

УДК 004.7

The method of distributing package delivery time

S.I. Bohucharskyi, O.V. Zolotukhina, O.O. Zolotukhin, M.S. Muravshchuk

**Bohucharskyi
Serhii Ivanovich**

Candidate of Engineering Science, senior researcher
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine,
61022 ; e-mail: sbogucharskiy@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0003-4971-4314>

**Zolotukhina
Olga Viktorivna**

head of the laboratory, senior lecturer
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine,
61022 ; e-mail: ovzolotukhina@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-9354-7018>

**Zolotukhin Oleksandr
Oleksandrovich**

senior lecturer
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine,
61022; e-mail: oozolotukhin@karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0003-4440-240X>

**Muravshchuk
Maksym Sergeevich**

Student of Department of Systems and Technology Modeling
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, Ukraine,
61022 ; e-mail: muravshchuk2020ks51@student.karazin.ua
<https://orcid.org/0000-0002-4130-5252>

When analyzing the problems of organizing the effective functioning of distributed data transmission networks with packet switching, it becomes clear that it is necessary to improve the existing models of individual network structures, develop new models for studying effects, factors and mechanisms that have not been considered previously, and on their basis create non-laborious methods for selecting network parameters according to various criteria of optimality. An analytical review of the results achieved in the study of various structural formations made it possible to understand the current approach to organizing the effective network operation, to formulate unsolved problems, and to outline the main directions of research. It could be clearly seen that the peculiarity of end-to-end data transportation over a multi-link virtual connection is not taken into account, and the question of the adequacy of the assigned distributions to the real information transfer process is not considered, and therefore, remains open. A new approach to distributing the information packet transmission time for a virtual channel with distortions is proposed. On its basis the analysis of the influence of end-to-end non-receipt time-out duration on the operational characteristics of the data transport process has been carried out. A model of a data transmission path with distortions in individual sections of the transfer in the form of a stochastic conveyor is proposed, and auxiliary relations necessary for the analysis of stochastic information transfer have been obtained. The potential of inter-node connections, the requirements for the buffer memory of the switching nodes, and the end-to-end delay of subscriber messages are mostly determined by the parameters of the line protocols. The existing methods for the formal selection of these parameters are focused mainly on the unconditional preference of the criterion for the throughput of inter-node connections and require time-consuming numerical calculations. Since the problem of redefining network parameters due to changes in operating conditions often occurs, non-laborious engineering methods for their selection according to various criteria of optimality require developing.

Keywords: pipeline effect, number of pass-through transmissions, distribution delivery time, delay of a multi-packet message, high-quality communication channels.

Метод розподілення часу доставки пакету

**Богучарський
Сергій Іванович**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна
майдан Свободи, 4, місто Харків, 61022, Україна

**Золотухіна Ольга
Вікторівна**

завідувач лабораторією, старший викладач
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна
майдан Свободи, 4, місто Харків, 61022, Україна

**Золотухін Олександр
Олександрович**

старший викладач
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна
майдан Свободи, 4, місто Харків, 61022, Україна

**Муравшик
Максим Сергійович**

*студент кафедри моделювання систем і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан
Свободи 4, Харків, Україна, 61022*

При аналізі проблем організації ефективного функціонування розподілених мереж передачі даних з комутацією пакетів з'ясується необхідність удосконалення існуючих моделей окремих мережевих структур, розробки нових моделей для дослідження ефектів, факторів і механізмів, що не розглядалися раніше, та створення на їх основі нетрудомістких методів вибору параметрів мережі за різними критеріями оптимальності. Аналітичний огляд результатів, досягнутих у вивченні різних структурних утворень, дозволив виявити ступінь опрацювання питань організації ефективної роботи мережі, сформулювати невирішені завдання та намітити основні напрямки досліджень. При цьому явно не враховується специфіка наскрізного транспортування даних по багатоланковому віртуальному з'єднанню, а питання адекватності розподілів, що задаються реальному процесу передачі інформації не розглядається і залишається відкритим. Запропоновано підхід до побудови розподілу часу передачі інформаційного пакета у віртуальному каналі зі спотвореннями, на основі якого проводиться аналіз впливу тривалості наскрізного тайм-ауту неприйняття квитанції на операційні характеристики процесу транспортування даних. Запропоновано модель тракту передачі даних з спотвореннями на окремих ділянках переприйому у вигляді стохастичного конвеєра, а також отримані допоміжні співвідношення, необхідні для аналізу інформаційного стохастичного переносу. Параметри лінійних протоколів значною мірою визначають потенційні можливості міжвузлових з'єднань, вимоги до обсягу буферної пам'яті вузлів комутації та наскрізну затримку абонентських повідомлень. Відомі методи формального вибору цих параметрів орієнтовані в основному на безумовну перевагу критерію пропускної спроможності міжвузлових з'єднань та вимагають трудомістких чисельних розрахунків. Оскільки завдання перевизначення мережевих параметрів досить часто виникає в реальних мережах у зв'язку із зміною умов експлуатації, то виникає потреба в розробці нетрудомістких інженерних методів їх вибору за різними критеріями оптимальності.

