**Российская академия наук** (РАН)
**Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова**
Российской академии наук (ИПУ РАН)
**Российский университет дружбы народов** (РУДН)
**Институт информационных и телекоммуникационных технологий**
Болгарской академии наук (София, Болгария)
**Национальный исследовательский Томский государственный университет** (НИ ТГУ)
Научно-производственное объединение
**«Информационные и сетевые технологии»** («ИНСЕТ»)

# РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛЕНИЕ, СВЯЗЬ (DCCN-2020)




**МАТЕРИАЛЫ XXIII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**
**(14–18 СЕНТЯБРЯ 2020 г., МОСКВА, РОССИЯ)**

*Под общей редакцией д.т.н. В.М. Вишневского, д.т.н. К.Е. Самуйлова*

НАУЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

**Москва**
**ИПУ РАН**
**2020**

**Russian Academy of Sciences** (RAS)
**V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS** (ICS RAS)
**Peoples' Friendship University of Russia** (RUDN University)
**Institute of Information and Communication Technologies** of Bulgarian Academy of Sciences (Sofia, Bulgaria)
**National Research Tomsk State University** (NR TSU)
Research and development company
**"Information and networking technologies"**

# DISTRIBUTED COMPUTER AND COMMUNICATION NETWORKS: CONTROL, COMPUTATION, COMMUNICATIONS (DCCN-2020)




**PROCEEDINGS OF THE XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE**
**(September 14–18, 2020, Moscow, Russia)**

*Under the general editorship of D.Sc. V.M. Vishnevskiy, D.Sc. K.E. Samouylov*

**MOSCOW**
**ISC RAS**
**2020**

**УДК 004.7:004.4].001:621.391:007**
**ББК 32.973.202:32.968**
**Р 24**

**Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2020)** = Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2020) [Электронный ресурс] **:** материалы XXIII Междунар. научн. конфер, 14–18 сент. 2020 г., Москва / под общ. ред. В.М. Вишневского, К.Е. Самуйлова; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 44,9 Мб). – М.: ИПУ РАН, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Internet Explorer; Acrobat Reader 4.0 или выше. – Загл. с экрана. – ISBN 978-5-91450-248-2. – № госрегистрации 0322002892.

В научном электронном издании представлены материалы XXIII Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» по следующим направлениям:

- Алгоритмы и протоколы телекоммуникационных сетей
- Управление в компьютерных и инфокоммуникационных системах
- Анализ производительности, оценка QoS / QoE и эффективность сетей
- Аналитическое и имитационное моделирование коммуникационных систем последующих поколений
- Эволюция беспроводных сетей в направлении 5G;
- Технологии сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн;
- RFID-технологии и их приложения;
- Интернет вещей и туманные вычисления
- Системы облачного вычисления, распределенные и параллельные системы
- Большие данные
- Вероятностные и статистические модели в информационных системах
- Теория массового обслуживания, теория надежности и их приложения
- Высотные беспилотные платформы и летательные аппараты: управление, передача данных, приложения

В материалах научной конференции DCCN-2020, подготовленных к выпуску к.ф.-м.н. Козыревым Д.В., обсуждены перспективы развития и сотрудничества в этой сфере.

Сборник материалов конференции предназначен для научных работников и специалистов в области управления крупномасштабными системами.

*Текст научного электронного издания*
*воспроизводится в том виде, в котором представлен авторами*

**Утверждено к изданию Программным комитетом конференции**

**ISBN 978-5-91450-248-2** **© ИПУ РАН, 2020**

## Содержание / Contents


1. **Markovich N.M., Krieger U.R.**
   STATISTICAL ANALYSIS OF THE END-TO-END DELAY OF PACKET TRANSFERS IN A PEER-TO-PEER NETWORK……..…..1

2. **Melikov A., Aliyeva S., Shahmaliyev M.**
   SPACE MERGING APPROACH TO ANALYSIS OF QUEUING SYSTEM WITH HETEROGENEOUS SERVERS AND N-POLICY……9

3. **Chernyshova E., Lisovskaya E., Moiseeva S., Pagano M.**
   ON A TOTAL AMOUNT OF OCCUPIED RESOURCE IN THE SYSTEM WITH PARALLEL SERVICE AND RENEWAL ARRIVAL PROCESS……...17

4. **Galileyskaya A., Lisovskaya E., Pagano M., Moiseeva S.**
   RESOURCE QS WITH THE REQUESTS DUPLICATION AT THE SECOND PHASE AND RENEWAL ARRIVAL PROCESS……25

5. **Shchetinin E.Yu., Sevastianov L.A., Ayrjan E.A., Demidova A.V.**
   MELANOMA DETECTION WITH DEEP NEURAL NETWORKS……..33

