ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 1, с. 70–79

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Цифровая технология организации централизованных закупок

 Н.А. Алейникова, М.Г. Матвеев

Н.А. Алейникова,
Воронежский государственный университет, Воронеж; e-mail: balbashovan@mail.ru

М.Г. Матвеев,
Воронежский государственный университет, Воронеж; e-mail: mgmatveev@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.08.2021

Аннотация. Статья посвящена разработке моделей для обеспечения цифровой трансформации процессов в системах корпоративных и государственных закупок. В частности, рассматривается решение задачи многокритериального выбора в экономических системах, описываемых трехдольным графом «производитель — ресурс — потребитель». Предложена математическая модель оптимального распределения однородного ресурса от поставщиков к потребителям в условиях централизованной схемы закупок, которая сводится к транспортной задаче с промежуточными пунктами. Оптимизация направлена на достижение максимального соответствия по совокупности технических и коммерческих характеристик однородного ресурса. Для формулирования требований по этим характеристикам потребителю предлагается использовать нечеткие переменные, что дает ему гибкий механизм описания требований к ресурсу с учетом его предпочтений. Предложен оператор агрегирования локальных соответствий по совокупности характеристик в виде дискретного интеграла Шоке с нечеткой мерой. На примере производственного оборудования показано, как можно формализовать параметры модели, а затем оптимизировать и автоматизировать процесс распределения оборудования с помощью решения транспортной задачи с промежуточными пунктами так, чтобы было достигнуто максимальное соответствие его характеристикам. Разработанные модели и алгоритмы могут быть использованы при создании информационных сервисов на электронных торговых площадках, в том числе и государственных закупок.

Ключевые слова: цифровая трансформация; централизованная система закупок; однородный ресурс; лингвистические и нечеткие переменные; агрегирование; интеграл Шоке; нечеткая мера; многокритериальный выбор; транспортная задача с промежуточными пунктами.

Классификация JEL: M15.

Цитирование: **Алейникова Н.А., Матвеев М.Г.** (2022). Цифровая технология организации централизованных закупок // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 70–79. DOI: 10.31857/S042473880018980-7

ВВЕДЕНИЕ

В практических приложениях часто встречаются социально-экономические системы, описываемые трехдольными графами, в частности к ним относятся закупки однородных производственных ресурсов. Эти системы включают в себя три непересекающихся множества вершин (элементов). Внутреннее множество интерпретируется как множество взаимозаменяемых типов однородного ресурса. Элементы двух внешних множеств ассоциированы с производителями и потребителями ресурса: $V^1=\{v_i^1\},\ i=1,\dots,n$ — производители, $V^2=\{v_j^2\},\ j=1,\dots,m$ — ресурсы, $V^3=\{v_k^3\},\ k=1,\dots,d$ — потребители. На рис. 1 показана структурная схема такой системы. Множество однородных, взаимозаменяемых ресурсов представлено разнообразием значений своих технических характеристик — x^2 (размер, мощность, производительность и т.п.) и коммерческих характеристик — y^2 (цена, срок и условия поставки и т.п.). На этом множестве производители формируют подмножества своих предложений с характеристиками $(x^1; y^1)$, а потребители — свой спрос $(x^3; y^3)$. Чем больше мощность пересечения подмножеств спроса и предложения, тем эффективнее будет работать система закупок. Состав и наименования характеристик спроса и предложения идентичны и определяются единым товарным классификатором.

