

ISSN 1816-0301 (print)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ*INTELLIGENT SYSTEMS*

УДК 621.397.1

Поступила в редакцию 22.02.2018

Received 22.02.2018

С. В. Кругликов¹, А. Р. Бекиш²

¹*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*
²*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

**ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ГРУППОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ АСУ**

Аннотация. Предлагается формализованная модель деятельности коллектива операторов автоматизированной системы управления, разработанная на основе применения агрегативного подхода Н. П. Бусленко в виде четырехуровневой агрегативной системы, включающей агрегаты функциональных блоков, задач, операторов, коллектива операторов. В зависимости от характера решаемых задач предлагается использовать модели трех уровней: групповой, индивидуальной деятельности и модель деятельности, учитывающую эргономические факторы. Приводятся обобщенные структурные схемы всех уровней, а также основные требования и принципы функционирования блоков, входящих в модели соответствующих уровней.

Ключевые слова: агрегат, математическая модель, имитационная модель, оператор, групповая деятельность, индивидуальная деятельность

Для цитирования. Кругликов, С. В. Обобщенная структура имитационной модели групповой деятельности операторов АСУ / С. В. Кругликов, А. Р. Бекиш // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 83–97.

S. V. Kruglikov¹, A. R. Bekish²

¹*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*
²*The Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus*

**GENERALIZED STRUCTURE OF THE SIMULATION MODEL
OF THE GROUP ACTIVITY OF ACS OPERATORS**

Abstract. A formalized model of the activity of the collective of operators of an automated control system is developed, developed on the basis of the application of Buloshenko's aggregative approach in the form of a four-level aggregative system that includes aggregates of functional blocks, tasks, operators, and the collective of operators. Depending on the nature of the tasks being solved, it is proposed to use models of three levels: group, individual activity and an activity model that takes ergonomic factors into account. Generalized structural diagrams of all levels are presented, as well as the basic requirements and principles of the functioning of the blocks included in the model of the corresponding levels.

Keywords: aggregate, mathematical model, imitation model, operator, group activity, individual activity

For citation. Kruglikov S. V., Bekish A. R. Generalized structure of the simulation model of the group activity of ACS operators. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 83–97.

Введение. Анализ применения многоуровневых автоматизированных систем управления (АСУ) свидетельствует о том, что комплексное решение задач проектирования групповой и индивидуальной деятельности операторов основной и дежурных смен АСУ возможно лишь в том случае, если в основе моделирующих систем лежит единая математическая схема моделирования, способная описывать поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем [1–4]. Математическая схема представляет собой звено при переходе от содер-

жательного к формальному описанию процесса функционирования сложной системы с учетом воздействия внешней среды, т. е. имеет место цепочка «описательная модель – математическая схема – математическая модель» [5]. Введение понятия математической схемы позволяет рассматривать математику не как метод расчета, а как метод мышления, как средство формулирования понятий, что является важным при переходе от словесного описания системы к формальному представлению процесса ее функционирования в виде математической модели.

Представленный подход к формализации процесса функционирования сложной системы «человек – машина» основывается на агрегатной модели Н. П. Бусленко [6, 7], и в нем используется соответствующая терминология. При агрегатном описании сложная система разбивается на подсистемы, сохраняя при этом связи, обеспечивающие их взаимодействие. Если система оказывается сложной, то процесс расчленения продолжается до тех пор, пока не образуются подсистемы, которые в условиях рассматриваемой задачи могут считаться удобными для математического описания. Абстрактное описание модели деятельности коллектива операторов с использованием универсальной математической схемы агрегата (А-схемы) позволит обоснованно разработать обобщенную структурную схему имитационной модели.

Формализация деятельности операторов при разработке имитационной модели. Для формализации групповой деятельности операторов используем универсальный подход, сочетающий в себе комплексное применение методов декомпозиции и агрегирования [6]. Декомпозиция деятельности коллектива операторов в соответствии с принципами универсальности, иерархичности и микромоделирования позволяет выделить такие уровни модели, как типовые функциональные блоки, задачи, отдельные операторы и коллектив операторов.

В силу своей специфики каждый из уровней модели описывается разнородными математическими схемами. Для соблюдения принципов конструктивности и универсальности описания модели при ее реализации необходима унифицированная абстрактная схема, позволяющая единообразно описывать все уровни модели. В качестве такой абстрактной схемы используем агрегативный подход, развитый в работах [6, 7].

Под агрегатом понимается объект, определяемый множествами моментов времени $t \in T$, входных сигналов $x \in X$, управляющих сигналов $g \in G$, выходных сигналов $y \in Y$, состояний $z \in Z$ и конструктивных параметров агрегата $b \in B$, а также случайными операторами переходов в новое состояние H и выходов G , реализующих функции $z(t)$ и $y(t)$, структура которых описана в [7].

Оператор выходов G представляется в виде совокупности операторов G' (вырабатывает очередные моменты выдачи выходных сигналов) и G'' (формирует содержание сигналов). В пространстве состояний агрегата для каждого значения $g \in G$, $b \in B$ задается некоторое множество $Z^Y(g, \beta)$, которое определяет момент выдачи непустого выходного сигнала

$$y = G''[t, x(t), z(t), g(t), b].$$

Оператор G' вырабатывает очередной момент времени выдачи выходного сигнала, определяемый по достижении траекторией $z(t)$ подмножества $Z^Y(g, \beta)$:

$$y = G'[t, z(t), g(t), b].$$

Состояния агрегата $z(t)$ для произвольного момента времени $t > t_0$ рассчитываются по предыдущим состояниям $z(t_0)$ случайным оператором переходов

$$z(t) = H[z(t_0), t].$$

Наряду с состоянием агрегата $z(t)$ будем рассматривать также состояние $z(t_j+0)$, в которое агрегат переходит за «малый» интервал времени. Вид оператора H зависит от того, поступают или не поступают в течение рассматриваемого интервала времени входные и управляющие сигналы. Поэтому он представляется в виде совокупности операторов V' , V'' и U :

$$z(t_j+0) = V' [t, z(t_j), g(t_j), x, b],$$

$$z(t_j+0) = V'' [t, z(t_j), g, b],$$

$$z(t) = U [t, t_j, z(t_j+0), g(t_j), b].$$

Специфика построения модели операторской деятельности такова, что модель нижнего уровня входит в модель более высокого уровня. Для конкретизации агрегативного подхода применительно к решаемой задаче введем понятие «вложенного агрегата».

Будем считать, что агрегат нижнего уровня вложен в агрегат верхнего уровня, если соблюдаются следующие условия:

- агрегат верхнего уровня представляет собой множество связанных между собой агрегатов нижнего уровня;
- множество входных сигналов агрегатов нижнего уровня полностью описывается множеством входных сигналов агрегата верхнего уровня;
- множество выходных сигналов агрегата верхнего уровня полностью описывается множеством выходных сигналов агрегатов нижнего уровня.

