

УДК 331.015.11

С.В. Кондратенко, В.В. Спасенников

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭРГОНОМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрены методы анализа микроструктуры действий операторов с использованием технологических карт трудового процесса. Приведены обозначения элементов движений с учетом трехзонной системы оценки. Предложена методика синтеза нечетких алгоритмов на основе оценки нормы управляемости при нечетких временных характеристиках работы оператора.

Ключевые слова: анализ деятельности, микроструктура движений, графы алгоритмов, трудовой процесс, нормы управляемости, теория нечетких множеств, эргономическое обеспечение, человеко-машинные комплексы.

Эргономическое обеспечение разработки и эксплуатации человеко-машинных комплексов связано с методами количественного описания и моделирования операторской деятельности, которые можно разделить на алгоритмические методы (вариативные, стохастические, эвристические), используемые в период эксплуатации систем, и методы, основанные на экспертных оценках с использованием аппарата теории нечетких множеств, применяемые на ранних стадиях проектирования [1].

Целью данной статьи является рассмотрение современных методов формализованного анализа микроструктуры действий на основе технологических карт трудового процесса, а также оценки норм управляемости при нечетких временных характеристиках работы и синтеза нечетких алгоритмов операторской деятельности.

Обычный вариативный алгоритм носит нестохастичный характер и представляет собой фактор-множество вариантов. Однако при многократном повторении работником стандартных операций одни варианты реализуются чаще, чем другие. Это зависит и от условий применения алгоритма, и от субъективных знаний и склонностей человека-исполнителя. Стоит отметить, что в конечном итоге вариативный алгоритм превращается в мультимножество вариантов, в котором кратности подразумевают смысл частоты применения вариантов. Так появляются стохастические алгоритмы [2].

Наиболее очевидным способом представления стохастического алгоритма является его передача как вариативного алгоритма, возможные варианты которого реализуются и приводят к результату лишь с определенной вероятностью, а все вместе — достоверно. В целом ряде работ показано, что стохастический алгоритм задается распределением вероятностей вариантов решения задач данного класса [3].

Стохастический алгоритм можно назвать полным в том смысле, что все его варианты образуют полную группу несовместных событий. Иначе же он считается неполным. Большинство стохастических алгоритмов относятся к неполным, а значит, искомый результат уже не может быть достигнут достоверно, а лишь случайно, с большей или меньшей вероятностью, отличающейся от единицы. Такие неполные (частичные) стохастические алгоритмы называются эвристическими (эвристиками) [4].

Пусть нужно переставить объект с одного места на другое. Однозначный (механистический) алгоритм решения этой задачи представляет собой цепочку действий: «взять – поднять – перенести – поставить – отпустить» (1 на рис. 1б). Но может случиться, что первоначально намеченное место, куда переставлен объект, чем-то неадекватно и объект нужно снова перенести на другое место. В таком случае действие «поставить» сочетается с оценочным действием «то ли место»; в результате появляются две возможные оценки: «да», «место то», или «нет», «место не то». Если «место не то», то приходится снова поднимать объект, переносить его и ставить на новое место.

Тогда вместо реализации с двумя переносами (2 на рис. 1б) имеет место реализация с тремя, четырьмя и т.д. переносами. Ограничимся двумя реализациями.

Будучи объединены, эти реализации образуют логическую схему алгоритма, имеющую широкое распространение в приложениях алгоритмического подхода (рис. 1а). Если же мы эти самые реализации взвесим вероятностями и обобщим, то на выходе будет получен граф стохастического алгоритма (рис. 1в).