6. **Shchetinin E.Yu., Sevastianov L.A., Kulyabov D.S., Ayrjan E.A., Demidova A.V.**
   PARALINGUISTIC MODEL FOR EMOTIONS RECOGNITION WITH DEEP NEURAL NETWORKS……42

7. **Houankpo H.G.K., Kozyrev D.V., Nibasumba E., Mouale M.N.B., Sergeeva I.A.**
   A SIMULATION APPROACH TO RELIABILITY ASSESSMENT OF A REDUNDANT SYSTEM WITH ARBITRARY DISTRIBUTIONS OF UPTIME AND REPAIR TIME OF ITS ELEMENTS……..51

8. **Bakanova N.B., Volchkov D.V., Bakanov A.S.**
   CREATION AND VISUALIZATION OF THE SUBJECT AREA MODEL……..60

9. **Noskov I.I., Bogatyrev V.A.**
   FAULTLESS AND TIMELY MULTIPATH PACKETS DELIVERY PROBABILITY IN COMPUTER NETWORKS USING UDP-BASED PROTOCOL……..65

10. **Andronov A., Dalinger Ia., Santalova D.**
    OVERBOOKING'S PROBLEM FOR A CASE OF A RANDOM ENVIRONMENT EXISTENCE ……..…..75

11. **Milovanova T.A., Razumchik R.V., Kozyrev D.V.**
    MODELING D2D-ENHANCED IOT CONNECTIVITY……83

12. **Dudin A.N., Dudin S.A., Dudina O.S.**
    OPTIMIZATION OF A SIGNAL PROCESSING STRATEGY IN SENSOR NODES WITH ENERGY HARVESTING AND CONSUMPTION FOR ADMISSION AND TRANSMISSION……....90

13. **Antonova V.M., Kuznetsova A.M.**
    ИЗУЧЕНИЕ СБОЕВ ПРИ РАБОТЕ ТЕХНОЛОГИИ MIMO……...98

14. **Brokarev I.A., Vaskovskii S.V.**
    INFORMATION-PROCESSING SYSTEM FOR NATURAL GAS QUALITY ANALYSIS……106

15. **Mandel A.S., Laptin V.A.**
CHANNEL SWITCHING STRATEGIES FOR MULTISTEP MARKOVIAN CONTROLLABLE QUEUING SYSTEMS (QS) PROBLEMS.....114

16. **Мандель А.С., Лаптин В.А,**
СТРАТЕГИИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ КАНАЛОВ В МНОГОШАГОВЫХ МАРКОВСКИХ ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ СМО.....122

17. **Shchetinin E.Yu., Sevastianov L.A., Kulyabov D.S., Ayrjan E.A.**
ON IMPROVING THE ACCURACY OF THE CLASSIFICATION ON IMBALANCED CLASSES WITH MACHINE LEARNING.....130

18. **Grusho A.A., Grusho N.A., Zabezhailo M.I., Timonina E.E.**
GENERATION OF METADATA FOR INFORMATION TECHNOLOGY CONTROL.....139

19. **Vishnevsky V.M., Mukhtarov A.A., Pershin O.Yu.**
ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ТЕРРИТОРИИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА ВЕЛИЧИНУ МЕЖКОНЦЕВОЙ ЗАДЕРЖКИ.....148

20. **Ivanova N.M.**
MODELING AND SIMULATION OF RELIABILITY FUNCTION OF A K-OUT-OF-N:F SYSTEM WITH PARTIAL REPAIR.....156

21. **Stepanov S.N., Stepanov M.S., Andrabi U., Ndayikunda Ju.**
THE MODELING OF RESOURCE SHARING FOR HETEROGENEOUS DATA STREAMS OVER 3GPP LTE WITH NB-IOT FUNCTIONALITY.....164

22. **Stepanov S.N., Stepanov M.S., Shishkin M.O.**
ESTIMATION OF PERFORMANCE MEASURES OF EMERGENCY SERVICES FOR OVERLOAD OF CALLS.....173

23. **Ivanov A., Ziazina N., Antonova V.**
PERFORMANCE OF MATLAB CLUSTERING ALGORITHMS .....181

24. **Nazarov A.A., Phung-Duc T., Izmailova Y.E.**
GAUSSIAN ASYMPTOTICS FOR A MULTICLASS M/M/1/1 RETRIAL QUEUEING SYSTEM.....189

25. **Namiot D., Sneps-Sneppe M.**
HOW TO BUILD A HYPER-LOCAL INTERNET .....197

26. **Goldstein B.S., Kislyakov S.V.**
FORECASTING THE INCOMING LOAD OF A CONTACT CENTER USING CHAOS THEORY METHODS.....207

27. **Kalimulina E.Yu.**
ON ERGODICITY OF SOME STOCHASTIC NETWORKS AND ITS APPLICATIONS.....215

28. **Sopin E.S., Darmolad A.V., Bixalina D.N.**
QUANTIFYING THE ROUND-TRIP DELAY IN CLOUD-RAN.....222