Таким образом, модель операторской деятельности представляет собой четырехуровневую агрегативную систему (рис. 1), включающую агрегаты первого уровня (функциональные блоки, $a_{11}, \dots, a_{1k} \in A_1$), второго уровня (задачи, $a_{21}, \dots, a_{2l} \in A_2$), третьего уровня (операторы, $a_{31}, \dots, a_{3m} \in A_3$) и четвертого уровня (коллектив операторов, $a_{41} \in A_4$).

Дадим формализованное описание отдельных уровней модели в терминах агрегативного подхода.

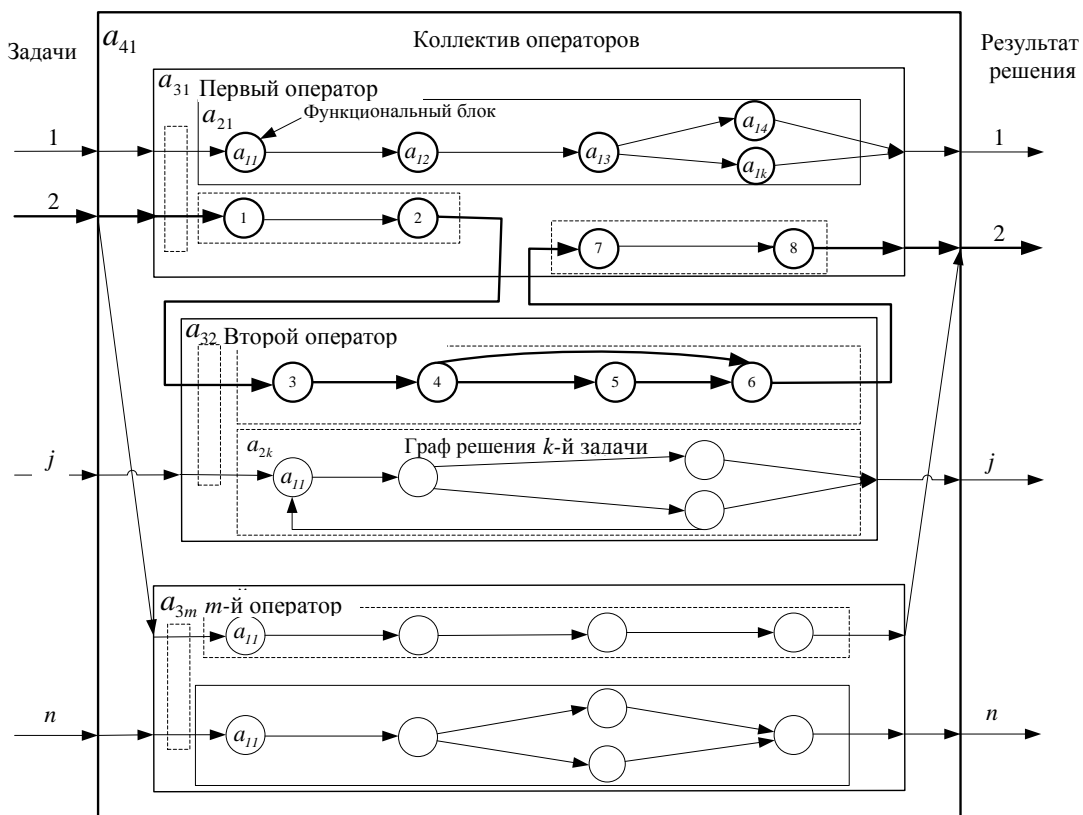


Рис. 1. Представление имитационной модели групповой деятельности операторов в виде четырехуровневой агрегативной системы

Агрегаты первого уровня (функциональные блоки). Агрегат первого уровня представляет собой вероятностный автомат, осуществляющий задержку входных сигналов и их преобразование. Множества входных и выходных сигналов принимают два значения: «0» или «1». Агрегат описывается такими параметрами, как время задержки входного сигнала t_{11} и ошибка преобразования β_{12} с законами распределения $z_{11}(t)$ и $z_{12}(\beta)$ соответственно, числовые характеристики которых определяются по эргономическим справочникам либо экспериментальным путем.

Также в параметрах агрегата может учитываться влияние двух групп факторов: характеристик оператора (уровня обученности, усталости, напряженности деятельности и т. д.) и параметров автоматизированного рабочего места (средств отображения и органов управления).

Если представить отдельные функциональные блоки вершинами некоторого графа, а очередность их следования дугами, соединяющими вершины, то получим наиболее обобщенную математическую модель алгоритма решения задачи в виде вероятностного графа. Основные этапы формирования вероятностного графа алгоритма решения задачи описаны в [8], поэтому здесь остановимся лишь на описании задачи в терминах агрегативного подхода.

Агрегаты второго уровня (задачи). Множества входных и выходных сигналов агрегата второго уровня принимают значения «0» (задача не возникла в процессе деятельности) либо «1» (задача возникла). Агрегат второго уровня полностью описывается множеством функциональных блоков и матрицей переходных вероятностей, указывающей порядок выполнения функциональных блоков.

Как и агрегат первого уровня, агрегат второго уровня реализует задержку и преобразование входного сигнала. При этом время и вероятность безошибочного преобразования входного сигнала агрегатом второго уровня a_{2l} при его прохождении через функциональные блоки a_{1k} (для случая независимых преобразований) определяются выражениями

$$t_{21}^{(a_{2l})} = \sum_{a_{1k} \in a_{2l}} t_{11}^{(a_{1k})}, \quad \beta_{22}^{(a_{2l})} = \prod_{a_{1k} \in a_{2l}} \beta_{12}^{(a_{1k})}.$$

Агрегаты третьего уровня (операторы). Для формального описания воспользуемся интерпретацией оператора одноканальной приоритетной системой массового обслуживания с отказами [9].

В случайные моменты времени t_j в систему поступают заявки, характеризующиеся случайным параметром α_j . Если система свободна, заявка немедленно принимается к обслуживанию. В противном случае она становится в очередь с допустимым временем ожидания $\gamma_j = s(\alpha_j, \beta)$, где β – параметр системы. Заявка покидает систему, если не будет принята к обслуживанию до момента $t_j + \gamma_j$. Далее к обслуживанию принимается другая заявка. Время занятости канала $\eta_j = \psi(\alpha_j, \beta)$.

Состояние агрегата описывается следующими фазовыми координатами: $z_1(t)$ – время, оставшееся до окончания обслуживания заявки, которая находится на обслуживании; $z_2(t)$ – число заявок в системе (в очереди на обслуживании).