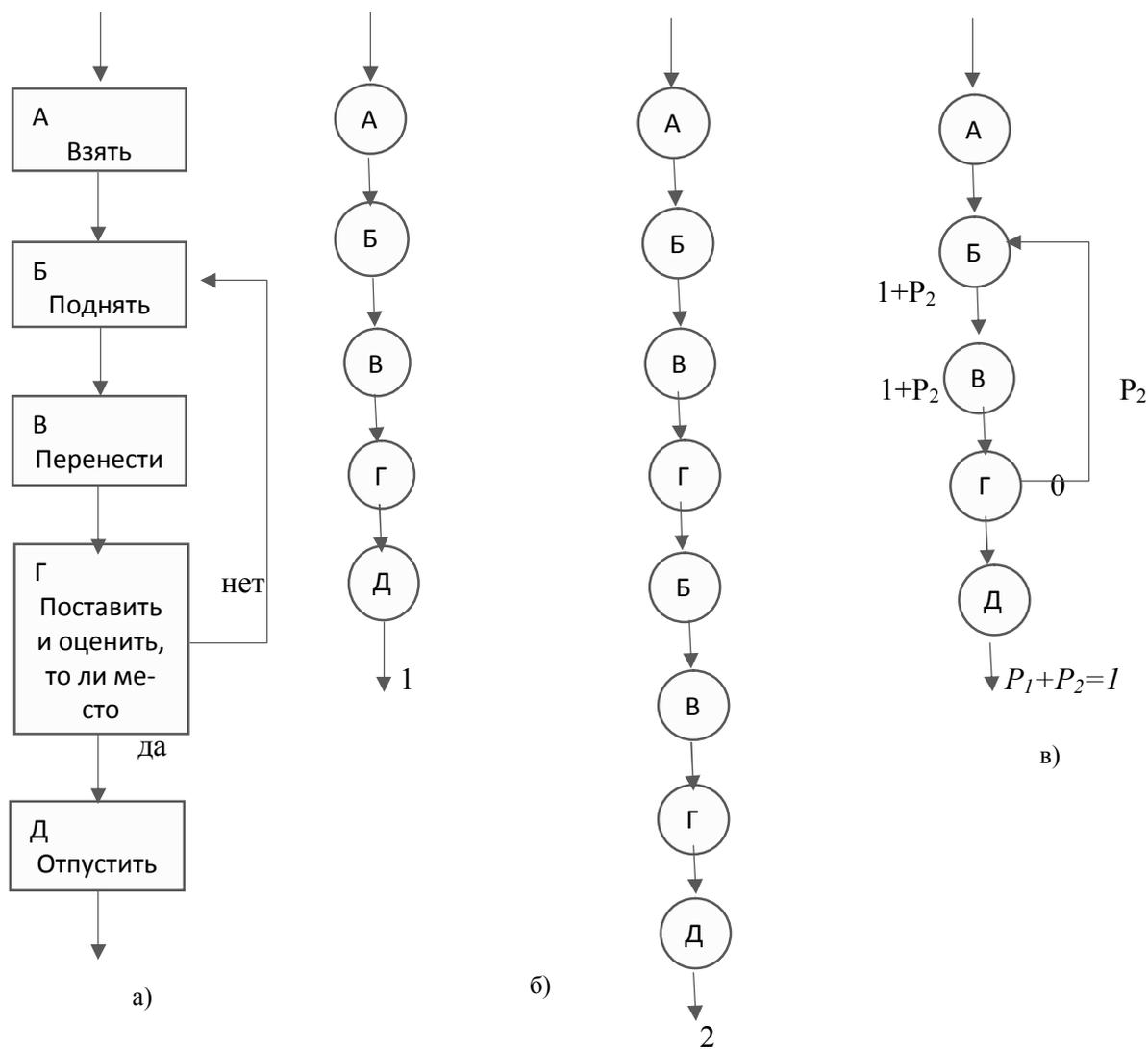


Рис. 1. Графы алгоритмов: а – логическая схема вариативного алгоритма (А, Б, В, Г, Д – обозначения действий); б – две однозначные реализации вариативного алгоритма (1 – без повторений, 2 – с однократным повторением); в – граф стохастического вариативного алгоритма, полученный обобщением взвешенных вероятностями P_1 и P_2 реализаций

Следует различать простые и сложные алгоритмы. Простота и сложность носят относительный характер. Однако многие реальные задачи требуют решений, состоящих из десятков, сотен, а то и тысяч элементарных действий («поднять», «поставить», «включить», «выключить» и т.д.). В частности, к таким можно отнести задачи, решаемые в процессе работы операторами энергоблоков, инженерами-космонавтами. Подобные задачи, а тем более всю деятельность субъектов труда нельзя описать одним алгоритмом.

В качестве простого можно принять алгоритм, число действий в котором соответствует миллеровскому числу 7 ± 2 [5]. При большем количестве действий приходится расчленять задачу на подзадачи, которые можно решить простыми алгоритмами, а затем син-

тезировать на их основе сложные алгоритмы, которые целесообразно называть алгоритмическими структурами [4].

Рассмотрим алгоритмическую структуру действий на примере различных видов технологических карт: индивидуальных, маршрутных, сборочных и бригадных карт ручного и машинного времени, операционных и др.

Все эти карты служат для систематизации данных, облегчения разумной оценки ситуаций и разработки мероприятий по усовершенствованию трудовых процессов с преобладанием ручного труда. Особенности построения этих карт кратко рассмотрим на нескольких примерах, сохранив при этом общепринятую терминологию.