29. **Sopin E., Begishev V., Moltchanov D., Samuylov A.**
RESOURCE QUEUING SYSTEM WITH PREEMPTIVE PRIORITY FOR URLLC AND EMBB COEXISTENCE IN 5G NR.....229

30. **Markovich N.M., Ryzhov M.S.**
LEADER ELECTION IN COMMUNITIES FOR INFORMATION SPREADING.....236

31. **Klimenok V.I., Dudin A.N., Vishnevsky V.M.**
СИСТЕМА МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ MMAP/PH$_{1,2}$/N/0 С НЕОДНОРОДНЫМИ ЗАПРОСАМИ И ПРИОРИТЕТАМИ.....244

32. **Nosova M.G.**
RESEARCH OF DEMOGRAPHIC PROCESSES BY METHODS OF QUEUING THEORY.....252

33. **Sztrik J., Tóth Á., Pintér Á., Bács Z.**
RELIABILITY ANALYSIS OF FINITE-SOURCE RETRIAL QUEUEING SYSTEMS WITH TWO-WAY COMMUNICATIONS TO THE ORBIT AND BLOCKING USING SIMULATION.....260

34. **Rykov V.V., Ivanova N.M., Kozyrev D.V.**
SENSITIVITY ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF A K-OUT-OF-N:F SYSTEM TO SHAPES OF LIFE AND REPAIR TIMES DISTRIBUTIONS OF ITS COMPONENTS.....268

35. **Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V.**
TIMELINESS OF REDUNDANT SERVICE OF A HETEROGENEOUS REQUEST FLOW BY A SEQUENCE OF NODES OF THE INFO-COMMUNICATION SYSTEM.....276

36. **Mishkoy G.K., Mitev L.M.**
COMPUTATIONAL ASPECTS OF MODELLING PERFORMANCE CHARACTERISTICS FOR POLLING MODELS WITH SEMI-MARKOV SWITCHING AND PRIORITIES.....284

37. **Morozov V.P., Alikin K.A.**
SCALING ERROR SUPPRESSION IN SMALL SIGNAL PREAMPLIFIERS FOR VIBRATION MONITORING NETWORKS.....290

38. **Vanin A.B., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V.**
DATA MIGRATION RATE OF THE CRUSH-BASED DISTRIBUTED OBJECT STORAGE WITH DYNAMIC TOPOLOGY.....297

39. **Vas Á, Tóth L.**
COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR SMOOTHING INITIAL 2D DATA OF THE DSN-PC SYSTEM'S WEATHER PREDICTION ALGORITHM.....305

40. **Tsitovich I.I.**
GROUP POLLING METHOD FOR SENSORS DETECTING IN UNSYNCHRONIZED STRUCTURED WIRELESS MONITORING NETWORKS.....315

41. **Nekrasova R.S.**
REGENERATIVE ESTIMATION OF M/G/2-TYPE SYSTEM WITH SIMULTANEOUS SERVICE AND SPEED SCALING.....323

42. **Vorobiev V.M., Dyagilev R.A.**
НЕЙРОСЕТЬ В СОСТАВЕ СТАНЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА.....332

43. **Rudenkova M.A., Khayou H., Abrosimov L.I.**
A METHODOLOGY FOR ADAPTING WIRELESS CHANNEL RESOURCES TO THE LOAD BY SWITCHING BETWEEN MEDIUM ACCESS PROTOCOLS.....338

44. **Mamonov A.A., Varlamov R.A., Salpagarov S.I.**
DISTRIBUTION OF COMPUTING LOAD BY USING A P2P NETWORK.....347

45. **Sazonov D.D., Kiricheck R.V.**
IDENTIFICATION OF DEVICES IN A MESH NETWORKS BASED ON DIGITAL OBJECT ARCHITECTURE.....355

46. **Moshnikov A.**
EVALUATION OF NETWORK RELIABILITY AND ELEMENT IMPORTANCE METRICS USING THE R SOFTWARE PACKAGE.....364

47. **Alexandrov A., Monov V.**
SARSA BASED METHOD FOR WSN TRANSMISSION POWER MANAGEMENT.....372

48. **Nazarov A.A., Rozhkova S.V., Titarenko E.Yu.**
ASYMPTOTIC ANALYSIS OF $M^{[n]}/M/1$ RQ-SYSTEM WITH FEEDBACK AND BATCH POISSON ARRIVAL.....380

49. **Dorokhin S.V.**
SYNCHRONISATION OF ISS-OFDM SIGNALS.....388

50. **Nikolsky I.M., Furmanov K.K.**
ON EFFECTIVENESS OF MESSAGE RETRANSMISSION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS.....396

