограничениях на характеристики каналов связи, параметры протоколов обмена и коррекции ошибок. Целью настоящей работы является поиск условий, при которых следует в рамках надежного транспортного протокола подключать процедуры прямой коррекции ошибок с различными параметрами.

Модель транспортного соединения

Рассмотрим процесс переноса данных между абонентами транспортного протокола, основанного на алгоритме с решающей обратной связью и функционирующего в режиме селективного или группового отказа. Примером семейства таких надежных протоколов является доминирующий в современных компьютерных сетях протокол TCP [1].

В режиме селективного отказа повторной передаче от источника подлежат только неприятые получателем протокольные блоки данных (сегменты). Полагаем, что взаимодействующие абоненты имеют неограниченный поток данных для передачи, а обмен выполняется протокольными блоками данных транспортного протокола (сегментами) одинаковой длины.

Подтверждения получателя о корректности приема данных переносятся в сегментах встречного потока. Считаем, что управляющий транспортный протокол имеет дополнительную логику внутрисегментной прямой коррекции ошибок. При этом источник перед отправкой каждого сегмента делит его на $A \geq 1$ фрагментов равного размера, к ним добавляет $B - A$, $B \geq A$ избыточных фрагментов той же длины и передает в транспортное соединение расширенный сегмент, состоящий из B фрагментов. Каждый фрагмент снабжается служебной информацией, позволяющей обнаружить в нем возможные ошибки и восстановить из B фрагментов исходный сегмент в точке приема.

Искажение до $B - A$ произвольных фрагментов расширенного сегмента позволяет на стороне получателя восстановить исходный сегмент и не инициировать повторные передачи. Пусть f_f и f_r – достоверность передачи фрагмента вдоль транспорт-

ного соединения от источника до адресата и обратно соответственно. Тогда вероятность доставки исходного сегмента адресату с учетом возможности его восстановления получателем с помощью механизма прямой коррекции ошибок задается соотношением

$$\psi_f = \sum_{i=A}^B C_i^B f_f^i (1-f_f)^{B-i},$$

а достоверность получения отправителем подтверждения о корректности доставки составит $\psi_r = \sum_{i=A}^B C_i^B f_r^i (1-f_r)^{B-i}$. Данные

параметрические зависимости от A и B определяют математическую модель различных методов прямой коррекции ошибок. Считаем, что участки переприема вдоль тракта передачи данных имеют одинаковое быстроедействие в обоих направлениях, а длительность цикла передачи расширенного сегмента в отдельном звене составляет t .

В общем случае длина пути от источника до адресата, переносящего информационный поток, и длина обратного пути, по которому передаются подтверждения на принятые сегменты, могут быть различными. Полагаем, что длина тракта передачи данных, выраженная в количестве участков переприема, в прямом направлении равна $D_f \geq 1$. Обратный тракт, по которому доставляются подтверждения отправителю о корректности приема последовательности сегментов, имеет длину $D_r \geq 1$. Считаем, что потерь сегментов из-за блокировок буферной памяти в узлах тракта не происходит.

Управление потоком данных реализуется механизмом скользящего окна [1] размера $W \geq 1$. Процесс информационного переноса расширенных сегментов в транспортном соединении может быть описан Марковским процессом с дискретным временем, кратным длительности такта t , в силу того, что время между получениями подтверждений имеет геометрическое распределение с параметром ψ_r [2]. Цепь Маркова задает активность отправителя и изменение размера очереди расширенных сегментов в источнике, ожидающих подтверждения. Область возможных состояний цепи Маркова определяется длительностью тайм-аута ожидания подтверждения S , выраженной в количестве циклов продолжительности t . Размер тайм-аута связан с длиной тракта и шириной окна неравенствами $S > W$, $S \geq D_f + D_r$. Сумма длин прямого и обратного трактов может быть интерпретирована как круговая задержка $D = D_f + D_r$, выраженная в длительностях t . Состояниям цепи Маркова $i = \overline{0, W}$ соответствует размер очереди переданных, но не подтвержденных сегментов в источнике потока, а состояниям $i = \overline{W+1, S-1}$ – время, в течение которого отправитель не активен и ожидает получение подтверждения о корректности приема переданной последовательности из W сегментов. Из нулевого состояния в $(D-1)$ -е источник продвигается с каж-

дым тактом t с вероятностью детерминированного события. В состояниях $i \geq D-1$ после истечения очередного дискретного цикла t к отправителю начинают прибывать подтверждения и, в зависимости от результатов доставки, отправитель передает новые сегменты (при положительном подтверждении), либо повторно – искаженные.