Индивидуальные технологические карты изображают графически каждый этап индивидуального трудового процесса. Они позволяют выявить элементы процесса, которые нужно подвергнуть более детальному изучению, и наглядно показывают, как изменение одного из этапов процесса отражается на других его этапах.

Для построения индивидуальной технологической карты используют условные обозначения [6]:

○ – операция, главный этап трудового процесса (обычно заполняется в одном месте). Примеры операций: включение напряжения сети, печатание на компьютере письма и т. д.

□ – транспортировка, перемещение детали (предмета труда) или специалиста. Указывается способ транспортировки с помощью буквы внутри окружности (электрокар, подъемник и т. п.). Примеры транспортировки: перемещение аккумулятора с помощью тележки, переноска посылным документов.

▽ – складирование и простой. Иногда отличают временное хранение от постоянного. В первом случае внутри треугольника помещают букву «с», при втором варианте эту букву ставят снаружи. Складирование считается постоянным, если для получения детали необходим специальный документ. Примеры временного складирования или простоя: авиационный механик ожидает воздушозаправщик, документы лежат неподписанными.

□ – технический контроль. Он может быть качественным (например, проверка исправности агрегата) или количественным (измерение, подсчет, взвешивание). Примеры технического контроля: снятие показаний манометра, проверка напечатанного на принтере бланка.

Иногда применяются комбинированные условные обозначения. Например, окружность, вписанная в квадрат, означает объединение операции и технического контроля. Также могут использоваться и другие системы условных обозначений для технологических карт.

Иногда карту ручного и машинного времени полезно дополнить сводными данными о рассматриваемом трудовом процессе (табл. 1) [1].

Таблица 1

Сводные данные о процессе контроля человеко-машинного комплекса

Затраты времени, мин	Человек	Машина
Время простоя	2,5	1,5
Рабочее время	1,5	2,5
Время всего цикла	4,0	4,0
Использование времени, %	37,5	62,5

На основании изложенного стоит отметить, что чем меньше время ручного труда, тем меньше возможностей проявления индивидуальности специалистов и поэтому меньше разброс значений

времени выполнения работы.

Вместе с тем чтобы совершенствовать трудовой процесс, необходимо выработать в себе навыки подсознательного анализа движений, уметь без труда их разделять и запоминать, интуитивно чувствовать пути усовершенствования трудового процесса. Изучение

микродвижений дает возможность представить любой трудовой процесс как совокупность движений, развивает способность мысленно представлять себе все эти движения. При этом вырабатываются навыки подсознательной оценки целесообразности тех или иных движений. Инженер начинает «чувствовать» трудовой процесс.

На картах микродвижений изображаются элементы движений правой и левой рук исполнителей (иногда изображаются также движения глаз). Эти карты отличаются от операционных карт делением трудового процесса на еще более мелкие этапы. Часто процесс расчленяется на стандартные элементы движений. Первая система универсальных микродвижений была предложена Ф. Гилбретом в 1912 году. Эти 17 элементов движений были им названы терблигами («терблиг» – написанная в обратную сторону фамилия Гилбрет). Терблиги были выбраны так, чтобы они не зависели от содержания работы. Различные сочетания терблигов воспроизводят те или иные технологические операции. В дальнейшем микродвижения были использованы для нормирования труда [3;8].

Учитывая приведенные соображения о роли изучения микродвижений при анализе структуры трудовых процессов, выделяют следующие основные универсальные элементы движений: поиск, выбор, схватывание, движение без нагрузки, движение с нагрузкой, держание, расслабление, расположение, установка, наблюдение, сборка, разборка, использование, ожидание, устранимая задержка, планирование, отдых.

Перечисленные элементы движений используются при составлении специальных карт. Установленных форм для карт микродвижений нет. При составлении таких карт могут применяться различные обозначения элементов движений (табл. 2). В ГОСТ Р ЕН 614-1-2003 предлагается разбивать производственный процесс на три уровня эргономической опасности (красный, желтый, зеленый).

Нами было взято 12 экспертов, ученых и сотрудников производственных предприятий, которым было предложено сопоставить микродвижение и один из трех уровней эргономической опасности, определяемых исходя из следующих критериев эргономичности: 1) точность и своевременность выполнения микродвижений; 2) качество выполнения (с точки зрения заказчика); 3) травмоопасность (этот критерий разделяется на три уровня: средняя, высокая, низкая). На основе полученных ответов экспертов были рассчитаны коэффициенты конкордации W для соответствующих типов микродвижений.

$$W = \frac{n}{m^2(n^2-n)} \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m r_{ij} - \frac{m(n-1)}{2}) \wedge 2,$$

где n – число респондентов (экспертов); m – число параметров, по которым проводится оценка.

