

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ

**Житенёв Сергей Александрович**,  
ведущий инженер акционерного общества  
«Концерн «Созвездие»,  
г. Воронеж, Россия,  
szhitenev@yandex.ru

**Хорин Юрий Алексеевич**,  
ведущий инженер акционерного общества  
«Концерн «Созвездие»,  
г. Воронеж, Россия,  
horvdvart@mail.ru

**Ерыгин Александр Александрович**,  
к.т.н., начальник сектора акционерного общества  
«Концерн «Созвездие»,  
г. Воронеж, Россия,  
erygin@sozvezdie.su

**Голубинский Андрей Николаевич**,  
д.т.н., доцент, начальник отдела акционерного общества  
«Концерн «Созвездие»,  
г. Воронеж, Россия,  
annikgol@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

Разработана модель и методика исследования контуров управления, предназначенные для оценки вероятностно-временных характеристик контуров управления в объеме средних значений и средне-квадратических отклонений времени выполнения контуров управления, а также вероятностей завершения контуров управления за заданное время.

**Ключевые слова:** инфокоммуникационная система; контур управления; информационные процессы; стохастические сетевые модели; процесс.

### Введение

В настоящее время инфокоммуникационные системы (ИКС) активно создаются и внедряются в системы управления сложными организационно-техническими объектами, являясь одним из основных факторов обеспечивающих общую цель автоматизации управления – повышение эффективности использования возможностей объекта управления, за счет сокращения времени и повышения качества выполнения задач должностными лицами (ДЛ) в контуре управления. При этом под контуром управления будем понимать комплекс взаимосвязанных задач управления, решаемых ДЛ в ходе реализации своих должностных обязанностей, в системе управления и объединенных общей целью управления.

Как известно, при создании сложных организационно-технических систем слабо формализованными этапами, не смотря на их важность, являются ранние этапы проектирования – эскизный и технический проекты. Практика показывает, что от качества системотехнических решений, принятых на данных этапах, в основном определяется успех и качество всего процесса создания системы. В противном случае, когда недостатки своевременно не вскрыты, их выявление и устранение на завершающих этапах приводит к большим экономическим затратам на доработку [1]. Кроме того, проблемными по организационным и экономическим причинам остаются вопросы испытаний и оценки качества функционирования сложных организационно-технических систем при их системной интеграции из составных частей.

Таким образом, описанные положения свидетельствуют об актуальности разработки модели и методики моделирования контуров управления в интересах отработки на ранних этапах проектирования системотехнических решений по построению ИКС, а также для проведения полунатурных испытаний (с моделями «подыгрыша») ИКС, обеспечивающих функционирование контуров управления, на соответствие предъявляемым требованиям.

Целью работы является разработка математической модели и методического аппарата для исследования контуров управления на основе информационных процессов, протекающих в ИКС для повышения эффективности контуров управления.

Контур управления можно описать с помощью сетевой модели, которая является логико-математической моделью процесса выполнения комплекса взаимосвязанных задач управления, позволяющей определить параметры процесса исходя из учета параметров отдельных задач и их взаимосвязей. При этом процесс управления сложными организационно-техническими объектами, как правило, имеет стохастический характер [2]. Адекватное отображение стохастического процесса возможно при помощи стохастической сетевой модели, имеющей допущение в качестве дисциплины возникновения события, помимо стандартной логической операции типа «И», при которой событие наступает после выполнения всех дуг, входящих в соответствующую данному событию вершину, альтернативной логической операции типа «ИЛИ», которой соответствует наступлению события в результате выполнения первой (по времени) из входящих в нее дуг [3, 4].

В контуре управления рассматриваются два основных типа задач управления:

- задачи, связанные обработкой и преобразованием информации ДЛ;
- задачи, связанные с доведением информации до ДЛ при помощи ИКС.

Время выполнения задач управления сетевой модели является случайной величиной. Предполагается, что случайные величины времени выполнения задач управления подчинены принятому для данного контура управления закону распределения, причем тип распределения принимается одинаковым для всех задач. Параметры распределения задаются для каждой задачи управления их ответственными исполнителями на основе либо нормативных данных, либо априорных соображений из своего управленческого опыта, либо математической модели.

При этом моменты случайного времени (математическое ожидание – МО) и среднеквадратическое отклонение – СКО) необходимого для выполнения каждой задачи управления выбираются на основе вероятностного распределения и ставятся в соответствие дуге в сетевой модели.