Завершение цикла пребывания в состоянии $D-1$ соответствует времени доведения первого сегмента до адресата и получения на него подтверждения. Дальнейший рост номера состояния происходит с вероятностью искажения подтверждения $1-\psi_r$ в обратном тракте. В состояниях $i \geq D-1$ в режиме селективного отказа получение подтверждения порождает переход в $(D-1)$ -е состояние при $W \geq D$ или в состояние $D+W-2-i$ при $W \leq D$. В силу того, что в состояниях $i \geq W$ источник приостанавливает отправку сегментов, получение подтверждений в состояниях $i = \overline{W, D+W-3}$ приводит к переходу в состояния $D+W-2-i$, а из состояний $i = \overline{D+W-2, S-2}$ – в нулевое. В состоянии $S-1$ истекает тайм-аут ожидания подтверждения от получателя о корректности принятых сегментов и происходит безусловный переход в нулевое состояние.

Показатель быстроедействия транспортного соединения

Для цепи Маркова с представленной структурой переходных вероятностей распределение вероятностей состояний P_i , $i = \overline{0, S-1}$ определяется соотношениями между протокольными параметрами W , S и длительностью круговой задержки D и имеет функциональный вид, полученный в [2]. Важнейшей операционной характеристикой протокола является его пропускная способность, определяемая параметрами тракта передачи данных, накладными расходами и особенностями протокольных процедур управления передачей [1, 2]. Нормированное быстроедействие транспортного соединения определяется средним числом доставленных получателю неискаженных сегментов за среднее время между двумя последовательными поступлениями подтверждений [2]. Поскольку время между приходами подтверждений распределено по геометрическому закону с параметром ψ_r , то для селективной процедуры отказа пропускная способность определится зависимостью [2]

$$Z(W, S, D, A, B) = \psi_r \left\{ \sum_{i=D-1}^{D+W-2} (i-D+2) \psi_f P_i + W \psi_f \sum_{i=D+W-1}^{S-1} P_i \right\}.$$

Области целесообразности применения прямой коррекции ошибок

Рассмотрим эффективность применения технологии прямой коррекции ошибок протокольных блоков данных на уровне надежного транспортного протокола в пространстве каждого сегмента. Согласно технологической процедуре прямой коррек-

ции ошибок отправитель разбивает каждый передаваемый информационный сегмент на A фрагментов одинаковой длины, добавляет к ним $B - A \geq 0$ избыточных фрагментов того же размера, позволяющих восстановить сегмент на принимающей стороне при искажении не более чем $B - A$ произвольных фрагментов расширенного сегмента.

Получатель при приеме расширенного сегмента с искаженными фрагментами пытается восстановить его и по результатам восстановления высылает отправителю подтверждение, упакованное в аналогичный информационный расширенный сегмент встречного потока.

Эффективное применение технологии прямой коррекции ошибок предполагает поиск коэффициента фрагментации сегмента A и числа дополнительных избыточных фрагментов $B - A$ для коррекции ошибок, обеспечивающих максимальное быстродействие транспортного соединения с заданными характеристиками и протокольными параметрами. Наличие избыточных фрагментов в передаваемой последовательности увеличивает вероятность доставки получателю сегмента, однако это достигается за счет роста накладных расходов в виде времени переноса дополнительных данных. В связи с этим возникает задача поиска в многомерном признаковом пространстве области значений характеристик транспортного соединения (D, ψ_f, ψ_r) , параметров транспортного протокола (W, S) и механизма прямой коррекции ошибок (A, B) , обеспечивающих превосходство управляющей процедуры с прямой коррекцией ошибок перед классической протокольной процедурой с решающей обратной связью без использования коррекции ошибок. Сравнение управляющих процедур выполним в условиях равных интенсивностей абонентских информационных потоков, предлагаемых к передаче. Определим выигрыш в быстродействии от применения механизма прямой коррекции ошибок по сравнению с классической протокольной процедурой с решающей обратной связью в виде

$$\Delta(A, B) = Z(W, S, D, A, B) - Z(W, S, D, 1, 1).$$

Проанализируем значения выигрыша без учета накладных расходов, связанных с необходимостью введения дополнительных заголовков в каждый фрагмент исходного сегмента для диагностики в них ошибок и корректной сборки сегмента из набора фрагментов. В общем случае сравнительный анализ удастся провести только численно. В ряде случаев за счет снижения размерности признакового пространства область положительных значений выигрыша удастся найти в простом аналитическом виде. В режиме селективного отказа, полагая $W \rightarrow \infty$ либо абсолютно надежный обратный тракт передачи данных ($f_r = 1$), выигрыш приобретает простой аналитический вид, инвариантный к размеру окна

$$\Delta(A, B) = \frac{A\psi_f}{B} - f_f^A \text{ при } W \geq D \text{ и зависящий от}$$

$$\text{ширины окна } \Delta(A, B) = \frac{1}{D - W + 1} \left(\frac{A\psi_f}{B} - f_f^A \right) \text{ при}$$