Если $z_2(t) = 0$ (заявок нет), то $z_1(t) = 0$ для всех t от момента окончания обслуживания до момента поступления новой заявки. При $z_2(t) > 0$ заявки имеются на обслуживании в очереди. Вводятся новые координаты состояния: $z_{1+2k}(t) = \alpha'_k$ ($k = 1, 2, \dots, z_2(t) - 1$), где α'_k – параметр k -й заявки в очереди; $z_{2+2k}(t)$ – оставшееся время ожидания в очереди для k -й заявки. Заявки поступают в агрегат в момент t_j и имеют значения $x_j = \alpha_j$.

Получим операторы переходов и выходов агрегата.

Пусть в момент времени t_j поступает новая заявка. Если $z_2(t_j) > 0$, заявка поступает в очередь: $z_1(t)$ не меняется; $z_2(t)$ увеличивается на единицу; $z_{1+2k}(t)$ и $z_{2+2k}(t)$ не изменяются; возникают новые координаты $z_{1+2z_2}(t_j) = \alpha_j$ и $z_{2+2z_2}(t_j) = s(\alpha_j, \beta)$, характеризующие поступившую z_2 -ю заявку. Если в момент времени t_j канал свободен и заявок в очереди нет, то заявка принимается к обслуживанию, т. е. $z_1(t_j) = \psi(\alpha_j, \beta)$, $z_2(t_j) = 1$.

Таким образом, оператор перехода V' имеет вид

$$\left. \begin{aligned} z_1(t_j + 0) &= z_1(t_j), \\ z_2(t_j + 0) &= z_2(t_j) + 1, \\ z_{1+2k}(t_j + 0) &= z_{1+2k}(t_j) \\ z_{2+2k}(t_j + 0) &= z_{2+2k}(t_j) \end{aligned} \right\} k < z_2(t_j), \left. \begin{aligned} & \\ & \\ & \end{aligned} \right\} z_2(t_j) > 0;$$

$$\left. \begin{aligned} z_1(t_j + 0) &= \psi(\alpha_j, \beta), \\ z_2(t_j + 0) &= 1, \\ z_{1+2k}(t_j + 0) & \\ z_{2+2k}(t_j + 0) & \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} & \\ & \\ & \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \\ & \\ & \end{aligned} \left. \begin{aligned} & \\ & \\ & \end{aligned} \right\} z_2(t_j) = 0.$$

Опишем теперь множество состояний агрегата $Z^Y(g, \beta)$ и оператор выхода G . Множество $Z^Y(g, \beta)$ представим в виде объединения подмножеств Z_1^Y (определяется соотношением $z_1(t) = 0$) и Z_2^Y (определяется соотношением $z_{2+2k}(t) = 0$ хотя бы для одного k).

Под выходным сигналом будем понимать совокупность характеристик заявки, покидающей систему. Пусть $y = (y^{(1)}, y^{(2)})$, где признак $y^{(1)} = 1$, если систему покидает обслуженная заявка, или $y^{(1)} = 0$, если систему покидает необслуженная заявка, а $y^{(2)} = (\alpha_j, \beta, t^*)$ – совокупность сведений о заявке (заявка поступила в систему с характеристикой α_j , обслуживалась при значении параметра системы β , покинула систему в момент t^*). Действие оператора выхода G сводится к выбору признака $y^{(1)}$ и формированию сведений о заявке $y^{(2)}$.

Пусть обслуживание очередной заявки закончилось, т. е. в момент t_1^* состояние агрегата достигает подмножества Z_1^Y . В момент t_1^* , определяемый из соотношения $z_1(t_1^*) = 0$, агрегат формирует выходной сигнал $y = (1, \alpha_j, \beta, t_1^*)$. Пусть далее заявка покидает систему необслуженной, так как истекло время ее ожидания. В момент t_2^* , определяемый из соотношения $z_{2+2k}(t_2^*) = 0$, состояние агрегата достигает подмножества Z_2^Y , а величина $y = (0, \alpha_j, \beta, t_2^*)$.

Перейдем к оператору U . Для упрощения записи оператор удобно представить в виде совокупности операторов W' , W'' и \bar{U} .

Пусть $t = t_1^*$ (обслуживание очередной заявки окончено). Если в системе имеются заявки, к обслуживанию принимается следующая заявка в очереди. Если же в системе заявок нет, система ждет до момента поступления новой заявки и принимает ее к обслуживанию (этот случай рассмотрен выше при описании оператора V' при условии $z_2(t_j) = 0$). Определим состояния агрегата в полуинтервале от момента окончания обслуживания до момента поступления новой заявки.

Состояния агрегата $z(t_1^* + 0)$ определяются оператором W' :

$$\left. \begin{aligned} z_1(t_1^* + 0) &= \psi(z_3, \beta), \\ z_2(t_1^* + 0) &= z_2(t_1^*) - 1, \\ z_{1+2k}(t_1^* + 0) &= z_{1+2(k+1)}(t_1^*) \\ z_{2+2k}(t_1^* + 0) &= z_{2+2(k+1)}(t_1^*) \end{aligned} \right\} 1 \leq k < z_2(t_1^*) \left. \vphantom{\begin{aligned} z_1(t_1^* + 0) &= \psi(z_3, \beta), \\ z_2(t_1^* + 0) &= z_2(t_1^*) - 1, \\ z_{1+2k}(t_1^* + 0) &= z_{1+2(k+1)}(t_1^*) \\ z_{2+2k}(t_1^* + 0) &= z_{2+2(k+1)}(t_1^*) \end{aligned}} \right\} z_2(t_1^*) > 0;$$

$$\left. \begin{aligned} z_1(t_1^* + 0) &= z_1(t_1^*) = 0, \\ z_2(t_1^* + 0) &= 0, \\ z_{1+2z_2}(t_1^* + 0) & \\ z_{2+2z_2}(t_1^* + 0) & \end{aligned} \right\} \text{не определяются} \left. \vphantom{\begin{aligned} z_1(t_1^* + 0) &= z_1(t_1^*) = 0, \\ z_2(t_1^* + 0) &= 0, \\ z_{1+2z_2}(t_1^* + 0) & \\ z_{2+2z_2}(t_1^* + 0) & \end{aligned}} \right\} z_2(t_1^*) = 0.$$

