УДК 004.896

Л.В. Нечволода

Донецкий национальный технический университет, Донецк

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ПЕРЕОСНАЩЕНИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКО-ВОЗМОЖНОСТНОГО ПОДХОДА

Разработана и исследована информационная технология обработки экспертных оценок для поддержки принятия решений в ходе технического переоснащения машиностроительного предприятия, обеспечивающая снижение модельной ошибки при аппроксимации функции цели аналитиков за счет использования свертки с нечеткой мерой. Выполнены имитационное моделирование и проверка эффективности организационно-алгоритмического комплекса.

Ключевые слова: *информационная технология, техническое переоснащение, функция полезности, нечеткая мера, свертка частных критериев, нечеткий интеграл, сеть Петри.*

Введение

Постановка проблемы. Техническое переоснащение машиностроительного предприятия (ТПМП) является процессом оптимизации (а в случае отсутствия необходимых математических моделей – адаптации) технологической подсистемы предприятия к условиям организационно-экономической среды его функционирования, изменяющимся требованиям к составу и качеству выпускаемой продукции. В ходе процесса переоснащения необходимо проводить трудоемкие процедуры анализа текущего состояния и функциональных возможностей оборудования, перспектив и возможностей его ремонта и модернизации, имеющихся на рынке технологического оборудования и технических решений с целью их дальнейшего приобретения или аренды [1, 2]. При этом мероприятия по ТПМП характеризуются рядом критериев, связанных с затратами на совершенствование узлов оборудования и реализуемых ними функций, что требует применения функционально-стоимостного анализа для оценки предпочтительности того или иного мероприятия. Вместе с тем оценки эффективности мероприятий по ТПМП являются результатом субъективного применения целевой функции (функции полезности) эксперта или лица, принимающего решения (ЛПР) к анализируемым вариантам [3, 4].

В рассматриваемой предметной области целевая функция ЛПР, как функция множества критериев качества рассматриваемых альтернатив, является слабо формализуемой. Методы поиска оптимального решения (выбора) часто требуют получения от ЛПР дополнительных сведений о частных критериях. В этих условиях наиболее целесообразным решением является свертка оценок отдельных критериев, согласованных по шкалам, с учетом весомости (важности) этих критериев. Таким образом, получаем задачу многокритериальной оптимизации, для которой важной проблемой является выбор метода свертки частных критериев [5]. Изначально в исследовании операций методы свертки применялись для формирования единого критерия выбора решения, отображающего глобальную функцию цели ЛПР. Так, под сверткой критериев в задачах многокритериальной оптимизации принято понимать любую их числовую функцию, являющуюся скалярной и неубывающей по бинарному отношению строгого порядка (например, по бинарному отношению доминирования по Парето). Тогда, если найти максимум такой функции на множестве векторов оценок альтернатив, то можно определить недоминируемый по Парето объект (альтернативу), а значит, наилучшее решение.

Однако анализ результатов использования аддитивных, мультипликативных сверток и их комбинаций показал существенное рассогласование между аддитивной по своей сути сверткой, как грубой моделью целевой функции эксперта, и реальными предпочтениями эксперта. Ошибка эта возникает вследствие неаддитивного характера учета и обработки данных в ходе мышления реального эксперта [6, 7].

Цель статьи. Целью данной работы является разработка и исследование информационной технологии обработки экспертных оценок для поддержки принятия решений в ходе технического переоснащения машиностроительного предприятия, обеспечивающей снижение объемов дополнительных данных, требуемых от экспертов и ЛПР, а также снижение модельной ошибки при аппроксимации функции цели аналитиков.

Изложение основного материала исследований

В данной работе для решений задач выбора и принятия решений в ходе ТПМП предлагается использовать нечетко-возможностный подход для

© Л.В. Нечволода

формализации и учета многокритериальной неопределенности [10], возникающей вследствие того, что отсутствует строгое доказательство предпочтительности альтернативы из числа недоминируемых в конкретных производственных условиях.