51. **Efremova E.V., Kuzmin L.V.**
APPROACH TO INDOOR DISTANCE MEASUREMENT IN WIRELESS SENSOR NETWORKS BY MEANS OF ULTRA-WIDE-BAND CHAOTIC RADIO PULSES.....404

52. **Meykhanadzhyan L.A., Zaryadov I.S., Milovanova T.A.**
STATIONARY CHARACTERISTICS OF THE TWO-NODE TANDEM QUEUEING SYSTEM WITH POISSON ARRIVALS AND GENERAL RENOVATION.....413

53. **Korolkova A.V., Kulyabov D.S., Hnatič M.**
THE MULTI-MODEL APPROACH TO THE STUDY OF COMPLEX SYSTEMS USING THE EXAMPLE OF THE RED ACTIVE QUEUE MANAGEMENT ALGORITHM.....418

54. **Rogozin S.S.**
SIMULATION A MODIFIED ERLANG SYSTEM WITH PRIORITY CUSTOMERS.....426

55. **Apreutesey A.M.Y, Korolkova A.V., Kulyabov D.S**
ВОЗМОЖНОСТИ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ С УПРАВЛЕНИЕМ НА ЯЗЫКАХ MODELICA И JULIA.....433

56. **Suranga Sampath M.I.G.**
TRANSIENT ANALYSIS OF AN M/M/1/N QUEUE WITH BALKING, CATASTROPHES, SERVER FAILURES AND REPAIRS.....441

57. **Borodina A.V., Tishenko V.A.**
ON ALGORITHMS FOR EFFECTIVE SPEED-UP SIMULATION OF RELIABILITY MODELS.....449

58. **Kulik V.A., Pham V.D., Kirichek R.V.**
MODELS AND METHODS OF USAGE OF THE HETEROGENEOUS GATEWAYS IN THE MESH LPWAN NETWORKS .....458

59. **Kulik V.A., Pham V.D., Kirichek R.V.**
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ШЛЮЗОВ В ЯЧЕИСТЫХ СЕТЯХ LPWAN.....466

60. **Pham V.D., Le D.T., Kirichek R.V.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ ЯЧЕИСТОЙ СЕТИ ДАЛЬНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ.....474

61. **Pham V.D., Vorozheikina O.I., Grishin I.V., Okuneva D.V., Kirichek R.V.**
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ УЗЛОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С ЯЧЕИСТОЙ ТОПОЛОГИЕЙ.....482

62. **Pham V.D., Le D.T., Kirichek R.V.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТОКОЛА AODV В ЯЧЕИСТОЙ СЕТИ LORA.....490

63. **Pham V.D., Le D.T., Kirichek R.V.**
A STUDY OF USING AODV PROTOCOL IN LORA MESH NETWORK.....499

64. **Petrov P.D., Kostadinov G.B., Zhivkov P.R., Velichkova V.I., Balabanov T.D.**
APPROXIMATE SEQUENCING OF VIRTUAL REELS WITH GENETIC ALGORITHMS.....507

65. **Dimitrov B., Rykov V., Esa S.**
ON DIFFERENT APPROACHES TO STUDY A DOUBLE REDUNDANT RENEWABLE SYSTEM UNDER MARSHALL-OLKIN FAILURE MODEL....515

66. **Zverkina G.A.**
ERGODICITY OF GENERALIZED MARKOV MODULATED POISSON PROCESSES.....523

67. **Nazarov A.A., Phung-Duc T., Paul S.V., Lizyura O.D.**
ASYMPTOTIC-DIFFUSION ANALYSIS OF MULTISERVER RETRIAL QUEUE WITH TWO-WAY COMMUNICATION.....531

68. **Nazarov A.A., Paul S.V., Klyuchnikova P.N.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОВТОРНЫМИ ВЫЗОВАМИ.....540

69. **Khayou H., Rudenkova M.A., Abrosimov L.I.**
AN ALGEBRAIC APPROACH TO LOOP FREE ROUTING.....548

70. **Goldstein B.S., Fitsov V.V.**
THE MATHEMATICAL MODEL OF FRONT-END CALCULATING IN DPI SYSTEM.....563

71. **Khalina V., Prosvirov V., Gaidamaka Yu., Pokorny J., Hosek J., Samouylov K.**
SIMULATION-BASED ANALYSIS OF MOBILITY MODELS FOR WIRELESS UAV-TO-X NETWORKS.....571

72. **Gerdt V.P., Kotkova E.A.**
ON THE QUANTUM TELEPORTATION OF BELL STATES PERFORMED ON 5-QUBIT IBM Q COMPUTERS.....579

73. **Kulik V.A., Gallyamov D.A., Kirichek R.V.**
ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРИОРИТЕТОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ СЕТЕВОГО ТРАФИКА ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ШЛЮЗОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....584