В момент t_2^* , когда время ожидания l -й заявки истекает, число заявок уменьшается на единицу. Состояние агрегата $z(t_2^* + 0)$ определяется оператором W'' :

$$\begin{aligned} z_1(t_2^* + 0) &= z_2(t_2^*), \\ z_2(t_2^* + 0) &= z_2(t_2^*) - 1, \\ z_{1+2k}(t_2^* + 0) &= z_{1+2k}(t_2^*) \\ z_{2+2k}(t_2^* + 0) &= z_{2+2k}(t_2^*) \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} z_1(t_2^* + 0) &= z_2(t_2^*), \\ z_2(t_2^* + 0) &= z_2(t_2^*) - 1, \\ z_{1+2k}(t_2^* + 0) &= z_{1+2k}(t_2^*) \\ z_{2+2k}(t_2^* + 0) &= z_{2+2k}(t_2^*) \end{aligned}} \right\} k < l,$$

$$\begin{aligned} z_{1+2k}(t_2^* + 0) &= z_{1+2(k+1)}(t_2^*) \\ z_{2+2k}(t_2^* + 0) &= z_{2+2(k+1)}(t_2^*) \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} z_{1+2k}(t_2^* + 0) &= z_{1+2(k+1)}(t_2^*) \\ z_{2+2k}(t_2^* + 0) &= z_{2+2(k+1)}(t_2^*) \end{aligned}} \right\} l \leq k < z_2(t_2^*).$$

Оператор \bar{U} определяет состояния агрегата в полуинтервале между особыми событиями (t_n, t_{n+1}) , где t_n, t_{n+1} – соответственно моменты поступления в агрегаты входных сигналов и выдачи выходных:

$$\begin{aligned} z_1(t) &= z_1(t_n + 0) - (t - t_n), \\ z_2(t) &= z_2(t_n + 0), \\ z_{1+2k}(t) &= z_{1+2k}(t_n + 0), \\ z_{2+2k}(t) &= z_{2+2k}(t_n + 0) - (t - t_n). \end{aligned}$$

Абстрактное описание агрегата третьего уровня на этом можно считать законченным. Для конкретной реализации модели агрегата необходимо дать описание параметра α_j заявок и моментов t_j их поступления в систему, а также параметра системы β и функций

$\gamma_j = s(\alpha_j, \beta)$ и $\eta_j = \psi(\alpha_j, \beta)$, определяющих допустимое время ожидания заявки в очереди и время обслуживания заявки. Описание указанных параметров приведено в работе [9].

Агрегат четвертого уровня (коллектив операторов). Математическая модель агрегата четвертого уровня представляет собой многоканальную многофазную систему массового обслуживания. Агрегат A_4 полностью описывается множеством агрегатов третьего уровня и матрицей переходов, указывающей порядок передачи частных задач управления между операторами.

Обобщенная схема имитационной модели. Абстрактное описание модели деятельности коллектива операторов в виде четырехуровневой агрегативной системы позволяет разработать обобщенную структурную схему модели.

Существенной особенностью обобщенной модели групповой деятельности операторов является тот факт, что ее состав зависит от характера задач проектирования [10]. Выделяют модели трех уровней. Модель коллектива (первого уровня) используется при проектировании групповой деятельности; модель оператора (второго уровня) – при проектировании индивидуальной деятельности; модель оператора, учитывающая влияние эргономических факторов (третьего уровня), – при проектировании средств деятельности и задании требований к оператору.

Рассмотрим последовательно состав имитационных моделей разных уровней, выделяя при этом общие и специфические элементы модели (рис. 2).

Имитационная модель первого уровня включает следующие блоки (выделены толстыми линиями): ввода и хранения исходных данных по задачам, решаемым коллективом операторов (Б1); формирования простейшего потока задач (Б2); организации обслуживания задач операторами (Б3), включает частные модели решения задач операторами; обработки результатов моделирования (Б4); оценки адекватности модели (Б5); анализа и управления моделированием (Б6).

В Б1 вводятся и хранятся данные по задачам, решаемым коллективом операторов. Каждая задача определяется следующими данными: номером задачи $j = 1, \dots, n$; важностью (приоритетом) задачи C_j ; интенсивностью потока λ_j ; временем существования (допустимым временем решения) $t_{j\text{доп}}$, заданным законом распределения $B_j(t)$ с числовыми характеристиками $\bar{t}_{j\text{доп}}$, $\sigma_{j\text{доп}}$; временем решения j -й задачи каждым i -м оператором t_{ij} , заданным законом с числовыми характеристиками \bar{t}_{ij} , σ_{ij} .

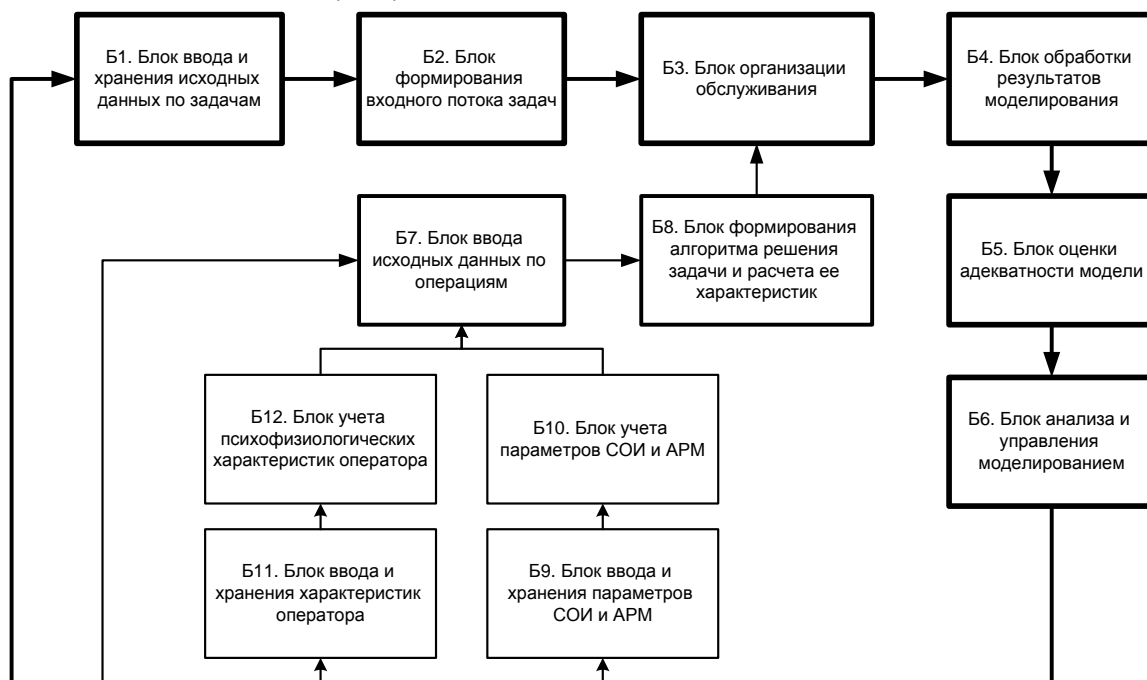


Рис. 2. Обобщенная структура имитационной модели групповой деятельности операторов

При моделировании групповой деятельности задается ориентированный граф последовательности решения каждой задачи коллективом операторов. Исходные данные по задаче удобнее представлять в виде матрицы смежности вершин графа $\|v_{ij}\|$, строками и столбцами которой являются номера операторов ($i=1, \dots, n$), а также начало (вход) и конец (выход) решения задачи. Пример графа решения задачи и соответствующая матрица $\|v_{ij}\|$ приведены на рис. 3.