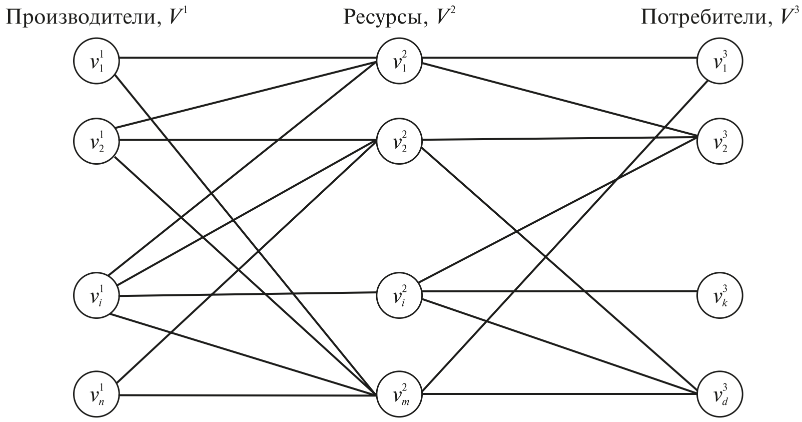

Рис. 1. Структурная схема трехдольного графа «производители — ресурсы — потребители»

Наиболее распространенной моделью закупок является выбор производителя $v_i^1 \in V^1$ для каждого потребителя $v_k^3 \in V^3$ так, чтобы обеспечить наилучшее значение некоторого коммерческого (экономического) критерия, $Q(y_{i*}^1) \underset{y_{i*}}{\rightarrow} opt$ при заданных ограничениях на технические характеристики ресурса, $\phi(x_i^1) \geq 0$. Варианты моделей выбора представлены, например, в работах (Amin, Razmi, 2009; Amin, Zhang, 2012; Mendoza, Ventura, 2011; Mendoza, Ventura, 2012; Moosavi, Ebrahimnejad, 2017). В этих статьях переменная y_{i*}^1 рассматривается как часть совокупности коммерческих характеристик, и обычно это цена. Решается задача скалярной оптимизации, в соответствии с которой предложения производителей на множестве ресурсов формируют допустимые по необходимым для потребителя техническим характеристикам подмножества, на которых выбирается наиболее эффективный производитель по коммерческому критерию.

В статье предлагается переход к многокритериальной оптимизации, направленной на выбор таких подмножеств $(x^2; y^2)$ на множестве V^2, характеристики которых максимально соответствуют коммерческим требованиям $(x^1; y^1)$ и техническим требованиям $(x^3; y^3)$. Многокритериальная оптимизация позволит получить более эффективное решение. Для этого необходимо разработать модель задачи многокритериального выбора в условиях централизованной схемы закупок.

1. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СХЕМЫ ЗАКУПОК

Для формирования модели многокритериального выбора целесообразно использовать централизованную схему закупок с единой системой выбора производителей и распределением выбранных ресурсов по потребителям, позволяющую получать оптимальных производителей одновременно для всех потребителей. В такой схеме на вход системы закупок поступают заявки от потребителей ресурса с описанием допустимых значений определенного состава технических характеристик и необходимого количества ресурса. Все заявки централизованно собираются в единый закупочный пул, представленный объединением допустимых значений технических характеристик, а также коммерческих характеристик, определяемых централизованным закупщиком.

Производители формируют некоторое количество предлагаемых ресурсов с указанием их конкретных технических и коммерческих характеристик, аналогичных по составу характеристикам закупочного пула.

Принцип решения поставленной задачи основан на парных сравнениях значений характеристик спроса и предложения, максимизации их соответствия по аналогии с работами (Roth, Rothblum, 1977; Roth, 2003; Будяков, Гетманова, Матвеев, 2017, с. 26–34) на основе анализа пересечений подмножеств предложения производителей $(x^1; y^1)$ и спроса потребителей $(x^3; y^3)$. Анализ сводится к матчингу (парному выбору) характеристик и вычислению степени их соответствия. В этом случае скалярный экономический критерий заменяется на многокритериальные векторы соответствий технических и коммерческих характеристик. При заданном количестве закупок должны выбираться такие ресурсы $v^2 \in V^2$, которые обеспечат максимальное соответствие по коммерческим и техническим требованиям.

Для осуществления многокритериального выбора необходимо построить математическую модель, предварительно выполнив формализацию ее параметров.