Для оценки статистической значимости показателя согласованности оценок W был определен показатель обратной одной-сторонней вероятности распределения $X^2_{факт} = m(n-1)W$. Расчетный же показатель X^2 был получен с помощью табличного редактора MS Excel с использованием функции ХИ2ОБР. Во всех случаях фактический показатель превосходит расчетный. Это свидетельствует о том, что коэффициент конкордации статистически значим и связь между признаками трехцветной модели оценки эргономической опасности А, В и С является достаточно высокой.

Таблица 2

Обозначения элементов микродвижений и их цветовое кодирование с учетом согласованности экспертных оценок на основе ГОСТ Р ЕН 614-1-2003

Элемент движения	Объяснение символа	Цвет	Коэффициент конкордации
Поиск	Скошенный в сторону значок, как бы в поисках чего-либо	Зеленый	0,78
Выбор	Протянуть руку к предмету	Желтый	0,67

			Окончание табл. 2
Элемент движения	Объяснение символа	Цвет	Коэффициент конкордации
Схватывание	Рука в положении, удобном для охвата предмета	Красный	0,87
Движение без нагрузки	Рука без предмета	Зеленый	0,97
Движение с нагрузкой	Рука с предметом	Желтый	0,78
Держание	Магнит, удерживающий железную пластинку	Зеленый	0,67
Расслабление	Отпустить предмет	Красный	0,87
Расположение	Предмет, установленный вручную	Желтый	0,78
Установка	Кегля, поставленная на поле для игры	Зеленый	0,67
Наблюдение	Лупа	Зеленый	0,97
Сборка	Несколько предметов, собранных вместе	Желтый	0,78
Разборка	Одна часть соединения снята	Желтый	0,78
Использование	Начальная буква английского слова «use»	Зеленый	0,67
Неизбежная задержка	Человек, ненамеренно разбивший себе нос	Красный	1
Устранимая задержка	Человек, самовольно отдыхающий во время работы	Красный	0,87
Планирование	Человек с пальцем у лба, думает	Желтый	0,67
Отдых	Человек, сидящий в положении отдыхающего	Зеленый	0,97

За последние годы и в нашей стране, и за рубежом разработан ряд новых систем микродвижений (систем микроэлементарных нормативов) для нормирования труда, представляющих собой наборы нормативных значений продолжительности элементарных трудовых движений и правил использования этих значений при назначении норм времени выполнения работ [7].

При проектировании деятельности оператора на ранних этапах разработки сложных технических систем единственно доступной исходной информацией является экспертная информация. Формальным аппаратом обработки экспертной информации является теория нечетких множеств. Базируясь на методах теории нечетких множеств, рассмотрим две типичные задачи проектирования деятельности оператора: оценки предельных возможностей оператора по управлению (норма управляемости) и синтеза алгоритмов деятельности.

Норма управляемости является базовой характеристикой, которая позволяет ориентировочно определить функции и численность оперативного персонала на ранних этапах разработки системы.

Методика оценки нормы управляемости на основе применения теории нечетких множеств заключается в следующем. На основе обработки экспертной информации строятся функции принадлежности $\mu_{\uparrow}(t)$ и $\mu_{\downarrow}(t)$ для директивного (располагаемого) времени решения задач управления и нормативного (затрачиваемого) времени соответственно. Указанные функции принадлежности строятся при фиксированном количестве объектов управления.

Экспертная информация о временных характеристиках может быть получена либо в виде нечеткой оценки средних значений, либо в виде нечетких интервальных оценок (рис. 2).

Своевременное выполнение функции управления возможно при выполнении нечеткого неравенства $\tilde{\tau} \leq \tilde{T}$. Сведем задачу сравнения $\tilde{\tau}$ и \tilde{T} к задаче сравнения двух нечетких LR- чисел [4]. Каждое нечеткое число $\tilde{\tau}$ (\tilde{T}) представляется кортежем

$$\tilde{\tau} = (\bar{\tau}, \alpha_{\tau}, \beta_{\tau}) \text{ или } \tilde{T} = (\bar{T}, \gamma_T, \sigma_T),$$

где $\bar{\tau}$ (\bar{T}) – среднее значение $\tilde{\tau}$ (\tilde{T}); $\alpha_{\tau}, \beta_{\tau}$ (γ_T, σ_T) – левая и правая границы $\tilde{\tau}$ (\tilde{T}).