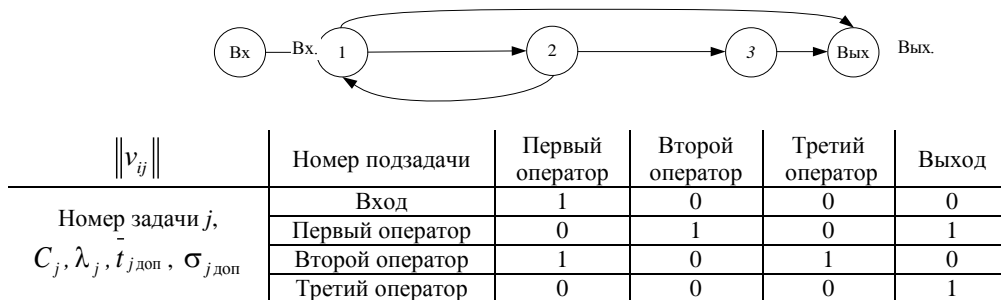


Рис. 3. Граф решения задачи коллективом операторов и его матрица смежности

В Б1 также хранятся сведения об алгоритме решения j -й задачи v_j , используемые моделями второго и третьего уровней. Алгоритм решения задачи v_j задается в виде вероятностного графа, определенного матрицей смежности вершин ω_{lk}^j , строками и столбцами которой являются операции алгоритма, а элементы P_{lk}^j характеризуют вероятность перехода после выполнения l -й операции к k -й при решении j -й задачи.

Пример графа алгоритма решения задачи и соответствующая матрица смежности вершин показаны на рис. 4. Кроме того, для каждой задачи имеется таблица идентификации номера операции с типом, содержащая также числовые характеристики выполнения операции.

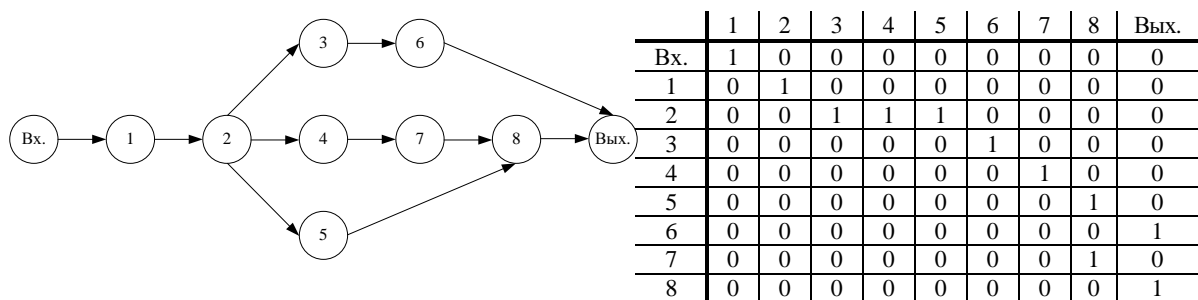


Рис. 4. Граф алгоритма решения задачи оператором и его матрица смежности

В Б2 формируется пуассоновский (простейший) поток входных задач, в котором вероятность поступления k задач в промежутке времени в простейшем случае задается формулой Пуассона:

$$P_k(\Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda \Delta t}.$$

В простейшем потоке промежутки времени между поступлениями задач распределяются по показательному закону, поэтому процедура моделирования простейшего потока заключается в следующем. Весь интервал моделирования разбивается на определенное число шагов, в пределах которого считается, что поток задач распределен по закону Пуассона. Время поступления последующей задачи рассчитывается как сумма времени поступления предыдущей задачи и отрезка времени, распределенного по показательному закону:

$$t_i = t_{i-1} + \xi_i,$$

где ξ_i – случайный промежуток времени, распределенный по показательному закону.

Блок организации взаимодействия операторов и решения задач Б3 специфический и включается только в модель первого уровня. Этот блок обеспечивает включение моделей операторской деятельности в соответствии с графом решения задачи.

Моделируя групповую деятельность, необходимо учитывать последовательное или параллельное соединение операторов. При последовательном соединении включение моделей индивидуальной деятельности производится однозначно в соответствии с графом решения задачи. Параллельное соединение может быть задано разнообразной логикой включения моделей: случайно, по мере освобождения операторов; по приоритету; по минимуму длины очереди или времени ожидания и т. д. Могут быть учтены и характеристики взаимодействия операторов (время взаимодействия, вероятность безошибочного взаимодействия).

В Б3 включаются частные модели, моделирующие процесс решения задач операторами. Они представляют собой, по существу, приоритетные однолинейные системы массового обслуживания с ограниченным временем ожидания в очереди (пребывания в системе). Более подробно процесс организации обслуживания задач будет описан при рассмотрении модели второго уровня.

В блоке обработки результатов моделирования Б4 рассчитываются показатели качества решения задач и загрузки операторов. Так, при проведении каждого r -го ($r = \overline{1, z}$) эксперимента на модели вычисляются:

- вероятность своевременного решения j -й задачи в r -м эксперименте

$$P_{jr}^{св} = \frac{k_{jr}}{n_{jr}},$$

где k_{jr}, n_{jr} – соответственно количество возникших и своевременно решенных задач j -го типа в r -м эксперименте;

- вероятность своевременного и безошибочного решения j -й задачи в r -м эксперименте

$$P_{jr} = \frac{m_{jr}}{n_{jr}},$$

где m_{jr} – количество своевременно и безошибочно решенных задач j -го типа в r -м эксперименте;

- загрузка оператора решением задач j -го типа в r -м эксперименте

$$\rho_{jr} = \frac{\gamma_{jr}}{\Delta t},$$

где $\gamma_{jr} = \sum_j t_{jr}$ – время решения оператором всех задач j -го типа в r -м эксперименте.

Кроме того, Б4 вычисляет средние значения параметров:

- вероятности своевременного решения задач j -го типа

$$P_j^{св} = \frac{1}{z} \sum_{r=1}^z P_{jr}^{св};$$

- вероятности своевременного и безошибочного решения задач j -го типа

$$P_j = \frac{1}{z} \sum_{r=1}^z P_{jr};$$

– загрузки оператора решением задач j -го типа

$$\rho_j = \frac{1}{z} \sum_{r=1}^z \rho_{jr} ;$$

– вероятности своевременного и безошибочного решения всех задач оператором

$$P = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_j ;$$

– загрузки оператора

$$\rho = \sum_{j=1}^n \rho_j .$$

Б5 предназначен для оценки соответствия результатов моделирования деятельности оператора результатам реальной деятельности. Оценка адекватности модели производится по таким выходным показателям, как качество решения задач, качество работы операторов и параметры загрузки операторов. Порядок оценки адекватности модели и основные расчетные соотношения приведены в [11].