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Наличие множества типов однородных, взаимозаменяемых ресурсов обуславливает задание технических и коммерческих характеристик спроса в виде интервальных значений с дифференциацией предпочтений каждого значения. Таким образом, особенностью предлагаемой формализации будет построение функции, отображающей степень предпочтения, для каждого интервала. Наиболее удобным формальным языком для описания таких требований является язык нечетких множеств (Матвеев, 2021, с. 105–112).

Полагаем, что потребители и централизованный закупщик задают требования к ресурсам в виде векторов $\tilde{x}^3; \tilde{y}^3$, компонентами которых служат нечеткие переменные. Каждая нечеткая переменная $\tilde{x}_l^3$ и $\tilde{y}_s^3$ $(l = 1, \ldots, p;\ s = 1, \ldots, r)$ имеет кусочно-линейные функции принадлежности $f(\tilde{x}_l^3) \in [0;1]$ и $f(\tilde{y}_s^3) \in [0;1]$, носители которых отражают возможные допустимые диапазоны значений характеристик, а значения функции — их предпочтения. Для дискретных значений носителя функция принадлежности будет иметь табличный вид.

Множество типов однородного ресурса j из V^2 будем описывать векторами технических и коммерческих характеристик: $x_j = (x_j^1; \ldots; x_j^p)$ и $y_j = (y_j^1; \ldots; y_j^r)$, $j = 1, \ldots, m$.

Степень удовлетворения предложения спросу по каждой характеристике будем называть локальным соответствием. Мера локального соответствия пары «ресурс v_j^2 — потребитель v_k^3» по технической характеристике l вычисляется путем подстановки четкого значения координаты l вектора x_j в функцию принадлежности $f(\tilde{x}_l^3)$. Обозначим такую меру через $\mu_{jk}^l \in [0;1]$, $l = 1, \ldots, p$. Мера локального соответствия пары «поставщик v_i^1 — ресурс v_j^2» по коммерческой характеристике s определяется путем подстановки четкого значения координаты вектора y_j в функцию принадлежности $f(\tilde{y}_s^3)$. Обозначим эту меру через $\eta_{ij}^s \in [0;1]$, $s = 1, \ldots, r$.

При распределении ресурсов от производителей к потребителям необходимо принимать во внимание, что характеристики могут быть неравнозначными при принятии решения — какие-то могут оказывать большее влияние на выбор определенного ресурса, другие быть менее значимыми. В этом случае можно, например, экспертным путем назначить веса соответствий по каждой характеристике, которые будем обозначать $\phi(x_l^3)$, $\varphi(\tilde{\mathrm{K}}_j^2)$ или $\varphi(\tilde{\mathrm{K}}_j^1)$, $l = 1, \ldots, p;\ s = 1, \ldots, r$.

Следующей задачей, которую необходимо решить для формирования оптимальных отношений между элементами множеств V^1, V^2 и V^3, является определение агрегированной по всем характеристикам степени соответствия требованиям с учетом неравнозначности каждого критерия

$$\mu_{jk} = \mathrm{agr}\{\mu_{jk}^l\},\ \eta_{ij} = \mathrm{agr}\{\eta_{ij}^s\}, \tag{1}$$

где agr — оператор агрегирования.

Оператором агрегирования называют функцию от N переменных (критериев) $\mathrm{agr}: \bigcup_{n \in N} [0,1]^n \to [0,1]$, удовлетворяющую ряду обязательных условий (Yager, 1988; Леденева, Подвальный, 2016) на множестве произвольных $x, y \in [0;1]$:

1) $\mathrm{agr}(x) = x$;

2) $\mathrm{agr}(0, \ldots, 0) = 0$ и $\mathrm{agr}(1, \ldots, 1) = 1$;

3) $\mathrm{agr}(x_1, \ldots, x_N) \le \mathrm{agr}(y_1, \ldots, y_N)$, если $(x_1, \ldots, x_N) \le (y_1, \ldots, y_N)$.