В контурах управления в качестве исходных данных для времени выполнения задач управления, как правило, используются всего два параметра: минимально возможное время выполнения задачи  $T_{\min}$  (оптимистическое время), максимально возможное время выполнения задачи  $T_{\max}$  (пессимистическое время). Если отсутствует априорная информация о случайной величине времени выполнения задачи управления, то будем рассматривать, в качестве распределения с данными параметрами, равномерное распределение на интервале  $[T_{\min}, T_{\max}]$ .

Таким образом, будем считать, что контур управления состоит из  $M$  действительных задач управления, для каждой из которых задаются две оценки  $T_{\min k}, T_{\max k}, k = \overline{1, M}$ . Причем для задач, связанных с доведением информации до ДЛ при помощи ИКС, оценки могут быть получены, на основе математического моделирования информационных процессов, протекающих в ИКС [5]. Тогда МО и СКО времени выполнения  $k$ -й задачи вычисляются по следующим формулам:

$$m_k = \frac{T_{\min k} + T_{\max k}}{2}; \sigma_k = \sqrt{\frac{T_{\max k} - T_{\min k}}{12}}, k = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $M$  – общее количество задач управления;  $T_{\min k}$ ,  $T_{\max k}$  – минимально и максимально возможное время выполнения  $k$ -й задачи управления;  $m_k$ ,  $\sigma_k$  – МО и СКО времени выполнения  $k$ -й задачи управления.

Вычисление моментов распределения времени выполнения  $t_i$  для всех типов вершин стохастической сети рекуррентно (в порядке правильной нумерации) с помощью следующих формул (все величины рассматриваются как случайные):

- для вершин, реализующих на входе логическую операцию типа «И»:

$$t_i = F \left[ \max_{j=1, m} t_j + T_j \right]; \quad (2)$$

- для вершин, реализующих на входе логическую операцию типа «ИЛИ»:

$$t_i = F \left[ \min_{j=1, m} t_j + T_j \right], \quad (3)$$

где  $F$  – оператор вычисления соответствующего момента;  $t_i$  – время выполнения события, связанного с вершиной  $v_i$ ;  $t_j$  – время выполнения события, связанного с вершиной  $v_j$ , предшествующей вершине  $v_i$ ;  $T_j$  – время выполнения задачи управления, соответствующей дуге  $e_j$ .

В случае, когда процессы управления характеризуются большой сложностью структуры и состава задач (содержат до нескольких десятков задач); разброс значений параметров задач невелик (диапазон изменений незначителен), или, иными словами, уровень неопределенности случайных величин времени выполнения задач близок к детерминированному и данные случайные величины независимы друг от друга, можно предполагать, что длительности переходов в  $r$ -ю вершину распределены по нормальному закону. Тогда МО и дисперсии переходов в вершину определяются по следующим выражениям:

- для вершин, реализующих на входе логическую операцию типа «И» [6, 7]:

$$\begin{aligned} m_r &= m_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j = m_i \cdot \Phi \alpha_{i,j} + m_j \cdot \Phi -\alpha_{i,j} + \beta_{i,j}; \\ \sigma_r^2 &= D_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j = m_i^2 + \sigma_i^2 \cdot \Phi \alpha_{i,j} + m_j^2 + \sigma_j^2 \cdot \Phi -\alpha_{i,j} + m_i + m_j \cdot \beta_{i,j} - m_r^2; \\ \alpha_{i,j} &= \alpha m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j = \frac{m_i - m_j}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\sigma_i\sigma_j\rho_{ij}}}; \rho_{ij} = \rho(x_i, x_j); \\ \beta_{i,j} &= \beta(m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j) = \sqrt{\frac{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}{2\pi}} \exp\left(-\frac{\alpha_{i,j}^2}{2}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m_r$ ,  $\sigma_r$  – МО и СКО длительности перехода в  $r$ -ю вершину;  $m_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j$ ,  $D_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j$  – оператор для вычисления соответственно МО и дисперсии максимальной из двух случайных величин с МО  $m_i, m_j$  и СКО  $\sigma_i, \sigma_j$  соответственно;  $m_{i(j)}$ ,  $\sigma_{i(j)}$  – МО и СКО длительности перехода по  $i(j)$ -й дуге, входящей в  $r$ -ю вершину;  $\rho(x_i, x_j)$  – коэффициент корреляции

ции между длинами путей, ведущих к  $r$ -й вершине;  $\Phi x = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$  – функция Лапласа;