Ключові слова: конвеєрний ефект, кількість наскрізних передач, розподіл часу, затримка мультипакетного повідомлення, високоякісні канали зв'язку.

Метод распределения времени доставки пакета

**Богучарский
Сергій Іванович**

*Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Харковский национальный университет имени В.Н.Каразина
площадь Свободы, 4, город Харьков, 61022, Украина*

**Золотухина Ольга
Викторовна**

*заведующий лабораторией, старший преподаватель
Харковский национальный университет имени В. Н.Каразина,
площадь Свободы4, Харьков, Украина, 61022*

**Золотухин Александр
Александрович**

*старший преподаватель
Харковский национальный университет имени В. Н.Каразина,
площадь Свободы4, Харьков, Украина, 61022*

**Муравшик
Максим Сергійович**

*студент кафедри моделювання систем і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, площа
Свободи 4, Харків, Україна, 61022*

При анализе проблем организации эффективного функционирования распределенных сетей передачи данных с коммутацией пакетов выясняется необходимость совершенствования существующих моделей отдельных сетевых структур, разработки новых моделей для исследования эффектов, факторов и механизмов, не рассматривавшихся ранее, и создания на их основе нетрудоемких методов выбора сетевых параметров по различным критериям оптимальности. Аналитический обзор результатов, достигнутых в изучении различных структурных образований, позволил выявить степень проработки вопросов организации эффективной работы сети, сформулировать нерешенные задачи и наметить основные направления исследований. При этом явно не учитывается специфика сквозной транспортировки данных по многозвенному виртуальному соединению, а вопрос адекватности задаваемых распределений реальному процессу передачи информации не рассматривается и остается открытым. Предложен подход к построению распределения времени передачи информационного пакета в виртуальном канале с искажениями, на основе которого проводится анализ влияния длительности сквозного тайм-аута неприема квитанции на операционные характеристики процесса транспортировки данных. Предложена модель тракта передачи данных с искажениями на отдельных участках переприема в виде стохастического конвейера, а также получены вспомогательные соотношения, необходимые для анализа стохастического информационного переноса. Параметры линейных протоколов в значительной мере определяют потенциальные возможности междуузловых соединений, требования к объему буферной памяти узлов коммутации и сквозную задержку абонентских сообщений. Известные методы формального выбора этих параметров ориентированы в основном на безусловное предпосещение критерия пропускной способности междуузловых соединений и требуют трудоемких численных расчетов. Поскольку задача переопределения сетевых параметров достаточно часто возникает в реальных сетях в связи с изменением условий эксплуатации, то появляется потребность в разработке нетрудоемких инженерных методов их выбора по различным критериям оптимальности.

Ключевые слова: конвейерный эффект, количество сквозных передач, распределение времени, задержки мультипакетного сообщения, высококачественные каналы связи.

1 Models of pipeline mechanisms of the data transfer process in a virtual connection

The probability of message delivery between interacting applications in a given time and the average end-to-end delay of user information in a virtual channel are among the most significant indicators of the quality of service for subscribers of information and computer networks. An important aspect of the effective organization of the data transport process is choosing the length of the end-to-end confirmation time-out for end-to-end delivery of information to remote subscribers [1]. Existing approaches [3] to solving this problem allow studying the effect of the non-receipt time-out duration on the operational characteristics of the data transmission process for given distributions of the time for transferring information packets and acknowledgments between correspondent subscribers.

In this case, it is clear that the peculiarity of end-to-end data transportation over a multi-link virtual connection is not taken into account, and the question of the adequacy of the assigned distributions to the real information transfer process is not considered and remains open.