Оператор агрегирования также может обладать рядом дополнительных свойств в зависимости от области применения, которые описаны в (Detyniecki, 2000). Поскольку в нашем случае переменными оператора агрегирования являются технические и коммерческие характеристики, то важно выполнение следующих свойств. Во-первых, необходимо учитывать, что полное локальное несоответствие хотя бы по одному параметру ($\mu_{jk}^l = 0$ или $\eta_{ij}^s = 0$) влечет полное агрегированное несоответствие. Также полное агрегированное соответствие ($\mu_{jk}=1$ или $\eta_{ij}=1$) может достигаться только при полном локальном соответствии по всем характеристическим параметрам ($\mu^l_{jk}=1,\ l=1,\dots,p$ или $\eta^s_{ij}=1,\ s=1,\dots,r$). Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие характеристик между собой. Некоторые характеристики при объединении могут усилить влияние друг друга на процесс принятия решения, а другие, наоборот, ослабить. Это свойство в (Detyniecki, 2000) описано как «усиление» (reinforcement). В результате может не выполняться свойство аддитивности весов характеристик при объединении последних. Если, например, характеристики неравнозначны при выборе поставщика и ресурса и каждой был назначен вес $\phi(x_l)$ или $\phi(y_s)$, то вес совокупности двух критериев (например, $\phi(x_{l1}\cup x_{l2})\neq\phi(x_{l1})+\phi(x_{l2})$) может быть как больше, так и меньше $(\phi(x_{l1})+\phi(x_{l2}))$. Аналогично, это может наблюдаться при объединении большего числа характеристик. Еще одно естественное свойство — это «компенсирующее» свойство, заключающееся в том, что $\min\limits_{i=1,\dots,N}(x_i)\le \operatorname{agr}(x_1,\dots,x_N)\le \max\limits_{i=1,\dots,N}(x_i)$.

В качестве оператора агрегирования предлагается дискретный интеграл Шоке по нечеткой мере (Detyniecki, 2000; Матвеев, 2021), который применяется, когда на результат агрегирования влияет величина каждого из критериев (характеристик) и удовлетворяет всем перечисленным выше свойствам, в том числе позволяет учитывать взаимодействие критериев друг с другом. Последнее возможно благодаря тому, что вычисление интеграла Шоке основано на λ-нечеткой мере Сугено, которая выражает субъективный вес или значимость каждого подмножества критериев и определяется следующим образом (Ягер, 1986; Нечеткие множества..., 1986):

$$\phi\left(\left\{x_j,\ j\in M^1\right\}\right)=\left[\prod\nolimits_{j\in M}\left(1+\lambda\phi_j\right)-1\right]/\lambda,\quad M^1\subseteq M, \tag{2}$$

где ϕ_j — коэффициенты важности (веса) отдельно взятых частных показателей эффективности при построении обобщенного показателя, в нашем случае — это веса технических или коммерческих характеристик; M — множество индексов характеристик. В (Нечеткие множества..., 1986) приводится уравнение, из которого можно найти единственное значение параметра λ:

$$\lambda+1-\prod\nolimits_{j\in M}\left(1+\lambda\phi_j\right)=0, \tag{3}$$

удовлетворяющего условиям $\lambda>-1,\ \lambda\neq 0$. Тогда интеграл Шоке для нахождения агрегированного соответствия μ_{jk} рассчитывается по формуле

$$\mu_{jk}=\operatorname{agr}\left(\mu^1_{jk},\dots,\mu^p_{jk}\right)=\begin{cases}\sum\limits_{l=1}^{p}\left(\mu^{(l)}_{jk}-\mu^{(l-1)}_{jk}\right)\phi\left(X/f(x)\ge\mu^{(l)}_{jk}\right)\forall\mu^{(l)}_{jk}\neq 0,\\ 0-\text{в противном случае,}\end{cases} \tag{4}$$

где $\mu^{(1)}_{jk},\dots,\mu^{(p)}_{jk}$ — перестановка элементов $\mu^1_{jk},\dots,\mu^p_{jk}$ такая, что $\mu^{(1)}_{jk}\le\mu^{(2)}_{jk}\le\dots\le\mu^{(p)}_{jk}$, $\mu^{(0)}_{jk}=0$; X — подмножество множества технических характеристик, $x\in X$.