- для вершин, реализующих на входе логическую операцию типа «ИЛИ»:

$$\begin{aligned} m_r &= m_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j = m_i \cdot \Phi(-\alpha_{i,j}) + m_j \cdot \Phi(\alpha_{i,j}) - \beta_{i,j}; \\ \sigma_r^2 &= D_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j = m_i^2 + \sigma_i^2 \cdot \Phi(-\alpha_{i,j}) + m_j^2 + \sigma_j^2 \cdot \Phi(\alpha_{i,j}) - m_i + m_j \cdot \beta_{i,j} - m_r^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j$ ,  $D_{\max} m_i, m_j, \sigma_i, \sigma_j$  – оператор для вычисления соответственно МО и дисперсии минимальной из двух случайных величин с МО  $m_i, m_j$  и СКО  $\sigma_i, \sigma_j$  соответственно.

Моменты распределения длительности переходов в вершины, реализующие на входе логическую операцию типа «И» и «ИЛИ», в случаях нескольких (более двух) входящих дуг вычисляются рекуррентно [2] с помощью выше приведенных формул (4), (5) соответственно.

С использованных описанных выражений осуществляется эквивалентное преобразование стохастической сети для получения МО и СКО плотностей распределения времени перехода процесса из исходного состояния в заданное [8].

Будем полагать, что для контура управления в целом вид результирующего закона распределения является нормальным в силу выполнения центральной предельной теоремы. Вероятность того, что контур управления будет осуществлен за время  $T_{KV}$  не более допустимого времени  $T_{\text{зад}}$ , вычисляется по следующей формуле:

$$P(T_{KV} < T_{\text{зад}}) = \Phi\left(\frac{T_{\text{зад}} - m_{T_{KV}}}{\sigma_{T_{KV}}}\right), \quad (6)$$

где  $m_{T_{KV}}$ ,  $\sigma_{T_{KV}}$  – МО и СКО случайного времени выполнения контура управления  $T_{KV}$ ;  $T_{\text{зад}}$  – заданное время выполнения контура управления.

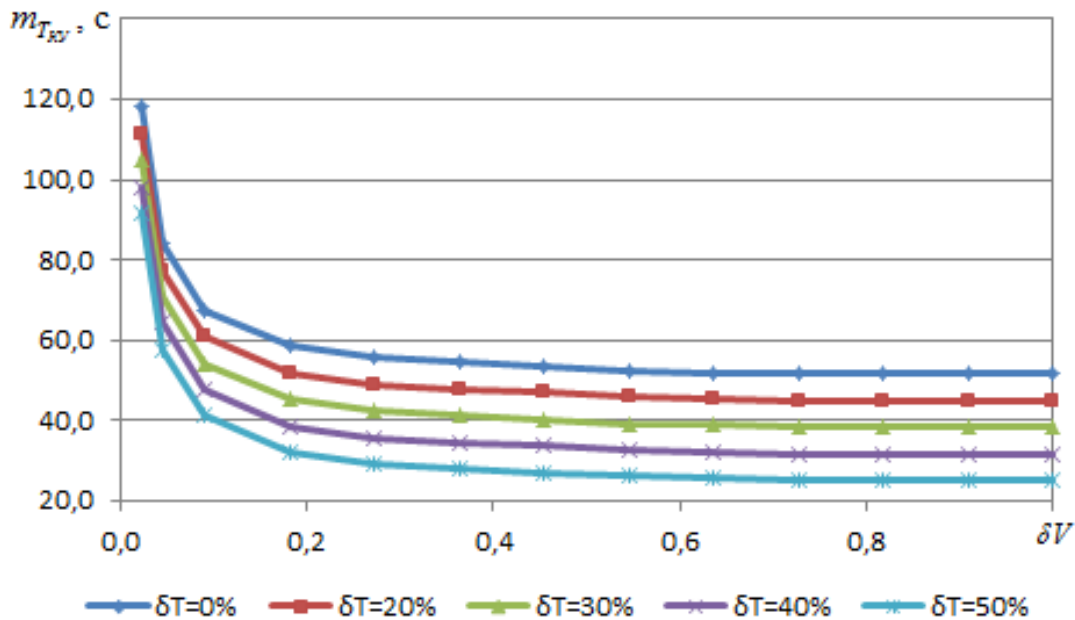
В качестве основного показателя эффективности процесса управления будем рассматривать относительное снижение среднего времени выполнения контура управления  $m_{T_{KV}}$ :