A new approach to distributing the information packet transmission time for a virtual channel with distortions is proposed [6]. On its basis the analysis of the influence of end-to-end non-receipt time-out duration on the operational characteristics of the data transport process has been carried out.

A model of a data transmission path with distortions in individual sections of the transfer in the form of a stochastic conveyor is proposed, and auxiliary relations necessary for the analysis of stochastic information transfer have been obtained.

We consider the study and the analysis of various schemes of end-to-end handshaking in the process of transmitting a multi-packet message in a multi-link virtual connection as the part of constructing the procedure for calculating the time-out duration.

2 Pipelined interpretations of a virtual connection

When the distortion factor of protocol data blocks and the decisive feedback mechanism (retransmissions of distorted blocks) are superimposed on the pipeline effect that occurs for the process of transferring information flows along multi-link (multiphase) paths, a virtual connection can be interpreted as a stochastic pipeline, in which the processing time on individual phases is random. Since at the level of end-to-end transmission of multi-packet messages of application systems, an urgent task is to determine the durations of waiting intervals for end-to-end acknowledgments (end-to-end time-outs), and an important aspect is the probabilistic description of the end-to-end information transfer process at the transport level. An exhaustive description of such a pipeline specifies the distribution of the end-to-end delivery of application messages to the addressee.

The search for such a distribution is considered as the process of transferring a multi-packet message consisting of N packets, over a multi-link virtual connection of the length $D \geq 1$, expressed in the number of inter-node links.

It is supposed that each link of the virtual connection is controlled by a start-stop exchange procedure [2, 7] and has the same packet transmission cycle times T from the beginning of its withdrawal to the communication line until the receiving of the receipt. With probability R_{nd} , $n = \overline{1, N}$, $d = \overline{1, D}$ in every link d distortion occurs of n -th information packet and retransmission is carried out according to the control procedure.

The number of retransmissions is considered to be unlimited. Then the time of error-free packet transmission over d -th node-to-node connection is a random multiple of the cycle time T and distributed according to the geometric law with the parameter $1 - R_{nd}$.

It is also assumed that the sending of a packet at each segment of the virtual connection begins only after it has been transmitted without distortion along the previous segment of the path. It is believed that end-to-end data transport is organized as follows. A time-out is allocated to transmit a packet to a remote recipient and receive a response receipt. S size intervals T .

If the receipt is not received during the time-out period, the sender organizes a retransmission end-to-end. The number of pass-through transmissions is also assumed to be unlimited.

3 Determining the probabilities of package delivery time

Finding the probability of end-to-end transmission of a single information packet $p(k, N, N)$ over virtual connection of length D equals k intervals duration of which is T . Obviously, the number of intervals must satisfy the condition $k \geq D$. Let $D=1$, then $p(k, 1, 1) = (1 - R)^{k-1}$. At $D=2$ the

probability function is given by the sum of all possible products of the probabilities of successful packet transmission over the first and second links of the virtual channel during the time k (12).

$$p(k, 1, 2) = (1 - R_1)(1 - R_2) \sum_{i=1}^{k-2} R_1^i R_2^{k-2-i} \quad (1)$$

$$p(k, 1, 2) = (1 - R_1)(1 - R_2) \left\{ \frac{R_1^{k-1}}{R_1 - R_2} + \frac{R_2^{k-1}}{R_2 - R_1} \right\} \quad (2)$$

Provided that $D = 3$, then the required probability $p(k, 1, 3)$ takes the form (3, 4).

$$p(k, 1, 3) = (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \sum_{i=0}^{k-3} R_1^i \sum_{j=0}^{k-3-i} R_2^j R_3^{k-3-i-j} \quad (3)$$

$$p(k, 1, 3) = (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \times \left\{ \frac{R_1^{k-1}}{(R_1 - R_2)(R_1 - R_3)} + \frac{R_2^{k-1}}{(R_2 - R_1)(R_2 - R_3)} + \frac{R_3^{k-1}}{(R_3 - R_1)(R_3 - R_2)} \right\} \quad (4)$$

For arbitrary D the probability function has the form (5, 6).