Общая структурно-функциональная схема информационной технологии на основе такого подхода приведена на рис. 1. Производственно-экономические данные о функционировании оборудования машиностроительного предприятия поступают группе аналитиков, которые на основе их изучения формируют перечень вариантов мероприятий по техническому переоснащению предприятия, а также набор критериев оценки и выбора вариантов таких мероприятий. Сформированные исходные данные для оценивания вариантов мероприятий передаются группе экспертов с использованием локальной компьютерной сети предприятия и клиент-серверного программного обеспечения. В предложенной информационной технологии эксперты выполняют парное сравнение вариантов в соответствии с методикой, предложенной Саати [8].

Поиск наилучшего варианта ТПМП выполняется по схеме смешанного экстремума [9]:

$$\tilde{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap ... \cap \tilde{G}_n = \\ = \{ \min_{i=1,...,n} \mu_{G_i}(P_1) \big/ P_1, ..., \min_{i=1,...,n} \mu_{G_i}(P_k) \big/ P_k \}. \quad (1)$$

Соответственно, наилучшим вариантом следует считать тот, у которого наибольшая степень принадлежности:

$$D = \arg\max \ \mu_D(P_1), \mu_D(P_2), ..., \mu_D(P_k) \ . \quad (2)$$

При неравновесных критериях, по которым ведется сравнение, степени принадлежности оцениваемых вариантов к нечеткому множеству $\tilde{D}$ находят так:

$$\mu_D(P_j) = \min_{i=1,...,n} \ \mu_{G_i}(P_j)^{\alpha_i}, \ j = 1,...,k, \quad (3)$$

где α_i – коэффициент относительной важности критерия G_i.

Теория нечеткой меры в предлагаемой информационной технологии обработки экспертных оценок и поддержки принятия решений используется для выполнения свертки оценок всех экспертов в соответствии со степенью их компетентности (мерой доверия к их решениям). При этом свертка с использованием нечеткого интеграла (также называемого fuzzy expected value) [11] и λ – нечеткой меры Сугэно [12] дает более адекватную усредненную величину оценок экспертов в условиях неопределенности, по сравнению с аддитивными и мультипликативными свертками. Адекватность обусловлена тем, что оценки получают от экспертов как от информационно-измерительных систем, алгоритмы работы которых в общем случае не удовлетворяют требованию аддитивности используемых мер.

Такая свертка производится как для оценок нечетких множеств удовлетворения анализируемого варианта критерию сравнения, так и для оценок степени важности критериев, которые используются для сравнения вариантов.

Обобщим задачу выбора варианта технического переоснащения и задачу учета степени доверия решению отдельного эксперта на задачу свертки частных показателей эффективности $G_i, i = 1,2,...,n$. Пусть оцениваются варианты u из множества возможных вариантов $\mathbf{U}$, а оценочная функция представлена в виде $h : \mathbf{G} \times \mathbf{U} \to 0,1$.

Присвоим степени важности отдельного критерия сравнения или степени компетентности отдельного эксперта обозначение

$$g_i (i = 1,2,...,n) \ (0 < g_i < 1).$$

Выполним построение λ – нечеткой меры Сугено, характеризующей вес такого рода показателей при принятии решений, в соответствии с условием нормировки. При этом мы определяем корни из интервала $(-1,+\infty)$ следующего полинома порядка $(n-1)$:

$$\prod_{i=1}^{n} \{(1 + \lambda g_i) - 1\} = 1. \quad (4)$$

Далее находим значение результирующего показателя на основе нечеткой свертки (интеграла) частных показателей:

$$e(u) = \int h \circ S_\lambda = \sup_{\alpha \in 0,1} \ \min \ \alpha, S_\lambda \ G_\alpha(u) \quad , \ (5)$$

где

$$G_\alpha(u) = \ G_i \,|\, h(G_i, u) \geq \alpha \ , \ u_j \in \mathbf{U},$$

$$S_\lambda \quad G_i, i \in M^1 \quad = \left[\prod_{i \in M^1} \ 1 + \lambda g_i \ \ -1 \right] \frac{1}{\lambda}.$$

Вариант мероприятия $u_{j0} \in \mathbf{U}$, предоставляющий обобщенному показателю эффективности максимальное значение, определяется из условия:

$$e(u_{j0}) = \max_{u_j \in \mathbf{U}} \ e(u_j) \quad (6)$$

После обработки данных обобщенное путем свертки решение группы экспертов, также как и лучший с точки зрения каждого эксперта вариант мероприятий по техническому переоснащению машиностроительного предприятия, поступают в виде рекомендаций лицу, принимающему решения. Передача в распоряжение ЛПР всей этой информации необходимо в связи с тем, что у ЛПР отдельные эксперты могут пользоваться более высоким авторитетом, чем степень их компетентности, определенная в рамках информационной технологии, и это дополнительно влияет на принятие окончательного решения.