$W < D$. Отсюда для параметров прямой коррекции ошибок, удовлетворяющих условию $B = A + 1$, $A \geq 1$, нетрудно видеть, что область положительных значений выигрыша существует для $A \geq 2$ на интервале $f_f \in \left(0, 1 - \frac{1}{A^2} \right)$. Максимальное значение вы

$$\text{игрыша } \Delta(A, A + 1) = \frac{(A - 1)^{A + 1}}{A^A (A + 1)} \text{ при } W \geq D \text{ и}$$

$$\Delta(A, A + 1) = \frac{(A - 1)^{A + 1}}{A^A (A + 1)(D - W + 1)} \text{ при } W < D \text{ дости}$$

гается для $f_f = 1 - \frac{1}{A}$. С ростом параметра прямой коррекции ошибок A положение максимума выигрыша дрейфует вправо по координате f_f , а максимальный выигрыш растет от значений $\Delta(2, 3) = 1/12$ и $\Delta(2, 3) = 1/12(D - W + 1)$ при $W \geq D$ и $W < D$ соответственно до $\Delta(\infty, \infty) = 1/e$ и $\Delta(\infty, \infty) = 1/e(D - W + 1)$.

Для технологических параметров механизма прямой коррекции ошибок $B = A + 2$, $A \geq 1$ положительный выигрыш достигается на области значений достоверности доставки фрагментов $f_f \in \left(0, \frac{(A - 1)(A + 2)}{A(A + 1)} \right)$, $A \geq 2$, а максимум – в точке $f_f = 1 - \sqrt{\frac{2}{A(A + 1)}}$. Оптимальные значения выигрыша с увеличением A растут от 0,103 до 0,587. Численные исследования выигрыша для произвольных значений параметров многомерного признакового пространства показывают, что $\Delta(A, B)$ имеет унимодальный характер зависимости от достоверности доставки фрагментов данных в области $f_f \in (0, 1)$.

Следует отметить, что при прочих равных условиях с увеличением коэффициента разбиения сегмента на фрагменты (параметра A) размер фрагментов снижается и как следствие растет достоверность его доставки получателю f_f . В связи с этим для корректного сравнительного анализа выигрыша при различных значениях параметра A необходимо перейти к показателю достоверности доставки получателю отдельного бита, байта или слова.

Закключение

В работе предложена модель транспортного протокола с технологией прямой коррекции ошибок, реализованной в пространстве каждого сегмента, и подтверждением данных, принятых получателем после процедуры прямой коррекции. Показано, что в режиме селективного повтора применение механизма прямой коррекции ошибок целесообразно и особенно выгодно на полностью загруженных транс-

портных соединениях ($W \geq D$) с большой круговой задержкой (D). В целом преимущество прямой коррекции ошибок в значительной мере определяется достоверностью передачи фрагментов (f_f и f_r), параметрами фрагментации исходного сегмента (A) и дополнительных избыточных данных ($B-A$), а также соотношением между шириной окна и длительностью круговой задержки. Направлением дальнейшего анализа следует выделить проблему исследования операционных характеристик транспортных соединений в условиях конкуренции абонентов за доступную полосу пропускания разделяемых участков переприема сетевого маршрута. Важной задачей является обобщение полученных в данной работе результатов на случай конкурентного использования пропускной способности соединительного пути трафика различных абонентских соединений с разделяемыми каналами тракта передачи данных.