Нахождение агрегированных соответствий η_{ij} происходит аналогично:

$$\eta_{ij}=\operatorname{agr}\left(\eta^1_{ij},\dots,\eta^r_{ij}\right)=\begin{cases}\sum\limits_{s=1}^{r}\left(\eta^{(s)}_{ij}-\eta^{(s-1)}_{ij}\right)\phi\left(X/f(x)\ge\eta^{(s)}_{ij}\right)\forall\eta^{(s)}_{ij}\neq 0,\\ 0-\text{в противном случае.}\end{cases} \tag{5}$$

Таким образом, получаем две матрицы агрегированных соответствий ресурсов по техническим характеристикам $(\mu_{jk})_{j=1,\dots,n;k=1,\dots,d}$ и производителей по коммерческим характеристикам $(\eta_{ij})_{i=1,\dots,m;j=1,\dots,n}$.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Пусть заданы ограничения на количество ресурсов у производителей и потребности в ресурсе у потребителей. Тогда задача многокритериального выбора, обозначенная в разд. 1, может быть представлена в виде транспортной задачи с промежуточными пунктами (Таха, 2001), где целевыми коэффициентами будут элементы матриц агрегированных соответствий — μ_{jk} и η_{ij}.

Обозначим через u_{ij} количество ресурсов типа j, которые поступают от производителя i, через υ_{jk} — число ресурсов типа j, назначенных потребителю k. Математическая модель транспортной задачи для оптимального распределения ресурсов от производителей по потребителям примет вид:

$$a\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\eta_{ij}u_{ij}+\left(1-a\right)\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{d}\mu_{jk}\upsilon_{jk}\to\max,$$

$$\begin{cases}\sum_{j=1}^{m}\upsilon_{jk}=\nu_{k}, \quad k=1,\ldots,d,\\ \sum_{i=1}^{n}u_{ij}=\sum_{k=1}^{d}\upsilon_{jk}, \quad j=1,\ldots,n,\\ u_{ij}\le w_{ij}, \quad i=1,\ldots,m, j=1,\ldots,n,\end{cases} \tag{6}$$

$$u_{ij},\upsilon_{jk}\in\left\{0,R^{+}\right\}, \quad i=1,\ldots,m,\ j=1,\ldots,n,\ k=1,\ldots,d,$$

где w_{ij} — количество ресурса вида j у производителя i; v_k — потребности потребителя k в ресурсе; a — параметр, $a\in[0,\ 1]$. Чем ближе параметр a к 0, тем важнее при распределении ресурсов и выборе производителей технические требования, чем ближе к 1 — важнее коммерческие требования.

Первая совокупность ограничений модели (6) формализует условие, заключающееся в том, что количество однородных ресурсов, которые поступают от производителей, должно полностью удовлетворить потребности потребителя k ($k=1,\ldots,d$).

Вторая совокупность ограничений связана с тем, что суммарное количество однородного ресурса j, полученного от всех производителей, должно быть полностью распределено по потребителям.

Перед решением задачи (6) необходимо проверить дополнительное условие $\sum_{k=1}^{d}\nu_{k}\le\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}w_{ij}$, так как важно не допустить дефицита ресурсов.

4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА

Рассмотрим упрощенную задачу выбора производителей однородного оборудования с последующим его распределением по потребителям, а в качестве ресурса — производственное оборудование. Будем считать, что три компании, являющиеся структурными единицами холдинга, подготовили в централизованную закупочную организацию свои заявки на насосы. В каждой заявке указаны технические требования к насосам, представленные компонентами нечеткого вектора $(\tilde{x}_{k1}^{3},\ldots,\tilde{x}_{k5}^{3})$, $k=1,2,3$, и указано требуемое число насосов ν_k (табл. 1). Компоненты вектора заданы в виде нормированных нечетких чисел с треугольной функцией принадлежности:

$$f_{\tilde{x}_{kl}^{3}}(x)=\begin{cases}\left(x-a_{kl}\right)/\left(m_{kl}-a_{kl}\right),\ x\in\left[a_{kl};m_{kl}\right],\\ \left(b_{kl}-x\right)/\left(b_{kl}-m_{kl}\right),\ x\in\left[m_{kl};b_{kl}\right],\\ 0-\text{в остальных случаях},\end{cases} \tag{7}$$

где a_{kl} — левая граница значений соответствующей компоненты нечеткого вектора, b_{kl} — правая граница, m_{kl} — мода, $l=1,\ldots,5$. Значения функции принадлежности определяют степень соответствия значения характеристики требованиям заявки.