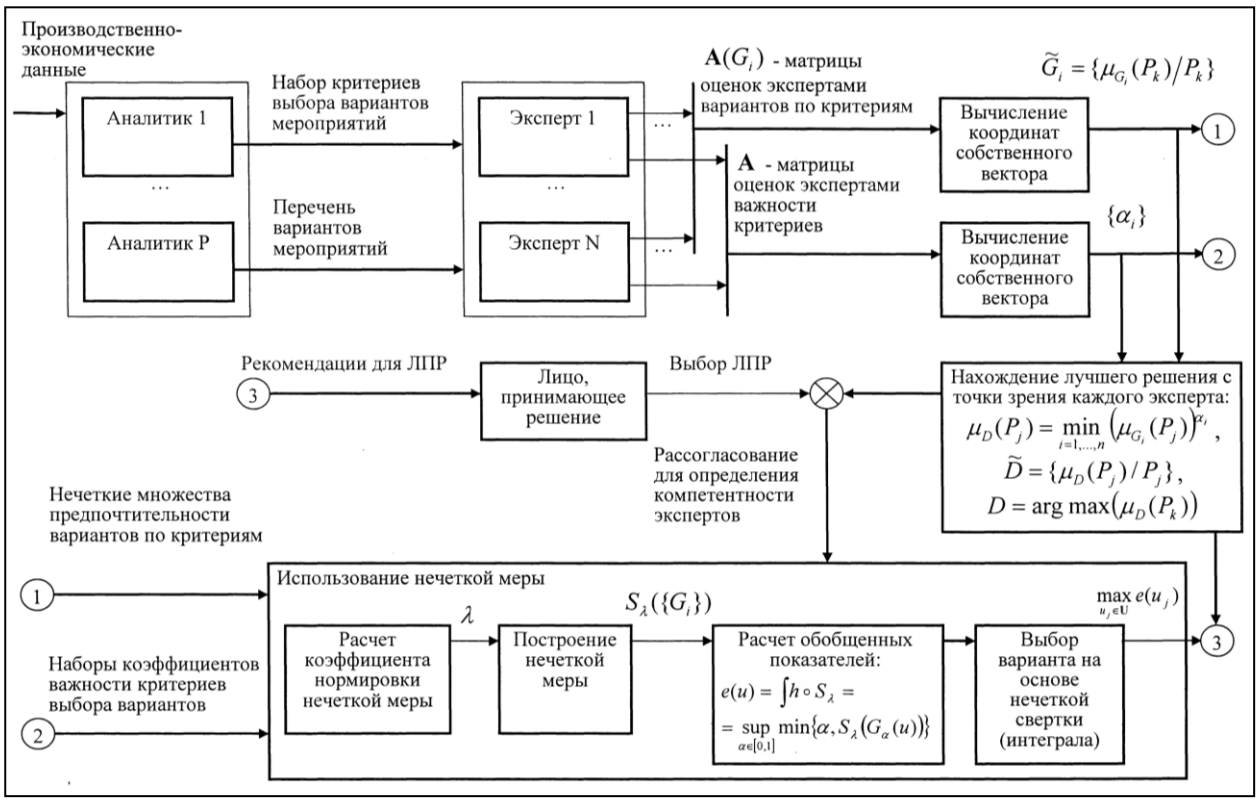

Рис. 1. Схема информационной технологии поддержки принятия решений по техническому переоснащению

Проведем исследование реализуемости предложенной информационной технологии в виде организационно-алгоритмического комплекса с использованием имитационной модели в виде сети Петри. Учитывая необходимость обеспечить реализацию информационной технологии в различных режимах, в зависимости от объемов дополнительных данных и объемов времени на проведение экспертизы, которыми располагают эксперты и ЛПР, а также исходя из требований снижения модельной ошибки при аппроксимации функции цели аналитиков, общая схема реализации информационной технологии, учитывая результаты проведенных ранее исследований, предложена в виде сложного алгоритмического комплекса, работающего в нескольких режимах при выполнении определенного набора условий. Для исследования принципиальной реализуемости предложенной информационной технологии в виде организационно-алгоритмического комплекса, проверки его функциональной пригодности для обеспечения информационной поддержки ЛПР в ходе принятия решений по ТПМП, в данной работе реализовано имитационное моделирование. В ходе вычислительного эксперимента действия пользователей, элементы информационной технологии и отдельные алгоритмы обработки данных представлены в виде сети Петри.