Литература

1. Fall K. TCP/IP Illustrated, Vol. 1: The Protocols (2nd Ed.) / K. Fall, R. Stevens. – Addison-Wesley Professional Computing Series, 2012. – 1017 p.
2. Kokshenev V.V. Comparative Analysis of the Performance of Selective and Group Repeat Transmission Models in a Transport Protocol / V.V. Kokshenev, P.A. Mikheev, S.P. Sushchenko // Automation and Remote Control. – 2017. – Vol. 78, No 2. – P. 247–261.
3. Kokshenev V. Analysis of the Throughput in Selective Mode of Transport Protocol / V. Kokshenev, P. Mikheev, S. Suschenko, R. Tkachyov // CCIS. – 2016. – Vol. 678. – P. 168–181.
4. Kassa D.F. Analytic Models of TCP Performance: PhD Thesis. – Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2005. – 199 p.
5. Giordano S. Modeling TCP Startup Performance / S. Giordano, M. Pagano, F. Russo, R. Secchi // Journal of Mathematical Sciences. – 2014. – Vol. 200, Iss. 4. – P. 424–431.
6. Kravets O.Ya. Mathematical Modeling of Parameterized TCP Protocol // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, No. 7. – P. 1218–1224.
7. Arvidsson A. A model of a TCP link / A. Arvidsson, A. Krzesinski // Proceedings of the 15th International Teletraffic Congress Specialist Seminar, 2002.
8. Olsen Y. Stochastic modeling and simulation of the TCP protocol // Uppsala Dissertations in mathematics. – 2003. – Vol. 28. – 94 p.
9. Nikitinskiy M.A. Performance analysis of trickles and TCP transport protocols under high-load network conditions / M.A. Nikitinskiy, D.Ju. Chalyy // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – Vol. 47, No. 7. – P. 359–365.
10. The QUIC Transport Protocol: Design and Internet-Scale Deployment / Langley Adam, Riddoch Alistair, Wilk Alyssa, Vicente Antonio, Krasic Charles, Zhang Dan, Yang Fan, Kouranov Fedor, Swett Ian, Iyengar Janardhan, Bailey Jeff, Dorfman Jeremy, Roskind Jim, Kulik Joanna, Westin Patrik, Tenneti Raman, Shade Robbie, Hamilton Ryan, Vasiliiev Victor, Chang Wan-The, Shi Zhongyi // SIGCOMM '17. – August, 2017. – Los Angeles, CA, USA. – P. 183–196.
11. Lundqvist H. TCP with end-to-end FEC / H. Lundqvist, G. Karlsson // Communications. – 2004 International Zurich Seminar on. – 2004. – P. 152–156.
12. Barakat Ch. Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC / Ch. Barakat, E. Altman // Computer Networks. – 2002. – No. 39. – P. 133–150.
13. Shalin R. Multimedia Data Transmission through TCP/IP using Hash Based FEC with AUTO-XOR Scheme / R. Shalin, D. Kesavaraja // ICTACT Journal on Communication Technology. – 2012. – Vol. 03, Iss. 03. – P. 604–609.
14. Ribadeneir A.F. An Analysis of the MOS under condition of delay, jitter and packet loss and an analysis of the impact of introducing piggybacking and Reed Solomon FEC for VOIP: Master's thesis. – Georgia State University, 2007.
15. Performance analysis of a high-performance real-time application with several al-fec schemes / K. Matsuzono, J. Detchart, M. Cunche, V. Roca, H. Asaeda // Proceedings of the IEEE 35th Conference on Local Computer Networks (LCN'10). – 2010. – P. 1–7.
16. Herrero R. Modeling and comparative analysis of Forward Error Correction in the context of multipath redundancy // Telecommunication Systems. Modelling, Analysis, Design and Management. – 2017. – Vol. 65(4). – P.783–794.
17. Mikheev P. Estimation of High-Speed Performance of the Transport Protocol with the Mechanism of Forward Error Correction / P. Mikheev, S. Suschenko, R. Tkachev // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 700. – P. 259–268.

Сущенко Сергей Петрович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. прикладной информатики (ПИ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) Ленина пр-т, д. 36, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 52-94-96
Эл. почта: ssp.inf.tsu@gmail.com

Приступа Павел Викторович

Ассистент каф. ПИ НИТГУ Ленина пр-т, д. 36, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 52-94-96
Эл. почта: pristupa@gmail.com

Михеев Павел Андреевич

Канд. техн. наук, вед. программист каф. ПИ НИ ТГУ Ленина пр-т, д. 36, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 52-94-96
Эл. почта: doka.patrick@gmail.com

Поддубный Василий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор, профессор каф. ПИ НИ ТГУ Ленина пр-т, д. 36, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 52-94-96
Эл. почта: vvpoddubny@gmail.com

Sushchenko S.P., Pristupa P.V., Mikheev P.A., Poddubny V.V. Evaluation of the efficiency of forward error correction of transport protocol data blocks

A model of a transport connection controlled by a transport protocol with the technology of forward error correction in the selective failure mode in the form of a discrete-time Markov chain is proposed. The model takes into account the influence of the protocol parameters, the level of errors in the communication channels, the round-trip delay and the technological parameters of forward error correction on the throughput of

the transport connection. The analysis of the dependence of the advantages of the transport protocol with forward error correction over the classical transport protocol is carried out.