74. **Chukhno N., Chukhno O., Araniti G., Iera A., Molinaro A., Pizzi S.**
DELIVERING MULTICAST TRAFFIC IN MMWAVE SYSTEMS: CHALLENGES AND PERFORMANCE ANALYSIS.....590

75. **Anilkumar M.P., Jose K.P.**
COMPARISON OF DIFFERENT LEVELS OF LOCAL PURCHASE QUANTITIES IN A GEO/GEO/1 PRODUCTION INVENTORY SYSTEM.....599

76. **Simonov A.S., Brekhov O.M.**
ARCHITECTURE AND FUNCTIONALITY OF THE COLLECTIVE OPERATIONS SUBNET OF THE ANGARA INTERCONNECT.....607

77. **Tsarev A., Abaev P.**
MATHEMATICAL MODEL FOR HORIZONTAL ON-DEMAND VEPC SCALABILITY IN SDN-BASED ENVIRONMENT.....620

78. **Zhukova K.**
ESTIMATING THE OVERFLOW PROBABILITY IN SINGLE-SERVER RETRIAL SYSTEM WITH TWO CLASSES OF CUSTOMERS.....632

79. **Polin E.P., Moiseeva S.P., Moiseev A.N.**
ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНЕЧНОЛИНЕЙНОЙ СМО С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ.....638

80. **Tesfay A.A., Simon E.P., Clavier L.**
MULTI-USER DETECTION TO IMPROVE DOWNLINK COMMUNICATION OF CSS-BASED LORA-LIKE NETWORKS.....645

81. **Mathew N., Joshua V.C., Krishnamoorthy A.**
A QUEUEING INVENTORY SYSTEM WITH TWO CHANNELS OF SERVICE.....653

82. **Shorokhov S.G.**
ON WIRELESS CHANNEL MODELING WITH K DISTRIBUTION.....662

83. **Razumchik R.V.**
STATIONARY WAITING TIME DISTRIBUTION IN THE INFINITE-CAPACITY TWO-QUEUE SINGLE-SERVER RESEQUENCING SYSTEM WITH HOQ-LIFO-LIFO POLICY OPERATING IN RANDOM ENVIRONMENT.....670

84. **Vladimirov S., Vishnevsky V., Larionov A., Kirichek R.**
CONCEPT OF UFP BASED WBAN DATA ACQUISITION NETWORK.....677

85. **Kochetkov D.M., Kochetkova I.A., Makeeva E.D.**
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 5G НА РАЗВИТИЕ ЦИФРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ УМНЫХ ГОРОДОВ: НАУКОМЕТРИЧЕСКИЙ И ПАТЕНТНЫЙ АНАЛИЗ.....685

86. **Makolkina M., Shipota N., Koucheryavy A.**
DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF MODEL NETWORK IMT2020 WITH THE USE OF MEC AND VOICE ASSISTANT TECHNOLOGIES.....696

87. **Kochetkov D.M., Almaganbetov M.O.**
5G: ПАТЕНТНЫЙ ЛАНДШАФТ.....706

88. **Vishnevsky V., Rykov V., Finkelstein M.**
ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ПРИВЯЗНОГО МОДУЛЯ ВЫСОТНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ.....712

89. **Yermakov A.S., Shukmanova A.A., Seilova N.A.**
THE MARKOV MODEL FOR A MULTIPHASE SECURITY SYSTEM WITH THE PARTIAL CONCURRENT SERVICE.....724

90. **Golovinov E.E., Aminev D.A., Tatunov S.Yu., Polesskiy S.N., Kozyrev D.V.**
ОЦЕНКА КОМПЛЕКТОВ ЗИП ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ МЕТЕОСТАНЦИЙ МИНИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ.....733

91. **Rassadin Yu., Dushin S.**
БЕСПРОВОДНАЯ СЕНСОРНАЯ СЕТЬ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОГО СБОРА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LORAWAN И РАСПРЕДЕЛЕННОГО АЛГОРИТМА СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ.....743

92. **Melnikov S.Yu., Samouylov K.E.**
CESARO-HEREDITY PROPERTY IN THE SHIFT REGISTER FAMILY.....751

93. **Rassadin Yu., Dushin S.**
WIRELESS SENSOR NETWORK FOR INTENSIVE DATA COLLECTION BASED ON LORAWAN TECHNOLOGY AND DISTRIBUTED DATA COMPRESSION ALGORITHM.....764

94. **Vishnevsky V., Dinh T.D., Vybornova A., Kirichek R.**
FLYING NETWORK FOR EMERGENCY USING TETHERED MULTICOPTERS.....771

УДК: 519.872

# Исследование бесконечнолинейной СМО с интенсивностью входящего потока, зависящей от состояния системы

Е.П. Полин[1], С.П. Моисеева[1], А.Н. Моисеев[1]