Как известно [13], Сеть Петри – это четвѐрка $N = (P, T, F, W)$, где $P = \{p_i\}$ – конечное множество вершин, именуемых позициями, $T = \{t_j\}$ – конечное множество вершин, именуемых переходами; отношение $F \subseteq P \times T \bigcup T \times P$ определяет множество дуг, соединяющих позиции и переходы, а отношение $W : F \to N$ задаѐт кратности дуг; N обозначает множество натуральных чисел. Таким образом, сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф. Маркировка сети – это отображение $\mu : P \to N_0$, определяющее распределение динамических элементов, именуемых фишками, на множестве позиций; N_0 – множество неотрицательных целых чисел. Маркированная сеть Петри – это пятѐрка $N = (P, T, F, W, \mu_0)$, где μ_0 – еѐ начальная маркировка.

Фундаментальное уравнение сети Петри может быть представлено в следующем виде:

$$x \cdot A = \Delta\mu, \qquad (7)$$

где $\Delta\mu = \mu - \mu_0$, x – вектор счѐта срабатываний переходов, A – транспонированная матрица инцидентности. Известно [14], что разрешимость фундаментального уравнения в неотрицательных целых числах является необходимым условием достижимости заданной маркировки. Решения системы (7) используются для построения искомых последовательностей срабатывания переходов.

Сеть Петри, в данной форме ее использования при проектировании информационной системы,

можно трактовать как описание требований к порядку функционирования организационно-программного комплекса. В позициях (узлах, состояниях) сети реализуются сложные алгоритмы интерфейса с пользователями и обработки данных. Присутствие меток (фишек, маркеров) в позициях означает успешное завершение соответствующих действий и возбуждение переходов. Переходы обеспечивают контроль условий дальнейшей передачи потоков данных на вход соответствующих подпрограмм или модулей, или генерирования последующих событий, необходимых по логике реализации прецедентов использования системы.

Все состояния комплекса, условия перехода из состояния в состояние, истоки (условия начала процессов обработки данных) и стоки представлены в виде сети Петри на рис. 2. На рисунке использованы следующие обозначения: p_i – позиции, t_j – переходы, при этом переходы t_1, t_3, t_8, t_{13} – истоки сети (набор условий), возбуждение которых порождает метки для начала функционирования, а переход t_{23} – сток, возбуждение которого означает получение результата – принятие ЛПР решения по выбору одного из альтернативных мероприятий по ТПМП.

Рассмотрение логической и процедурной модели информационной системы в виде сети Петри, в отличие от традиционной для UML диаграммы активностей, позволило проверить реализуемость большинства прецедентов, последовательность обработки данных в условиях нескольких возможных режимов функционирования, корректность наступления событий и т.п. Для этого, в соответствии с методами анализа динамики сетей Петри, был построен граф достижимых маркировок сети (из-за громоздкости не приведен) и выполнена проверка, показавшая следующее:

– все маркировки, с единичным или нулевым количеством меток в позициях, достижимы, т.е. все позиции могут получить метку и передать ее далее (потоки данных обеспечивают реализацию всех прецедентов использования и режимов обработки данных);

– данная сеть является потенциально живой, т.к. в графе присутствуют дуги, обозначенные символом каждого из переходов (каждый переход потенциально может сработать);

– данная сеть является живой, т.к. в графе отсутствуют терминальные вершины (при реализации алгоритмов и наступлении событий не возникают тупики);

– данная сеть является стойкой, т.к. все возбужденные переходы срабатывают в дальнейшем (нет переходов, срабатывание которых зависит от случайного выбора или нарушения синхронности вычислительных процессов).

– данная сеть является ограниченной, и это значит, что отсутствует накопление меток в какой-либо позиции.