Keywords: transport protocol, forward error correction, data transmission path, Markov chain, transport connection throughput, window size, timeout duration, round-trip delay, loss level.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-35-39

References

1. Fall K., Stevens R. *TCP/IP Illustrated, Vol. 1: The Protocols* (2nd Edition). Addison-Wesley Professional Computing Series, 2012, 1017 p.

2. Kokshenev V.V., Mikheev P.A., Sushchenko S.P. Comparative Analysis of the Performance of Selective and Group Repeat Transmission Models in a Transport Protocol. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 2, pp. 247–261.

3. Kokshenev V., Mikheev P., Suschenko S., Tkachyov R. Analysis of the Throughput in Selective Mode of Transport Protocol. CCIS, 2016, vol. 678, pp.168–181.

4. Kassa D.F. *Analytic Models of TCP Performance*. PhD Thesis, University of Stellenbosch, 2005, 199 p.

5. Giordano S., Pagano M., Russo F., Secchi R. Modeling TCP Startup Performance. *Journal of Mathematical Sciences*, 2014, vol. 200, Iss. 4, pp 424–431.

6. Kravets O.Ya. Mathematical Modeling of Parameterized TCP Protocol. *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 7, pp. 1218–1224.

7. Arvidsson A., Krzesinski A. A model of a TCP link. *In Proceedings of the 15th International Teletraffic Congress Specialist Seminar*, 2002.

8. Olsen Y. Stochastic modeling and simulation of the TCP protocol. *Uppsala Dissertations in mathematics*, 2003, 28, 94 p.

9. Nikitinskiy M.A., Chalyy D.Ju. Performance analysis of trickles and TCP transport protocols under high-load network conditions. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2013, vol. 47, no. 7, pp. 359–365.

10. Adam Langley, Alistair Riddoch, Alyssa Wilk, Antonio Vicente, Charles Krasnic, Dan Zhang, Fan Yang, Fedor Kouranov, Ian Swett, Janardhan Iyengar, Jeff Bailey, Jeremy Dorfman, Jim Roskind, Joanna Kulik, Patrik Westin, Raman Tenneti, Robbie Shade, Ryan Hamilton, Victor Vasiliev, Wan–The Chang, Zhongyi Shi. The QUIC Transport Protocol: Design and Internet-Scale Deployment. *SIGCOMM '17*, August, 2017, Los Angeles, CA, USA, pp. 183–196.

11. Lundqvist H., Karlsson G. TCP with end-to-end FEC. *Communications*, 2004 International Zurich Seminar on, 2004, pp. 152–156.

12. Barakat Ch., Altman E. Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC. *Computer Networks*, 2002, no. 39, pp. 133–150.

13. Shalin R., Kesavaraja D. Multimedia Data Transmission through TCP/IP using Hash Based FEC with AUTO-XOR Scheme. *ICTACT Journal on Communication Technology*, 2012, vol. 03, iss. 03, pp. 604–609.

14. Ribadeneir A.F. *An Analysis of the MOS under condition of delay, jitter and packet loss and an analysis of the impact of introducing piggybacking and Reed Solomon FEC for VOIP*. Master's thesis, Georgia State University, 2007.

15. Matsuzono K., Detchart J., Cunche M., Roca V., Asaeda H. Performance analysis of a high-performance real-time application with several al-fec schemes. *Proceedings of the IEEE 35th Conference on Local Computer Networks*, LCN'10, 2010, pp. 1–7.

16. Herrero R. Modeling and comparative analysis of Forward Error Correction in the context of multipath redundancy. *Telecommunication Systems. Modelling, Analysis, Design and Management*. 2017, vol. 65(4), pp.783–794.

17. Mikheev P., Suschenko S., Tkachev R. Estimation of High-Speed Performance of the Transport Protocol with the Mechanism of Forward Error Correction. *Communications in Computer and Information Science*, 2017, vol. 700, pp. 259–268.

Sergey P. Sushchenko

Doctor of Engineering Sciences, professor, head of Applied Informatics department (AI), National Research Tomsk State University (NI TGU) 36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 52-94-96
Email: ssp.inf.tsu@gmail.com

Pavel V. Pristupa

Department assistant, PI, NI TGU 36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 52-94-96
Email: pristupa@gmail.com

Pavel A. Mikheev

Cand. of Engineering Sciences, led. of Programmer PI department, NI TGU 36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 52-94-96
Email: doka.patrick@gmail.com

Vasily V. Poddubny

Doctor of Engineering Sciences, professor AI department, NI TGU 36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 52-94-96
Email: vvpoddubny@gmail.com