Б6 обеспечивает расчет и построение зависимостей входных показателей модели от характеристик задач, алгоритмов их решения, параметров средств отображения информации (СОИ) и автоматизированных рабочих мест (АРМ), характеристик оператора. Другой важной функцией блока является поиск оптимальных значений указанных факторов по полученным результатам моделирования, т. е. управление моделированием.

Для определения оптимальных значений параметров информационной модели целесообразно использовать параллельный метод стохастической оптимизации [12, 13]. Выбор данного метода определяется прежде всего его максимальным быстродействием, связанным с тем, что в качестве среднего направления шага оптимизации используется не направление статистического градиента (оно может изменяться в широких пределах), а непосредственное направление на экстремум в среднем по области определения.

Имитационная модель второго уровня отличается от модели первого уровня наличием блоков ввода и хранения исходных данных по операциям (Б7), формирования алгоритма решения задачи и расчета его характеристик (Б8) (на рис. 2 выделены контуром средней толщины), а также организации обслуживания с детализацией дисциплины обслуживания заявок оператором (Б3).

В Б7 вводятся и хранятся данные по типовым операциям (функциональным блокам), полученные либо из банка эргономических данных, либо экспериментальным путем.

По каждой операции имеются следующие данные:

- тип операции (идентификатор);
- временные характеристики выполнения операции, заданные законом распределения $\beta(\tau)$ с математическим ожиданием m_τ и среднеквадратическим отклонением σ_τ ;
- точностные характеристики выполнения операции, заданные законом распределения ошибки $\varphi(x)$ с математическим ожиданием m_x и среднеквадратическим отклонением σ_x ;
- вероятность безошибочного выполнения операции $P_{оп}$.

Б8 формирует вероятностный алгоритм решения задачи, заданный матрицей смежности операций, и рассчитывает время и вероятность правильного и своевременного решения задачи, используя данные блока Б7 по операциям. Основная идея формирования вероятностного алгоритма заключается в следующем.

В первой строке матрицы, соответствующей входу в алгоритм, находится ненулевой элемент: $P_{вхi} \neq 0$. Здесь возможны два случая: $P_{вхi} = 1$ для данного i и $0 < P_{вхi} < 1$ для нескольких i , при этом $\sum_i P_{вхi} = 1$.

При $P_{\text{вх}i} = 1$ по номеру операции i с помощью таблицы идентификации, хранящейся в Б1, находится тип операции. По типу операции реализуется обращение к Б7 и определяются время и правильность выполнения операции. Эти данные фиксируются в массиве задачи.

При $0 < P_{\text{вх}i} < 1$ для выбора очередной операции алгоритма используется датчик случайных чисел, параметрами которого являются величины $P_{\text{вх}i}$. Аналогично по номеру i анализируется следующая i -я строка матрицы смежности. Признаком завершения алгоритма является переход к строке, соответствующей операции из алгоритма решения задачи.

Блок Б3 предназначен для организации решения задачи оператором. Моделирующий алгоритм реализует как беспriorитетное обслуживание заявок, так и различные виды приоритетного обслуживания: относительный, абсолютный и динамический приоритеты.

При беспriorитетном обслуживании момент начала обслуживания очередной заявки соответствует моменту ее поступления, если система не занята обслуживанием или этот момент задерживается на время ожидания $\Delta t_{\text{ож}} = t_{\text{осв}} - t$, пока система освободится от обслуживания предшествующих заявок.

При относительном приоритете момент начала обслуживания поступившей заявки совпадает с моментом освобождения системы после обслуживания заявок более высокого приоритета. Если заявки обслуживаются по абсолютному приоритету, то момент начала обслуживания всегда соответствует моменту поступления заявки высшего приоритета.

Модель позволяет реализовать динамические приоритеты, особенностью которых является изменение порядка обслуживания в зависимости от условий (загрузки оператора).

Процесс обслуживания моделируется следующим образом. Считается, что все n_{jr} задач j -го типа в r -м моделировании обслужены, т. е. содержание счетчика K_{jr} количества одновременно обслуженных задач равно n_{jr} . После этого путем анализа времени поступления задачи, времени обслуживания и допустимого времени ожидания (или пребывания) устанавливается факт обслуживания задачи или ее потери (частичного обслуживания). Факт несвоевременного обслуживания регистрируется как вычитание единицы со счетчика K_{jr} . В результате содержимое счетчика K_{jr} будет соответствовать числу своевременно обслуженных задач j -го типа в r -м моделировании.

Для определения величины m_{jr} своевременно и правильно обслуженных задач содержимое счетчика K_{jr} обрабатывается таким образом, что всякий раз из K_{jr} вычитается единица, если в блоке Б3 зафиксирован факт неправильного выполнения алгоритма.

Существенным отличием *имитационной модели третьего уровня* (все блоки на рис. 2) от модели второго уровня является то, что характеристики операций рассчитываются и вводятся в блок Б7 по данным, характеризующим параметры СОИ и АРМ и психофизиологические особенности оператора. В зависимости от быстродействия и объема памяти ЭВМ, на которой реализуется модель, эти расчеты могут производиться либо перед моделированием деятельности оператора, либо непосредственно в процессе моделирования.

Указанные расчеты осуществляются с помощью блоков:

- ввода и хранения параметров СОИ в АРМ (Б9);
- учета параметров СОИ и АРМ (Б10);
- ввода и хранения характеристик оператора (Б11);
- учета психофизиологических характеристик оператора (Б12).

В Б9 вводятся и хранятся значения информационных, системных и светотехнических параметров СОИ, значения параметров пульта ввода АРМ (количество органов управления d , неупорядоченность их расположения L).

В Б11 вводятся и хранятся данные, позволяющие учесть:

– уровень подготовки оператора (время обучения; коэффициенты кривых обучения оператора; временные, вероятностные и точностные характеристики работы оператора в начале и конце обучения);

– процессы адаптации и утомления оператора во время работы (период адаптации оператора, время начала утомляемости, коэффициенты кривых адаптации и утомления);

– влияние напряженности (загрузки оператора) на качество деятельности.

Б10 обеспечивает расчет временных и вероятностных характеристик типовых операций в зависимости от параметров СОИ и пульта управления АРМ.

В Б10 на основе обработки статистического материала формируется функциональная зависимость вида

$$y = F(x_1, \dots, x_n),$$

где y – количественные характеристики выполнения типовой операции ($m_\tau, \sigma_\tau, m_x, \sigma_x, P_{\text{оп}}$), x_1, \dots, x_n – параметры системы отображения.