Для моделирования построенной сети применялась моделирующая система Tina, разработанная в лаборатории LAAS во Франции (http://www.laas.fr/). Система имеет встроенный графический редактор сетей, а также содержит средства автоматического построения изображения по текстовому описанию сети, а также средства для перемещения элементов сети на рисунке, чтобы сделать более наглядной автоматически построенную сеть. Основным положительным качеством системы является наличие функций построения дерева достижимых и дерева покрывающих маркировок, а также средств структурного анализа, основанных на вычислении инвариантов позиций и переходов сети.

Разработанная и проанализированная сеть Петри позволила провести имитационное моделирование работы информационного комплекса в условиях, когда экспертные оценки генерировались программно, с учетом заранее установленного порядка ранжирования альтернатив, и перед обработкой были подвергнуты случайным отклонениям. Алгоритмы обработки матриц экспертных оценок реализованы в виде m-файлов на языке программирования в пакете MatLAB, реализация логики, обеспечивающей порядок и условия обработки в соответствии с сетью (рис. 2.), выполнена с помощью средства разработки Delphi. Взаимодействие компонентов моделирующего комплекса обеспечивалось с помощью технологии Component Object Model (COM), при этом MatLAB выполнял роль сервера, а проект Delphi – клиента в рамках данной технологии.

Адекватность предложенной информационной технологии обработки экспертных оценок сформулированной цели работы проверялась в ходе экспериментальных исследований с использованием программных компонентов, реализующих соответствующее алгоритмическое обеспечение [15, 16]. Эксперименты проводились в двух режимах. В первом режиме различия в функции цели эксперта формировались алгоритмическими средствами следующим образом. В матрицу вносились оценки, полученные от эксперта, имеющего точное представление о своих предпочтениях и сформировавшего согласованную транзитивную матрицу оценок. Затем в оценки вносились случайные отклонения, генерируемые по закону с нормальной функцией плотности распределения вероятностей. Во втором режиме группа экспертов из 3-5 человек, имеющих кооперативную договоренность о строгом предпочтении (порядке) на множестве альтернатив, проводила индивидуальную оценку набора альтернатив. В результатах экспертизы они заинтересованы не были, и, следовательно, не вносили манипулятивную составляющую в свои оценки.