$$p(k, 1, D) = \prod_{d=1}^D (1 - R_d) \sum_{d_1=0}^{S_1} R_1^{d_1} \dots \sum_{d_{D-2}=0}^{S_{D-2}} R_{D-2}^{d_{D-2}} \sum_{d_{D-1}=0}^{S_{D-1}} R_{D-1}^{d_{D-1}} R_D^{S_D} \quad (5)$$

$$S_d = k - D - \sum_{i=1}^{d-1} d_i \quad (6)$$

Successively performing the summation in this relation, we obtain (7).

$$p(k, 1, D) = \prod_{d=1}^D (1 - R_d) \sum_{d=1}^D R_d^{k-1} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq d}}^D \frac{1}{R_d - R_i} \quad (7)$$

Therefore, for $k = D$ we come to the expected result (8).

$$p(D, 1, D) = \prod_{d=1}^D (1 - R_d) \quad (8)$$

In practical cases, for a virtual connection, the equality $R_d = R$, $d = \overline{1, D}$, indicating the statistical homogeneity of distortions in various links of the data transmission path. Under this condition, an uncertainty of the form arises in the expression (4) of $\frac{0}{0}$. To get values $p(k, 1, D)$ here it is necessary to execute $(D - 1)!$ rather time-consuming operations of disclosing uncertainty and finding $p(k, 1, D)$ from the function (3, 4) by the definition (9).

$$p(k, 1, D) = (1 - R)^D R^{k-D} \sum_{d_1=0}^{S_1} \dots \sum_{d_{D-1}=0}^{S_{D-1}} 1 \quad (9)$$

Ratio for the sum (10) species [5, 8].

$$\sum_{k=1}^n \prod_{i=0}^m (k + i) = \frac{1}{m + 2} \prod_{i=0}^{m+1} (n + i) \quad (10)$$

Applying (10), we obtain the relation (11).

$$p(k, 1, D) = \binom{k-1}{D-1} (1 - R)^D R^{k-D} \quad (11)$$

This dependence can be represented in a recurrent form (12, 13).

$$p(k, 1, D+1) = p(k, 1, D) \frac{(k-D)(1-R)}{DR} \quad (12)$$

$$p(k, 1, 1, D) = p(k, 1, D) \frac{kR}{k-D+1} \quad (13)$$

Thus, for $R=0$ the probability function (11) is transformed into the defining form (14).

$$p(k, 1, D+1) = p(k, 1, D) = 0, \text{ where } k > D \quad (14)$$

4 Distribution of package delivery time

An important operational parameter for a virtual connection is the probability of an end-to-end packet transmission within a given time-out period S (15):

$$p(S, 1, D) = \sum_{k=D}^S p(k, 1, D) \quad (15)$$

When determining a statistically inhomogeneous virtual channel (16), the probability $p(S, 1, D)$ in relation to $p(S, 1, D)$ in relation to (11) takes the form (17).

$$R_i \neq R_j, i \text{ and } j = \overline{1, D}, i, \neq j \quad (16)$$

$$p(S, 1, D) = \sum_{d=1}^D (R_d^{D-1} - R_d^S) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^D \frac{1-R_i}{R_d - R_i} \quad (17)$$

Finding the dependency $p(S, 1, D)$ on the parameters of a statistically homogeneous virtual channel. Successively solving the equations and canonizing the obtained and known [4] relations (18-21) for sums of the form (22) proceeding from (17) taking into account (7) at $D = \overline{1, 4}$ we get (23-26).

$$\sum_{i=1}^k x^i = \frac{x(1-x^k)}{1-x} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^k i x^i = \frac{x(1-x^k)}{(1-x)^2} - \frac{kx^{k+1}}{1-x} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^k i^2 x^i = \frac{x(1-x^k)(1+x)}{(1-x)^3} - \frac{kx^{k+1}}{1-x} \left\{ k + \frac{2}{1-x} \right\} \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^k i^3 x^i = \frac{x(1-x^k)(1+4x+x^2)}{(1-x)^4} - \frac{kx^{k+1}}{1-x} \left\{ k^2 + \frac{3k}{1-x} + \frac{3(1+x)}{(1-x)^2} \right\} \quad (21)$$

$$\sum_{k=0}^l k^s s^k, s = \overline{0, 3} \quad (22)$$

$$P(S, 1, 1) = 1 - R^S \quad (23)$$

$$P(S, 1, 2) = 1 - R^S - S(1-R)R^{S-1} \quad (24)$$

$$P(S, 1, 3) = 1 - R^S - S(1-R)R^{S-1} - \frac{S(S-1)}{2}(1-R)^2 R^{S-2} \quad (25)$$

$$P(S, 1, 3) = 1 - R^S - S(1-R)R^{S-1} - \frac{S(S-1)}{2}(1-R)^2 R^{S-2} - \frac{S(S-1)(S-2)}{6}(1-R)^3 R^{S-3} \quad (26)$$