[1]НИ ТГУ, пр. Ленина 36, Томск, Россия

polin_evgeny@mail.ru, smoiseeva@mail.ru, moiseev.tsu@gmail.com

**Аннотация**

Рассматривается математическая модель бесконечнолинейной системы массового обслуживания с входящим пуассоновским потоком с интенсивностью, зависящей от числа занятых приборов. Дисциплина обслуживания определяется тем, что заявка занимает любой из свободных приборов в системе, на котором выполняется ее обслуживание в течение случайного времени, распределенного по экспоненциальному закону. Методом производящих функций определены выражения для вероятностных характеристик числа занятых приборов в системе в стационарном режиме. Получена производящая функция рассматриваемого случайного процесса, имеющая вид производящей функции случайной величины, имеющей отрицательное биномиальное распределение вероятностей.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, переменная интенсивность, метод производящих функций.

## 1. Введение

Современные приложения теории массового обслуживания включают исследования математических моделей передачи данных в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях связи. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения систем массового обслуживания с изменяемыми параметрами функционирования, такими как интенсивность входящего потока, параметры обслуживания и другие [1–5].

В настоящей работе рассматривается математическая модель бесконечнолинейной системы массового обслуживания с входящим пуассоновским потоком с интенсивностью, зависящей от числа занятых приборов.

## 2. Математическая модель

Рассмотрим систему массового обслуживания, входящий поток которой является пуассоновским с интенсивностью вида $\lambda(i(t)) = a + b \cdot i(t)$, где $b$ – коэффициент, отражающий реакцию интенсивности входящего потока на количество заявок в системе, $i(t)$ – число занятых приборов в системе в момент времени $t$. В рамках данной работы рассматривается случай, когда $b > 0$. Дисциплина обслуживания определяется тем, что заявка занимает любой из свободных приборов в системе, на котором выполняется ее обслуживание в течение случайного времени, распределенного по экспоненциальному закону с параметром $\mu$. Ставится задача исследования вероятностных характеристик случайного процесса $i(t)$.

## 3. Система дифференциальных уравнений Колмогорова

Для распределения вероятностей рассматриваемого случайного процесса $i(t)$ составим $\Delta t$ – методом прямую систему дифференциальных уравнений Колмогорова. По формуле полной вероятности запишем равенства

$$P_0(t+\Delta t) = P_0(t)(1 - a\Delta t) + P_1(t)\mu\Delta t + o(\Delta t),$$
$$P_i(t+\Delta t) = P_i(t)(1 - (a+bi)\Delta t)(1 - i\mu\Delta t) + P_{i-1}(t)[a + b(i-1)]\Delta t +$$
$$+P_{i+1}(t)(i+1)\mu\Delta t + o(\Delta t),\ i \geq 1.$$

Система дифференциальных уравнений Колмогорова примет вид

$$\frac{\partial P_0(t)}{\partial t} = -aP_0(t) + \mu P_1(t),$$
$$\frac{\partial P_i(t)}{\partial t} = -(a + bi + \mu i)P_i(t) + (a - b + bi)P_{i-1}(t) + (i+1)\mu P_{i+1}(t),\ i \geq 1. \quad (1)$$

## 4. Метод производящих функций

Производящая функция определена в виде

$$F(z,t) = \sum_{i=0}^{\infty} z^i P_i(t).$$

Из системы дифференциальных уравнений Колмогорова (1) для функций $F(z,t)$ получаем линейное дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка

$$\frac{\partial F(z,t)}{\partial t} - [(z-1)(bz-\mu)]\frac{\partial F(z,t)}{\partial z} = a(z-1)F(z,t). \quad (2)$$

Для (2) запишем систему дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dt}{1} = \frac{dz}{(z-1)(\mu - bz)} = \frac{dF(z,t)}{a(z-1)F(z,t)}. \tag{3}$$

Найдем два первых интеграла этой системы. Один из них найдем из уравнения

$$dt = \frac{dz}{(z-1)(\mu - bz)},$$

$$dt = \frac{dz}{-b(z-1)\left(z - \frac{\mu}{b}\right)},$$

$$-bdt = \frac{dz}{(z-1)\left(z - \frac{\mu}{b}\right)} = \frac{Adz}{z-1} + \frac{Bdz}{z - \frac{\mu}{b}}.$$

Коэффициенты $A$ и $B$ находим методом неопределенных коэффициентов

$$A = \left.\frac{1}{z - \frac{\mu}{b}}\right|_{z=1} = \frac{b}{b-\mu},$$

$$B = \left.\frac{1}{z-1}\right|_{z=\frac{\mu}{b}} = -\frac{b}{b-\mu}.$$

Следовательно,

$$-bdt = \frac{bdz}{(z-1)(b-\mu)} - \frac{bdz}{(b-\mu)\left(z - \frac{\mu}{b}\right)},$$