Для получения указанной зависимости могут использоваться корреляционно-регрессионный анализ или метод многорядовой селекции с применением комбинаторного перебора (метод группового учета аргументов, МГУА). Более предпочтительным является МГУА, так как он обладает рядом достоинств [13]:

– позволяет получать зависимость на основе минимального объема априорной информации;

– позволяет получать модели практически любой сложности;

– имеет высокую точность;

– структура модели в этом методе, в отличие от регрессионного анализа, заранее не фиксируется, а выбирается из множества вариантов по заданным критериям.

Общая идея МГУА заключается в том, что на основе статистических исходных данных, введенных в ЭВМ, и критерия выбора вычисляется единственная модель оптимальной сложности при помощи перебора большого числа моделей.

В частном случае, когда пульт управления характеризуется неупорядоченностью L и количеством органов управления d [10], имеет место выражение

$$m_\tau = 0,5d + 1,7(1,5 \frac{d-1}{25} - 1) \left[1 + \frac{4}{\pi} \arctg(2L-1) \right].$$

Б12 обеспечивает учет влияния особенностей деятельности оператора и его характеристик (уровня обученности, адаптации, загрузки и др.) на качество выполнения операций.

Уровень обученности оператора может быть учтен в модели с помощью либо таблиц, либо формульной зависимости. В таблице указываются значения величин $m_\tau, \sigma_\tau, m_x, \sigma_x, P_{\text{оп}}$ для разных (обычно трех) уровней обученности: удовлетворительного, хорошего и отличного.

При использовании показательной модели обучаемости зависимость величины m_τ от уровня имеет вид [10]

$$m_\tau = m_{\tau k} - (m_{\tau k} - m_{\tau 0}) e^{-\frac{t_1}{t_0}},$$

где $m_{\tau 0}, m_{\tau k}$ – время выполнения операции неподготовленным и отлично подготовленным операторами соответственно; t_0 – коэффициент, характеризующий скорость обучения; t_1 – время обучения.

Адаптация и утомление оператора могут привести к возрастанию времени выполнения операций, ухудшению точности и уменьшению вероятности безошибочной работы. Как показано в [8], эти факторы могут быть учтены с помощью кривых, приведенных на рис. 5.

Формульная зависимость среднего времени выполнения операции может быть представлена, например, следующим образом:

$$m_{\tau} = \begin{cases} \tau_0 + k_1 \operatorname{tg} \alpha (t_a - t) & \text{при } 0 \leq t \leq t_a, \\ \tau_0 & \text{при } t_a \leq t \leq t_{\text{yr}}, \\ \tau_0 + k_2 \operatorname{tg} \beta (t - t_{\text{yr}}) & \text{при } t \geq t_{\text{yr}}, \end{cases}$$

где τ_0 – среднее время выполнения операции без учета адаптации и утомляемости; t_a – период адаптации; t_{yr} – время начала утомляемости; t – текущее время работы; k_1 , k_2 , α , β – время обучения.

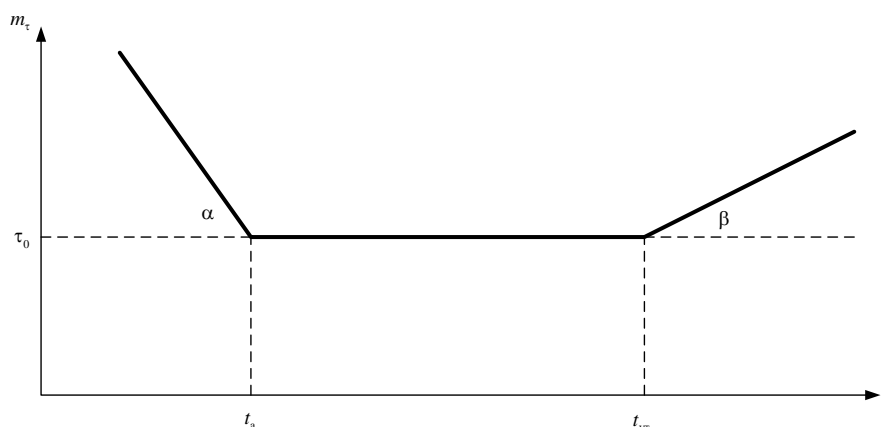


Рис. 5. Зависимость времени выполнения операций с учетом адаптации и утомляемости оператора

Напряженность в работе оператора связана с возникновением дефицита времени при обработке большого количества информации. Главным образом напряженность в работе отрицательно сказывается на безошибочности и точности работы оператора. Экспериментально полученная зависимость вероятности безошибочного выполнения операции от уровня загрузки оператора имеет вид

$$P_{\text{оп}} = P_0 - (P_0 - P_{\rho}) \left(1 - e^{-\frac{\rho - \rho_0}{C_0}}\right), \quad \rho \geq \rho_0,$$

где P_0 , P_{ρ} – значения вероятности безошибочного выполнения операции при нормальной загрузке и произвольной загрузке ($\rho \geq \rho_0$) соответственно; C_0 – коэффициент, характеризующий способность оператора работать в напряженных условиях.

В блоке 12 имеется возможность учесть и такой важный фактор, как «свертывание» алгоритма решения задачи оператором при дефиците времени. При «свертывании» алгоритма уменьшается время решения задачи, но возрастает вероятность ошибки [10]. Остальные блоки модели третьего уровня функционируют аналогично моделям первого и второго уровней.

На этом разработку обобщенной структурной схемы имитационной модели групповой и индивидуальной деятельности операторов в зависимости от характера решаемых задач можно считать завершенной.

Необходимо отметить, что разделение модели на три уровня является довольно условным, так как в зависимости от требуемой степени детализации при проектировании групповой деятельности может возникнуть необходимость учета деталей организации деятельности отдельного оператора. В свою очередь, организация индивидуальной деятельности оператора может сильно зависеть от особенностей организации групповой деятельности и результатов труда других операторов.

Заключение. На основе агрегативного подхода разработана формализованная модель деятельности коллектива операторов в виде четырехуровневой агрегативной системы, включающей функциональные блоки (агрегаты первого уровня), модели решения задач (агрегаты вто-

рого уровня), модели операторов (агрегаты третьего уровня), модель коллектива операторов (агрегат четвертого уровня). Агрегаты первого уровня представляют собой вероятностные автоматы, реализующие задержку и преобразование входных сигналов, второго уровня – вероятностный граф, третьего уровня – одноканальную систему массового обслуживания с отказами, агрегат четвертого уровня – многоканальную систему массового обслуживания.