Thus, for an arbitrary D meaning $P(S, 1, D)$ is determined by (27) at where K_D is a known parameter. Provided that $S = D$ based on (15), the expression $P(D, 1, D) = (1-R)^D$ is set. From (27) and considering the conditions $(1-R)$ we get (28)

$$P(S, 1, D) = P(S, 1, D - 1) - K_D \prod_{i=0}^{D-2} (S - i)(1 - R)^{D-1} R^{S-D+1} \quad (27)$$

$$(1 - R)^D = 1 - \sum_{d=0}^{D-1} K_d \prod_{i=0}^{d-1} (D - i)(1 - R)^d R^{D-d} \quad (28)$$

This approach is defined by the identity expression if the factors at R and $(1 - R)$ are determined by the coefficients of the Newton binomial of degree D . Based $K_d = 1/d!$ and compliance $P(S, 1, D)$ naturally occurs (29).

$$P(S, 1, D) = 1 - \sum_{d=0}^{D-1} \binom{S}{D} (1 - R)^d R^{S-d} \quad (29)$$

Thus, for $R = 0$ the distribution function $P(S, 1, D) = 1$ for $S \geq D$.

5. Conclusion

The time slice of the process of end-to-end transportation of a single packet over a multi-link path coincides with the transmission of a multi-packet message over a virtual connection consisting of one hop. That testifies to the symmetry of information transfer, expressed in the fact that the operational characteristics (probability function, distribution function, and average time to reach the destination) of the end-to-end delivery of a single packet over a virtual connection of the length D and the process of transmitting a message from $N = D$ packets on a single-link virtual channel are completely the same. Then, for the average delay of a multi-packet message with end-to-end confirmation of the correctness of its transmission as a whole by information packets of the opposite flow.

It has been determined that the main contribution to the limit values of the average end-to-end delay in a stochastically homogeneous path corresponding to an unlimited timeout duration changes the time of transmission of a multi-packet message and receipt of a response receipt in a deterministic pipeline with a transmission time in a separate phase equal to the average packet delay. The contribution of the remaining components to the end-to-end delay is proportional to the intensity of a packet distortion R which can be neglected for high-quality communication channels.

REFERENCES

1. Chu W.W. Optimal Message Block Size for Computer Communications with Error Detection and Retransmission Strategies // IEEE Trans. on Commun. 1994. Vol. COM-22, is. 10. P. 1516–1525.
2. Irland M.I., Pujolle G. Comparison of Two Packet-Retransmission Techniques // IEEE Trans. on Inform. Theory. 1990. Vol. IT-26, is. 1. P. 92–97.
3. Labetoulle J., Pujolle G. HDLC Throughput and Response Time for Bidirectional Data Flow with Nonuniform Frame Sizes // IEEE Trans. on Comput. 2001. Vol. C-30, is. 6. P. 405–413.
4. Lazak D. Derivation of optimal packet sizes within packet switching systems by considering packet switching line protocols // Pacif. Telecommun. Conf. : Papers and Proc. of a Conf. Honolulu: IEEE. 2009. P. 1A-1–1A-8.
5. Ufford J.C., Ross M.J. Interaction of Critical Link Control Parameters for Data Communication // Int. Conf. on Commun. : Conf. Records. Toronto : IEEE. 2018. P. 36.2.1–36.2.5.
6. Wang J., Pujolle G. Delay and Throughput Analysis for Computer Communications with Balanced HDLC Procedures // IEEE Trans. on Comput. 2008. Vol. C-31, is. 8. P. 739–746.
7. Bux W., Kummerle K., Truong H.L. Balanced HDLC Procedures: A Performance Analysis // IEEE Trans. on Commun. 1998. Vol. COM-28, is. 11. P. 1889–1898.
8. Caseau P., Pujolle G. Throughput Capacity of a Sequence of Queues with Blocking due to Finite Waiting Room // IEEE Trans. on Software Eng. 2009. Vol. SE-5, is. 6. P. 631–642.