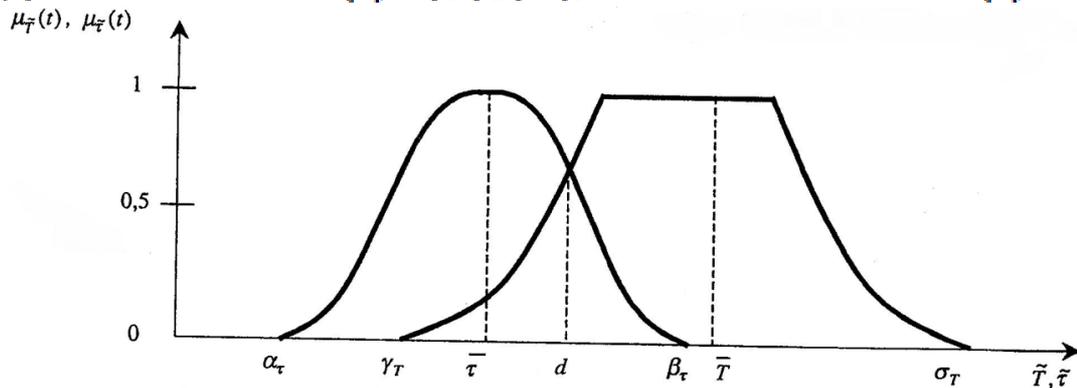


Рис. 2. Сравнение нечетких величин при $\tilde{\tau} \leq \tilde{T}$

Ответ на вопрос «может ли T быть больше τ ?» нечеткий и представляется как нечеткое подмножество множества {«да», «нет»}. Так как нас интересует, сможет ли оператор выполнить своевременно все действия по управлению, то достаточно получить ответ «да» для случая, когда $\tilde{\tau} \leq \tilde{T}$, и «нет», когда $\tilde{\tau} \geq \tilde{T}$. Для определенности на рис. 2 рассмотрен случай, когда $\tilde{\tau} \geq \tilde{T}$, что определяется соотношением $V(\tilde{\tau} \leq \tilde{T}) = \sup \min(\mu_{\tilde{\tau}}(x), \mu_{\tilde{T}}(y))$.

Отсюда получаем соотношение $V(\tilde{\tau} \leq \tilde{T}) = L(\frac{\bar{T} - \bar{\tau}}{\beta_{\tau} + \gamma_T})$, где $L(z)$ находится из таблиц.

Если эксперты считают эту степень возможности вычисления функции управления недостаточной, то необходимо:

- уменьшить число управляемых объектов;
- построить функции принадлежности $\mu_{\tilde{\tau}}(t)$ и $\mu_{\tilde{T}}(t)$;
- сравнить нечеткие величины $\tilde{\tau}$ и \tilde{T} и определить новое значение $V(\tilde{\tau} \leq \tilde{T})$.

Последовательно выполняя указанные расчеты, можно получить нечеткую оценку нормы управляемости.

Развитие аппарата теории нечетких множеств применительно к задаче синтеза алгоритмических процессов описано в [1].

Для синтеза алгоритмического процесса предлагается использовать понятие нечеткого вероятностного графа (НВГ). Под ним понимается конечный ориентированный граф, дуги которого взвешены нечеткими вероятностно-временными характеристиками переходов между вершинами (рис. 3).

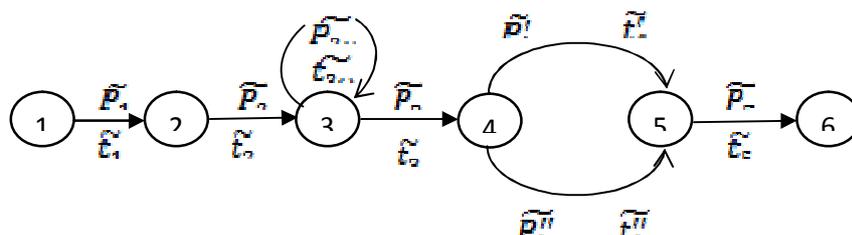


Рис. 3. Пример нечеткого алгоритма

Для определенности рассмотрим прямую постановку задачи синтеза алгоритма: найти такой вариант алгоритма, который обеспечивает минимальное время выполнения T при допустимой вероятности безошибочного выполнения алгоритма $P \geq P_{\text{доп}}$.