$$\delta m_{T_{KV}} = \frac{|m_{T_{KV}}' - m_{T_{KV}}|}{m_{T_{KV}}}, \quad (7)$$

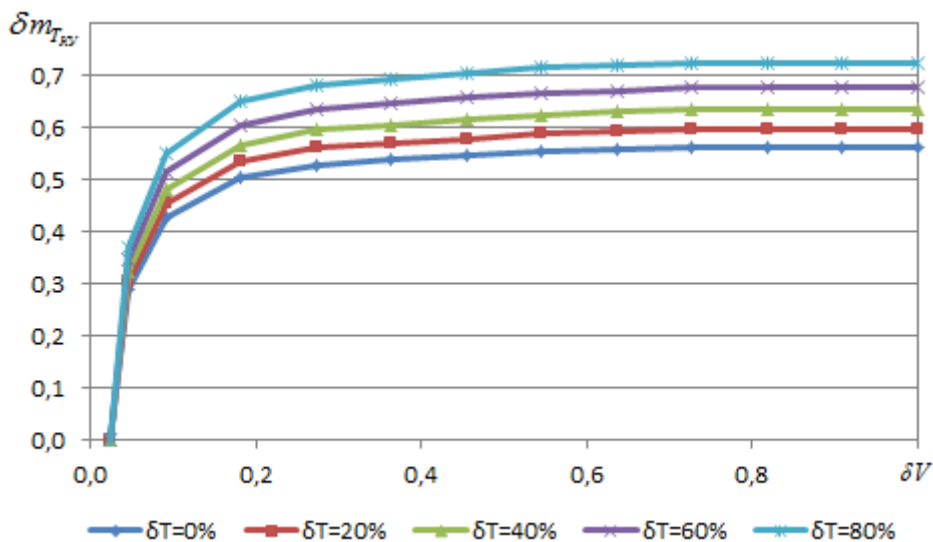
где  $m_{T_{KV}}$  – значение среднего времени выполнения контура управления;  $m_{T_{KV}}'$  – значение среднего времени выполнения контура управления при применении в контуре управления перспективной ИКС.

В соответствии с выражениями (2) – (5) построены графики зависимости снижения среднего времени выполнения контура управления  $\delta m_{T_{KV}}$  применительно к случаю непланового конфликтного взаимодействия сторон от относительного увеличения информационной скорости передачи данных в ИКС  $\delta V$  при значений относительного сокращения времени решения задач управления, связанных обработкой и преобразованием информации ДЛ  $\delta T$ , которые приведены на рис. 1.

В соответствии с выражениями (7) построены графики зависимости основного показателя эффективности процесса управления, которые приведены на рис. 2.



**Рис. 1.** Зависимость снижения среднего времени выполнения контура управления  $m_{T_{kv}}$  применительно к случаю непланового конфликтного взаимодействия сторон от относительного увеличения информационной скорости передачи данных в ИКС  $\delta V$  при значений относительного сокращения времени решения задач управления, связанных обработкой и преобразованием информации ДЛ  $\delta T$ .



**Рис. 2.** Зависимость относительного снижения среднего времени выполнения контура управления  $\delta m_{T_{kv}}$  применительно к случаю непланового конфликтного взаимодействия сторон от относительного увеличения информационной скорости передачи данных в ИКС  $\delta V$  при значений относительного сокращения времени решения задач управления, связанных обработкой и преобразованием информации ДЛ  $\delta T$ .

Таким образом, разработанная методика позволяет на основе метода стохастического сетевого моделирования оценить вероятностно-временные характеристики контуров управления. Полученные результаты могут служить основой для проведения испытаний (в том числе, полунатурных), а также для отработки системотехнических решений по построению ИКС.

С использованием стохастических сетевых моделей разработана методика для исследования контуров управления на основе информационных процессов, протекающих в ИКС. Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении информационной скорости передачи данных в ИКС происходит снижение времени выполнения контура управления, однако существует практический порог, ниже которого улучшать вероятностно-временные характеристики контуров управления за счет внедрения перспективных ИКС нецелесообразно.

Дальнейшим направлением улучшения вероятностно-временных характеристик контуров управления является оптимизация порядка работы (действий) ДЛ на основе новых возможностей, предоставляемых при внедрении перспективных ИКС. Реализация данного направления позволит обеспечить на принципиально новом качественном уровне улучшение вероятностно-временных характеристик контуров управления.