В зависимости от характера задач проектирования деятельности предлагается использовать модели первого уровня (модель групповой деятельности коллектива операторов), второго (модель оператора) и третьего (модель оператора, учитывающую влияние эргономических факторов). Разработаны обобщенные структурные схемы моделей всех уровней. Определены основные требования и принципы функционирования блоков, входящих в модели соответствующего уровня.

Список использованных источников

1. Бекиш, А. Р. Подход к моделированию индивидуальной и групповой операторской деятельности с использованием CASE-технологий / А. Р. Бекиш, С. В. Кругликов // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2012. – № 22. – С. 30–37.
2. Бекиш, А. Р. Вариант построения имитационной модели групповой деятельности операторов автоматизированных систем управления тактического звена / А. Р. Бекиш, С. В. Кругликов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 2(47). – С. 79–87.
3. Бекиш, А. Р. Научно-методический аппарат проектирования и оценки организации боевой работы в системах управления военного назначения / А. Р. Бекиш, С. В. Кругликов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – № 3(48). – С. 101–111.
4. Кругликов, С. В. Адаптивные информационно-управляющие системы специального назначения: теория и практика синтеза : моногр. / С. В. Кругликов. – Минск : ВА РБ, 2014. – 233 с.
5. Санников, С. П. Моделирование систем / С. П. Санников. – Екатеринбург : Изд-во УГЛТУ, 2012. – 35 с.
6. Бусленко, Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. – М. : Сов. радио, 1973. – 440 с.
7. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 400 с.
8. Суходольский, Г. В. Структурно-алгоритмический анализ и синтез деятельности / Г. В. Суходольский. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1976. – 120 с.
9. Ронжин, О. В. Информационные методы исследования эргатических систем / О. В. Ронжин. – М. : Энергия, 1976. – 208 с.
10. Зинченко, В. П. Введение в эргономику / В. П. Зинченко. – М. : Сов. радио, 1974. – 349 с.
11. Бекиш, А. Р. Методика оценки адекватности имитационной модели групповой деятельности операторов / А. Р. Бекиш // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 31. – С. 68–78.
12. Егоров, Б. М. Параллельный метод стохастической оптимизации многопараметрических объектов / Б. М. Егоров [и др.] // Вычисл. и прикл. матем. – Киев : Изд-во КГУ, 1979. – 191 с.
13. Ивахненко, А. Г. Принятие решения на основе самоорганизации / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Зайченко, В. Д. Дмитров. – М. : Сов. радио, 1976. – 280 с.

References

1. Bekish A. R., Kruglikov S. V. Podkhod k modelirovaniyu individual'noy i gruppovoy operatorskoy deyatelnosti s ispol'zovaniem CASE-tehnologiy [The approach to modeling of individual and group operator activity with the use of CASE-technologies]. *Sbornik nauchnykh statey Voennoy akademii Respubliki Belarus' [A Collection of Scientific Articles of the Military Academy of the Republic of Belarus]*, 2012, no. 22, pp. 30–37 (in Russian).
2. Bekish A. R., Kruglikov S. V. Variant postroyeniya imitatsionnoy modeli gruppovoy deyatelnosti operatorov avtomatizirovannykh sistem upravleniya takticheskogo zvena [A variant of constructing an imitation model of group activity of operators of automated tactical control systems]. *Vestnik Voennoy akademii Respubliki Belarus' [Vestnik of the Military Academy of the Republic of Belarus]*, 2015, no. 2(47), pp. 79–87 (in Russian).
3. Bekish A. R., Kruglikov S. V. Nauchno-metodicheskiy apparat proyektirovaniya i otsenki organizatsii boyevoy raboty v sistemakh upravleniya voennogo naznacheniya [Scientific and methodical apparatus for designing and evaluating the organization of combat operations in military control systems]. *Vestnik Voennoy akademii Respubliki Belarus' [Vestnik of the Military Academy of the Republic of Belarus]*, 2015, no. 3(48), pp. 101–111 (in Russian).
4. Kruglikov S. V. Adaptivnyye informatsionno-upravlyayushchiye sistemy spetsial'nogo naznacheniya: teoriya i praktika sinteza. *Adaptive Information-Control Systems for Special Purposes: Theory and Practice of Synthesis*. Minsk, VA RB Publ., 2014, 233 p. (in Russian).
5. Sannikov, S. P. Modelirovaniye sistem. *Modeling of Systems*. Ekaterinburg, UGLTU Publ., 2012, 35 p. (in Russian).
6. Buslenko N. P., Kalashnikov V. V., Kovalenko I. N. Leksii po teorii slozhnykh sistem. *Lectures on the Theory of Complex Systems*. Moscow, Sov. radio Publ., 1973, 440 p. (in Russian).

7. Buslenko N. P. Modelirovaniye slozhnykh sistem. *Simulation of Complex Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1978, 400 p.
8. Sukhodol'skiy G. V. Strukturno-algoritmicheskiy analiz i sintez deyatelnosti. *Structural-Algorithmic Analysis and Synthesis of Activity*. Leningrad, LGU Publ., 1976, 120 p. (in Russian).
9. Ronzhin O. V. Informatsionnyye metody issledovaniya ergaticheskikh sistem. *Information Methods for Studying Ergatic Systems*. Moscow, Energiya Publ., 1976, 208 p. (in Russian).
10. Zinchenko V. P. Vvedeniye v ergonomiku. *Introduction to Ergonomics*. Moscow, Sov. radio Publ., 1974, 349 p. (in Russian).
11. Bekish A. R. Metodika otsenki adekvatnosti imitatsionnoy modeli gruppovoy deyatelnosti operatorov [The method of assessing the adequacy of the simulation model of the operators group activity]. *Sbornik nauchnykh statey Voennoy akademii Respubliki Belarus'* [A Collection of Scientific Articles of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2016, no. 31, pp. 68–78 (in Russian).
12. Yegorov, B. M. Parallel'nyy metod stokhasticheskoy optimizatsii mnogoparametricheskikh ob'yektov [Parallel method of stochastic optimization of multiparameter objects]. *Vychislitel'naya i prikladnaya matematika* [Computational and Applied Mathematics], Kiev, Izd-vo KGU, 1979, 191 p. (in Russian).
13. Ivakhnenko A. G., Zaychenko Yu. P., Dmitrov V. D. Prinyatiye resheniya na osnove samoorganizatsii. *Decision Making on the Basis of Self-Organization*. Moscow, Sov. radio Publ., 1976, 280 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кругликов Сергей Владимирович – доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной и инновационной работе, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь).

E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Бекиш Александр Романович – научный сотрудник научно-исследовательской части, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: beker1@rambler.ru

Information about the authors

Sergey V. Kruglikov – Doctor of Military Sciences, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General for Scientific and Innovative Work, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Alexander R. Bekish – Research Fellow of the Research Section, The Military Academy of the Republic of Belarus (220, Independence Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: beker1@rambler.ru