или

$$-(b-\mu)dt = \frac{dz}{z-1} - \frac{dz}{z - \frac{\mu}{b}}.$$

Интегрируя, получаем

$$-(b-\mu)t = \ln\frac{z-1}{z - \frac{\mu}{b}} - \ln C_1,$$

откуда получаем выражение для $C_1$

$$C_1 = e^{(b-\mu)t}\frac{z-1}{z - \frac{\mu}{b}}. \tag{4}$$

Второй интеграл найдем из уравнения

$$\frac{dz}{(z-1)(\mu-bz)} = \frac{dF(z,t)}{a(z-1)F(z,t)},$$

откуда получаем выражение

$$F(z,t) = C_2\left(z-\frac{\mu}{b}\right)^{-\frac{a}{b}}. \tag{5}$$

Подставляя выражение (4), общее решение уравнения (5) можно записать следующим образом

$$F(z,t) = \Phi\left(e^{(b-\mu)t}\frac{z-1}{z-\frac{\mu}{b}}\right)\left(z-\frac{\mu}{b}\right)^{-\frac{a}{b}}, \tag{6}$$

где $\Phi(x)$ – произвольная дифференцируемая функция. Учитывая начальные условия $F(z,0) = \sum_{i=0}^{\infty} z^i P_i(0) = 1$, имеем

$$1 = \Phi\left(\frac{z-1}{z-\frac{\mu}{b}}\right)\left(z-\frac{\mu}{b}\right)^{-\frac{a}{b}} = \Phi\left(1+\frac{\frac{\mu}{b}-1}{z-\frac{\mu}{b}}\right)\left(z-\frac{\mu}{b}\right)^{-\frac{a}{b}},$$

откуда

$$\Phi(x) = \left(\frac{\frac{\mu}{b}-1}{x-1}\right)^{\frac{a}{b}}.$$

Подставляя полученное выражение в (6), получаем вид производящей функции

$$F(z,t) = \left(\frac{\frac{\mu}{b}-1}{\left(e^{(b-\mu)t}\frac{z-1}{z-\frac{\mu}{b}}\right)-1}\right)^{\frac{a}{b}}\left(z-\frac{\mu}{b}\right)^{-\frac{a}{b}} = \tag{7}$$

$$= \frac{\left(\frac{\mu}{b}-1\right)^{\frac{a}{b}}}{\left((z-1)(e^{(b-\mu)t}-1)+\frac{\mu}{b}-1\right)^{\frac{a}{b}}}.$$

## 5. Математическое ожидание и дисперсия числа заявок в СМО

Используя свойства производящих функций, найдем математическое ожидание и дисперсию числа заявок в исследуемой СМО.

Имеем для математического ожидания

$$m_1(t) = \frac{\partial F(z,t)}{\partial t}\bigg|_{z=1},$$

$$\frac{\partial F(z,t)}{\partial t} = \frac{a(te^{b-\mu}-1)\left(\frac{\mu}{b}-1\right)^{\frac{a}{b}}}{b\left(\frac{\mu}{b}+(z-1)(te^{b-\mu}-1)-1\right)^{\frac{a}{b}+1}}.$$

При $z=1$ получим

$$m_1(t) = \frac{\partial F(z,t)}{\partial t}\bigg|_{z=1} = \frac{a(te^{b-\mu}-1)}{\mu-b}.$$

$$m_2(t) = \frac{\partial^2 F(z,t)}{\partial^2 t}\bigg|_{z=1} + m_1(t),$$

$$\frac{\partial^2 F(z,t)}{\partial^2 t} = \frac{a(te^{b-\mu}-1)^2\left(\frac{a}{b}+1\right)\left(\frac{\mu}{b}-1\right)^{\frac{a}{b}}}{b\left(\frac{\mu}{b}+(z-1)(te^{b-\mu}-1)-1\right)^{\frac{a}{b}+2}}.$$

При $z=1$ получим

$$\frac{\partial^2 F(z,t)}{\partial^2 t}\bigg|_{z=1} = \frac{a(te^{b-\mu}-1)^2\left(\frac{a}{b}+1\right)}{(\mu-b)^2},$$

$$m_2(t) = \frac{\partial^2 F(z,t)}{\partial^2 t}\bigg|_{z=1} + m_1(t) =$$

$$= \frac{a(te^{b-\mu}-1)^2\left(\frac{a}{b}+1\right) + a(te^{b-\mu}-1)(\mu-b)}{(\mu-b)^2}.$$

Дисперсия будет иметь вид

$$D = m_2(t) - m_1^2(t) = \frac{a(te^{b-\mu}-1)(bte^{b-\mu}+\mu-2b)}{(\mu-b)^2}.$$

## 6. Характеристики системы в стационарном режиме

Рассмотрим стационарный режим функционирования системы.