Закупочная организация предъявляет к производителям коммерческие требования $(\tilde{y}_{1}^{3},\tilde{y}_{2}^{3})$ (табл. 2). Компоненты вектора коммерческих требований заданы также в виде нечетких чисел с треугольной функцией принадлежности:

$$f_{\tilde{y}_{s}^{3}}(x)=\begin{cases}\left(x-a_{s}\right)/\left(m_{s}-a_{s}\right), \quad x\in\left[a_{kl};m_{kl}\right],\\ \left(b_{s}-x\right)/\left(b_{s}-m_{s}\right), \quad x\in\left[m_{kl};b_{kl}\right],\\ 0-\text{в остальных случаях},\end{cases} \tag{8}$$

где a_s — левая граница значений соответствующей компоненты нечеткого вектора, b_s — правая граница, m_s — мода. Типы насосов с конкретными значениями технических характеристик приведены в табл. 3. Наличие насосов у разных поставщиков показано в табл. 4.

Таблица 1. Технические требования к насосам

Параметр функции принадлежности	Расход, $м^3$/ч	Напор, м	Частота вращения, об./мин.	Мощность электродвигателя, КВт	Масса, кг	Число насосов, ν_k
Заявка 1						5
a_{1l}	420	30	1000	55	1750	
m_{1l}	630	90	1300	315	2000	
b_{1l}	630	90	1500	315	2760	
Заявка 2						7
a_{2l}	520	50	1100	150	1500	
m_{2l}	750	80	1500	280	1800	
b_{2l}	750	90	1750	300	2500	
Заявка 3						4
a_{3l}	500	70	1000	200	2000	
m_{3l}	600	100	1200	280	2350	
b_{3l}	650	120	1300	300	2500	

Таблица 2. Коммерческие требования к насосам

Параметры функции принадлежности	Цена, у.е., $\tilde{y}_1^3$	Срок поставки, дни, $\tilde{y}_2^3$
a_s	500	70
m_s	600	100
b_s	650	120

Таблица 3. Технические характеристики типов насосов

Тип насоса	Расход, $м^3$/ч	Напор, м	Частота вращения, об/мин.	Мощность электродвигателя, КВт	Масса, кг
1	550	82	1200	270	2400
2	620	85	1250	210	2490
3	600	80	1280	220	2100

Таблица 4. Число насосов у производителей

Насос, j	Производители, i			Итого
	1	2	3	
1	2	4	6	12
2	7	0	3	10
3	5	4	2	11
Итого	14	8	11	33

Следовательно, предлагается 33 взаимозаменяемых насоса, а потребителям надо 16, максимально соответствующих техническим и коммерческим требованиям. В табл. 5 указаны цены на насосы и сроки, в которые поставщики могут их поставить.

Локальные соответствия насосов по 5 техническим и по 2 коммерческим требованиям легко найти, подставив значения технических и коммерческих характеристик из табл. 3 и 5 в функции (7) и (8) соответственно. Параметры функций (7) и (8) определяются из табл. 1 и 2. Например, локальные соответствия насосов техническим требованиям заявки № 1 (μ_{j1}^l, $l = 1, \ldots, 5$) приведены в табл. 6.

Вычисление агрегированных соответствий $(\mu_{jk})_{j=1,2,3;k=1,2,3}$ и $(\eta_{ij})_{i=1,2,3;j=1,2,3}$ производится с помощью интеграла Шоке по формулам (4) и (5) соответственно.