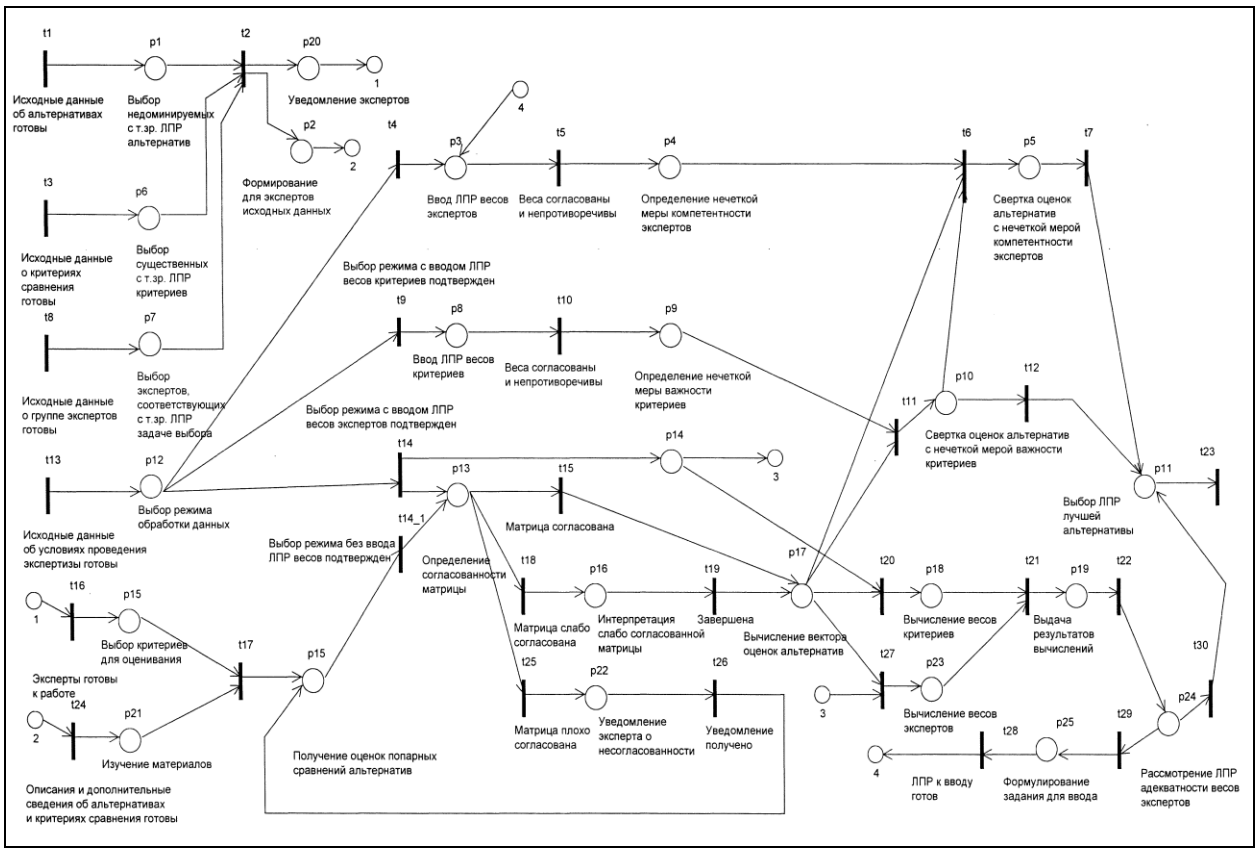

Рис. 2. Схема работы алгоритмического комплекса в виде сети Петри

При этом их функции полезности неопределенным и случайным образом не совпадали. Свертка оценок альтернатив проводилась в режимах линейной аддитивной свертки, свертки с использованием смешанного экстремума и путем нахождения нечеткого интеграла (свертки с нечеткой мерой). Анализ результатов показывает существенное повышение качества обработки экспертных оценок (на 7 – 15% по сравнению с наиболее близкой по качеству методикой) с использованием предлагаемой методики в рамках разработанной информационной технологии.

Выводы

1. Необходимыми условиями применения информационной технологии, обеспечивающей свертку оценок по частным критериям и свертку результатов оценок отдельных экспертов, являются следующие: снижение объемов дополнительных данных, требуемых от экспертов и ЛПР; снижение модельной ошибки при аппроксимации функции цели аналитиков.

2. Задачу принятия решения о наиболее предпочтительном мероприятии по ТПМП можно рассматривать как задачу многокритериальной оптимизации, в том ее варианте, когда оптимизируется слабо формализуемая целевая функция ЛПР как функция множества критериев качества рассматриваемых альтернатив. В этих условиях наиболее целесообразным решением является свертка оценок отдельных критериев, согласованных по шкалам, с учетом весомости (важности) этих критериев. Анализ результатов использования аддитивно-мультипликативных сверток и их комбинаций показал существенное рассогласование между аддитивной по своей сути сверткой, как грубой моделью целевой функции эксперта, и реальными предпочтениями эксперта.

3. В данной работе предложено использовать нечетко-возможностный подход для формализации и учета многокритериальной неопределенности: обобщенный показатель эффективности решения предлагается конструировать в виде нечеткой свертки, позволяющей учитывать нелинейный характер влияния частных показателей, с использованием нечеткого интеграла по нечеткой мере.

4. Выполненные экспериментальные исследования с моделью организационно-программного комплекса, реализующего предложенную информационную технологию, в виде сети Петри, а также программных компонентов, реализующих соответствующее алгоритмическое обеспечение, в том числе в условиях обработки реальных групповых экспертных оценок, подтвердили реализуемость предложенных режимов обработки и достижимость поставленных целей. Свертка оценок альтернатив проводилась в режимах линейной аддитивной свертки, свертки с использованием смешанного экстремума и путем нахождения нечеткого интеграла (свертки с

нечеткой мерой). Анализ результатов показал существенное повышение качества обработки экспертных оценок (на 7 – 15% по сравнению с наиболее близкой по качеству методикой) с использованием предлагаемой методики в рамках разработанной информационной технологии.