Выполняя предельный переход при $t \longrightarrow \infty$, получим

$$F(z) = \left( \frac{\frac{\mu}{b} - 1}{\frac{\mu}{b} - z} \right)^{\frac{a}{b}}. \tag{8}$$

Используя несложные математические преобразования, получим вид производящей функции $F(z)$

$$F(z) = \left( \frac{1 - \frac{b}{\mu}}{1 - z\frac{b}{\mu}} \right)^{\frac{a}{b}}. \tag{9}$$

Обозначим $\dfrac{b}{\mu} = \rho$, тогда (9) перепишем в виде

$$F(z) = \left( \frac{1 - \rho}{1 - z\rho} \right)^{\frac{a}{b}}. \tag{10}$$

Полученная производящая функция имеет вид производящей функции случайной величины, имеющей отрицательное биномиальное распределение с параметрами $\dfrac{a}{b}$, $1 - \dfrac{b}{\mu}$. Величина $1 - \dfrac{b}{\mu}$ принимает значения от 0 до 1, так как она имеет смысл вероятности. Отсюда следует, что $b < \mu$.

С помощью формулы (10) запишем выражения для математического ожидания и дисперсии числа занятых приборов в рассматриваемой системе.

Имеем для математического ожидания числа занятых приборов в системе

$$m_1 = \left. \frac{\partial F(z)}{\partial z} \right|_{z=1} = \frac{\frac{a}{b}\rho}{1 - \rho} = \frac{\frac{a}{\mu}}{1 - \frac{b}{\mu}}.$$

$$m_2(t) = \left. \frac{\partial^2 F(z,t)}{\partial^2 t} \right|_{z=1} + m_1(t) = \frac{\frac{a}{b}\rho\left(\frac{a}{b}\rho + 1\right)}{(1-\rho)^2}.$$

Дисперсия будет иметь вид

$$D = m_2(t) - m_1^2(t) = \frac{\frac{a}{b}\rho}{(1-\rho)^2} = \frac{\frac{a}{\mu}}{(1-\frac{b}{\mu})^2}.$$

## 7. Заключение

В настоящей статье рассмотрена система массового обслуживания, входящий поток которой является пуассоновским потоком с интенсивностью вида $\lambda(i(t)) = a + b \cdot i(t)$. Получены математическое ожидание и дисперсия числа заявок в рассматриваемой системе в стационарном режиме. Производящая функция рассматриваемого случайного процесса имеет вид производящей функции случайной величины, имеющей отрицательное биномиальное распределение с параметрами $\frac{a}{b}$, $1 - \frac{b}{\mu}$.

В дальнейшем планируется провести подобные исследования для случая $b < 0$, а также для систем с непуассоновскими входящими потоками и неэкспоненциальным обслуживанием, когда параметры входящего потока зависят от числа заявок, присутствующих в системе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коротаев И. А., Спивак Л. Р., Системы массового обслуживания в полумарковской случайной среде // Автомат. и телемех. 1992. Выпуск 7. С. 86–92.
2. Зиновьева Л. И., Терпугов А. Ф., Однолинейная система массового обслуживания с переменной интенсивностью, зависящей от времени ожидания // Автомат. и телемех. 1981. № 1. С. 27–30.
3. Таташев А. Г., Система массового обслуживания с переменной интенсивностью входного потока // Автомат. и телемех. 1995. Выпуск 12. С. 78–84.
4. Бондрова О.В. Анализ характеристик незавершенной работы в стационарной СМО с бесконечным накопителем и скачкообразной интенсивностью входного потока // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2015. № 2. С. 76–91.
5. Головко Н. И., Коротаев И. А. Система массового обслуживания со случайно изменяющейся интенсивностью входного потока // Автоматика и телемеханика. 1990. № 7. С. 80–85.

*Научное электронное издание*
Номер госрегистрации 0322002892 в НТЦ «Информрегистр».

# Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2020)

МАТЕРИАЛЫ XXIII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(14–18 СЕНТЯБРЯ 2020 г., МОСКВА)

*Под общей редакцией д.т.н. В.М. Вишневского, д.т.н. К.Е. Самуйлова*

Составитель: к.ф.-м.н. Козырев Дмитрий Владимирович

Локальное электронное издание
Номер госрегистрации 0322002892 в НТЦ «Информрегистр»
Мин. системные требования:
Pentium 4, Internet Explorer, Acrobat reader 4.0 и выше

Дата подписания к использованию: 01.09.2020
1 электронно-оптический диск (CD-R), 44,9 Мб, Тираж 210 экз.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
**Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова**
Российской академии наук
117997, Россия, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65
www.ipu.ru