#### Литература

1. Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия / под ред. В.В. Бакаева. М.: Машиностроение – 1, 2005. 624 с.
2. *Голенко-Гинзбург Д.И.* Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками. Воронеж: Научная книга, 2010. 284 с.
3. *Филлипс Д., Гарсиа-Диас А.* Методы анализа сетей. М.: Мир, 1984. 496 с.
4. *Иванов Н.Н.* Аналитико-имитационное моделирование обобщенных стохастических сетевых графиков // Управление большими системами. №. 53. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 27 – 44.
5. *Ерыгин А.А., Житенёв С.А., Васильев А.И., Мельников М.С.* Специальное программное обеспечение системы моделирующей ИУС: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 29.10.2014 № 2014661396. М.: ФИПС, 2014.
6. *Clark C.E.* The greatest of the finite set of random variables. Opns. Res. 13(1). Pp. 214-218. 1965.
7. *Clark C.E.*, The PERT model for the distribution of an activity. Opns. Res. 10(3). Pp. 405-406. 1962.
8. *Рудоманов В.И., Кузьмин В.П.* Эквивалентные преобразования стохастических графов // Труды Иркутского городского семинара по прикладной математике. №. 3. 1971.

## MATHEMATICAL MODELING FOR INFORMATIONAL PROCESSES OF THE INFOCOMMUNICATION SYSTEM TO INCREASE CONTROL LOOP EFFECTIVENESS

**Sergey A. Zhitenyov,**  
Voronezh, Russia,  
szhitenev@yandex.ru

**Yurij A. Horin,**  
Voronezh, Russia,  
horvdvart@mail.ru

**Aleksandr A. Erygin,**  
Voronezh, Russia,  
erygin@sozvezdie.su

**Andrej N. Golubinsky,**  
Voronezh, Russia,  
annikgol@mail.ru

### ABSTRACT

In the paper the model and the methodological guidance for military control loop researching were development. The probability-time control loop characteristics evaluation is based on mean and standard deviation of control loop duration and the probability of control loop duration not being exceeded.

**Keywords:** infocommunications; control loop; informational processes; stochastic network model; standart deviation; process.

### References

1. *Informacionnoe obespechenie, podderzhka i soprovozhdenie zhiznennogo cikla izdeliya* [Information support, support and maintenance of life cycle of a product]. Moscow: Mashinostroenie – 1, 2005. 624 p. (In Russian)
2. Golenko-Ginzburg D.I. *Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami* [Stokhastichesky network models of planning and management of developments]. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010. 284 p. (In Russian)
3. Fillips D., Garsia-Dias A. *Methods of the analysis of networks*. Moscow: Mir, 1984. 496 p. (In Russian)
4. Ivanov N.N. Analitiko-imitacionnoe modelirovanie obobshchennyh stokhasticheskikh setevykh grafikov [Analitiko-imitatsionnoye modeling of the generalized stochastic network schedules]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of big systems]. Moscow: IPU RAN, No. 53. 2015. Pp. 27 – 44. (In Russian)
5. Erygin A.A., ZHitenyov S.A., Vasil'ev A.I., Mel'nikov M.S. Special'noe programmnoe obespechenie sistemy modeliruyushchej IUS: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM ot 29.10.2014 № 2014661396. M.: FIPS, 2014. (In Russian)
6. Clark C.E. The greatest of the finite set of random variables. *Opns. Res.* 13(1). Pp. 214-218. 1965. (In Russian)
7. Clark C.E. The PERT model for the distribution of an activity. *Opns. Res.* 10(3). Pp. 405-406. 1962. (In Russian)
8. Rudomanov V.I., Kuz'min V.P. EKhvivalentnye preobrazovaniya stokhasticheskikh grafov [Equivalent transformations stochastic column]. *Trudy Irkutskogo gorodskogo seminaru po prikladnoj matematike* [Works of the Irkutsk city seminar on applied mathematics]. 1971. No. 3. (In Russian)

### Information about authors:

Zhitenyov S.A., Lead engineer, Joint Stock Company «Concern «Sozvezdie».  
Horin Yu.A., Lead engineer, Joint Stock Company «Concern «Sozvezdie».  
Erygin A.A., PhD, head of sector, Joint Stock Company «Concern «Sozvezdie».  
Golubinsky A.N., PhD, Docent, head of department, Joint Stock Company «Concern «Sozvezdie».