Список литературы

1. *Нечволода Л.В. Автоматизация управления развитием производственных фондов машиностроительного предприятия на основе информационных технологий / Л.В. Нечволода // Вісник ХНУ. – № 3, Т. 2. – 2008. – С. 255-259.*
2. *Нечволода Л.В. Информационные технологии и архитектура программного комплекса для автоматизации принятия решений по техническому переоснащению на машиностроительном предприятии / Л.В. Нечволода // Наукові праці ДонНТУ. Серія: "Обчислювальна техніка та автоматизація". Випуск 17 (148). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 104-111.*
3. *Кравченко В.И. Автоматизация поддержки принятия решений по модернизации оборудования / В.И. Кравченко, В.В. Зоненко, Л.В. Багрянова и др. // Вісник ДДМА. – 2006. – № 6. – С. 330-335.*
4. *Кибанов А.Я. Управление машиностроительным предприятием на основе функционально-стоимостного анализа / А.Я. Кибанов. – М., 1991. – 256 с.*
5. *Подиновский В.В. Паретооптимальные решения многокритериальных задач. / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 1982. – 342 с.*
6. *Недашковская Н.И. Методология обработки нечеткой экспертной информации в задачах предвидения. Ч.1 / Н.И. Недашковская, Н.Д. Панкратова // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 2. – С. 40-55.*
7. *Недашковская Н.И. Методология обработки нечеткой экспертной информации в задачах предвидения. Ч.2 / Н.И. Недашковская, Н.Д. Панкратова // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 3. – С. 49-63.*
8. *Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 275 с.*
9. *Ротштейн А.П. Нечеткий ногокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений / А.П. Ротштейн, С.Д. Штовба // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С. 150-154.*
10. *Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. / Д Дюбуа, А. Прад – М.: Радио и связь, 1990. – 245 с.*
11. *Бочарников В.П. Fuzzy-технология. Математические основы. Практика моделирования в экономике. / В.П. Бочарников. – СПб.: Наука, 2001. – 328 с.*
12. *Павлов А.Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов. – ГУАП-СПб., 2006. – 72 с.*
13. *Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. / Дж. Питерсон. – М. Мир, 1984. – 264 с.*
14. *Зайцев Д.А. Решение фундаментального уравнения сетей Петри в процессе композиции функциональных подсетей / Д.А. Зайцев // Искусственный интеллект. – № 1. – 2005. – С. 59-69.*
15. *Нечволода Л.В. Совершенствование информационной технологии обработки экспертных оценок при выработке стратегии технического переоснащения машиностроительного предприятия. / Л.В. Нечволода // Сучасна інформаційна Україна: матеріали доповідей конференції. Донецьк: ДІШІ, 2010. – Т.1. – С. 120-123.*
16. *Нечволода Л.В. Информационная технология обработки экспертных оценок при техническом переоснащении машиностроительного предприятия / Л.В. Нечволода // Research and technology – step into the future. Scientific & Research Journal of Transport and Telecommunication Institute (Riga). – 2009. – Vol. 4, No 4. – P. 35-37.*

Поступила в редколлегию 10.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.О. Скобцов, Донецкий национальный технический университет, Донецк.

РОЗРОБКА Й ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ПЕРЕОСНАЩЕННІ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКО-МОЖЛИВОГО ПІДХОДУ

Л.В. Нечволода

Розроблено й досліджено інформаційну технологію обробки експертних оцінок для підтримки прийняття рішень у ході технічного переоснащення машинобудівного підприємства, яка забезпечує зниження модельної помилки при апроксимації функції мети аналітиків за рахунок використання згортки з нечіткою мірою. Виконано імітаційне моделювання й перевірку ефективності організаційно-алгоритмічного комплексу.

Ключові слова: *інформаційна технологія, технічне переоснащення, функція корисності, нечітка міра, згортка приватних критеріїв, нечіткий інтеграл, мережа Петрі.*

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF EXPERT ESTIMATIONS TREATMENT INFORMATION TECHNOLOGY AT THE TECHNICAL RETOOLING OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISE WITH THE USE OF FUZZY-PROBABILITY APPROACH

L.V. Nechvoloda

Information technology of expert estimations treatment is worked out and investigational for support of making decision during the technical retooling of machine-building enterprise, providing the decline of model error during approximation of analysts goal function due to the use of convolution with an fuzzy measure. An imitation modelling and verification of organizationally-algorithmic complex efficiency are executed.

Keywords: *information technology, technical retooling, function of utility, unclear measure, package of private criteria, unclear integral, network of Petri.*