Для решения задачи синтеза алгоритма в такой постановке необходима методика расчета значений вероятности P и времени T для исходного НВГ с помощью его преобразования в эквивалентный НВГ с одной дугой и двумя вершинами - входной и конечной. Основными операциями такого преобразования являются объединение последовательных и параллельных дуг и удаление дуги-петли [4].

Выбор рационального варианта алгоритма деятельности оператора при нечеткой исходной информации включает следующие этапы:

1. Генерируются возможные алгоритмические структуры деятельности оператора ($i = \overline{1, n}$).

2. Определяются исходные данные по вероятностно-временным характеристикам каждого оператора $A_k, k = \overline{1, l}$ и логического условия $\omega_j, j = \overline{1, m}$. Исходные данные представляют собой нечеткие числа в α -уровневом разложении.

3. Отбрасываются заведомо неперспективные варианты выполнения операторов и логических условий, входящих в i -ю структуру.

4. Путем последовательного укрупнения графа i -й исходной структуры алгоритма до эквивалентного графа на основе использования формул преобразования определяются время реализации $\tilde{T}(A_i, \omega_i)$ и вероятность правильного выполнения алгоритма $\tilde{P}(A_i, \omega_i)$.

5. Отбрасываются варианты реализации процесса, для которых $\tilde{P}(A_i, \omega_i) < P_{\text{доп}}$.

6. Из оставшихся вариантов выбирается тот, у которого $\tilde{T}(A_i, \omega_i) \rightarrow \min$.

7. Выбранный вариант развертывается до уровня операторов и логических условий и записывается рациональный алгоритм.

Практическое применение предлагаемой методики синтеза алгоритма деятельности оператора на ранних этапах проектирования технических систем позволяет решить проблему исходных данных и получить достаточно эффективные алгоритмы.

Перспективным направлением исследований, связанным с моделированием операторской деятельности на ранних стадиях проектирования, является использование экспертной информации специалистов по эргономике о данном виде деятельности при рассмотрении алгоритмов деятельности на основе логико-лингвистических моделей [5].

Успешному внедрению системы эргономического обеспечения разработки и эксплуатации человеко-машинных комплексов (систем, изделий и технологий) будет способствовать открытие новых для гражданских специальностей учебных планов и программ по направлению подготовки «Системный анализ и управление» (профиль «Эргономика») и соответствующих кафедр, реализующих данное направление подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, Б.М. Имитационная модель для оценки комплексного влияния инженерно-психологических факторов на эффективность эргатической системы / Б.М. Герасимов, Г.В. Ложкин, С.В. Скрыль, В.В. Спасенников. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - Вып. 61. - С. 88-95.
2. Спасенников, В.В. Алгоритмическая оценка и моделирование деятельности операторов полуавтоматического сопровождения воздушных объектов / В.В. Спасенников // Техника, экономика, информация. Сер. «Эргономика». - 1984. - Вып. 1. - С. 10-17.
3. Спасенников, В.В. Обоснование нормативов работы операторов на основе метода группового учета аргументов / В.В. Спасенников // Техника, экономика, информация. Сер. «Эргономика». - 1986. - Вып. 1. - С. 62-67.
4. Спасенников, В.В. Анализ и проектирование групповой деятельности в прикладных психологических исследованиях / В.В. Спасенников. - М.: Ин-т психологии РАН, 1992. - 204 с.
5. Спасенников, В.В. Критерии охраны авторских прав создателей психодиагностических тестовых мето-

- дик / В.В. Спасенников // Психологический журнал. – 1994. – Т. 15. - № 1. - С. 123-127.
6. Спасенников, В.В. Инженерная психология как учебная дисциплина в процессе подготовки бакалавров и аспирантов по направлению «Системный анализ и управление» / В.В. Спасенников // Инновационные модели и методы в экономической психологии, эргономике, производственном менеджменте. - Брянск: БГТУ, 2013. - С. 110-114.
 7. Averchenkov, V.I. Formution of the color palette for content busef image retrieval automated systems / V.I. Averchenkov, V.K. Gulakov, V.V. Miroshnikov, L.A. Potapov, V.V. Spasennikov, A.O. Trubakov // World of Sciences Journal. - 2013. - P. 1-6.
 8. Wooldridge, M. Intelligent Agents: Theory and Practice / M. Wooldridge, N. Jennings // The Knowledge Engineering Review. - 1995. - Vol. 10. - №2. - P. 115-152.

Материал поступил в редколлегию 16.02.15.