Предположим, что технические критерии неравнозначны для принятия решения о выборе насоса. Пусть эксперт назначил следующие весовые коэффициенты важности каждого критерия: $\phi_1 = 0,2$, $\phi_2 = 0,7$, $\phi_3 = 0,68$, $\phi_4 = 0,4$, $\phi_5 = 0,1$.

Агрегирование с помощью интеграла Шоке по техническим характеристикам подробно рассмотрим на примере насоса 1. Упорядочим технические характеристики насоса 1 по мере возрастания

Таблица 5. Коммерческие характеристики насосов

Производитель	Насос					
	1		2		3	
	Цена	Срок поставки	Цена	Срок поставки	Цена	Срок поставки
1	510	90	600	80	660	130
2	580	75	515	140	620	90
3	540	110	542	100	580	110

Таблица 6. Локальные соответствия насосов техническим требованиям заявки № 1

Заявка	Расход, $м^3/ч$	Напор, м	Частота вращения, об./мин.	Мощность электродвигателя, КВт	Масса, кг
Насос 1, $j = 1$	0,619	0,867	0,667	0,827	0,474
Насос 2, $j = 2$	0,952	0,917	0,833	0,596	0,355
Насос 3, $j = 3$	0,857	0,833	0,933	0,635	0,868

их локального соответствия соответствующим требованиям (см. строку для насоса 1 в табл. 6). Результаты упорядочивания приведены в табл. 7.

Технические характеристики по возрастанию значений локальных соответствий приведены в табл. 8. Для нахождения параметра λ для λ-меры Сугено было решено уравнение (2) (с учетом $\lambda > -1$, $\lambda \neq 0$):

$$\lambda + 1 - (1 + 0,2\lambda)(1 + 0,7\lambda)(1 + 0,68\lambda)(1 + 0,4\lambda)(1 + 0,1\lambda) = 0$$

и найден корень $\lambda = -0,945$. В соответствии с правилом (1) рассчитаны значения нечеткой меры, записанные в последней строке табл. 8. Например, значения нечеткой меры

$$\phi(X / f(x) \geq 0,474) = \phi(1,\ldots,5) = \left[(1 - 0,945 \times 0,2)\ldots(1 + 0,945 \times 0,1) - 1\right] / (-0,945) = 1,$$

$$\phi(X / f(x) \geq 0,619) = \phi(1,\ldots,4) =$$

$$= \left[(1 - 0,945 \times 0,2)(1 - 0,945 \times 0,7)\ldots\times(1 - 0,945 \times 0,4) - 1\right] / (-0,945) = 0,994,$$

и т.д. Тогда агрегированное соответствие первого насоса заявке № 1 по техническим характеристикам:

$$\mu_{11} = \mu_{11}^5 \phi(1,\ldots,5) + (\mu_{11}^1 - \mu_{11}^5)\phi(1,\ldots,4) + (\mu_{11}^3 - \mu_{11}^1)\phi(2,3,4) + (\mu_{11}^4 - \mu_{11}^3)\phi(4,2) + (\mu_{11}^2 - \mu_{11}^4)\phi(2) =$$

$$= 0,474 \times 1 + (0,619 - 0,474) \times 0.994 + (0,667 - 0,619) \times 0.979 +$$

$$+ (0,827 - 0,667) \times 0.836 + (0,867 - 0,827) \times 0,700 = 0,827.$$

Значения остальных элементов матрицы $(\mu_{jk})_{j=1,2,3;k=1,2,3}$ приведены в табл. 9, значения элементов матрицы $(\eta_{ij})_{j=1,2,3;k=1,2,3}$ — в табл. 10.

Таблица 7. Упорядоченные по локальным соответствиям технические характеристики насоса 1

Характеристика	№ характеристики				
	1	2	3	4	5
Ранги критериев по локальным соответствиям	4	1	3	2	5
Локальные соответствия	0,619	0,867	0,667	0,827	0,474

Таблица 8. Значения меры Сугено

Характеристика	№ характеристики, l				
	5	1	3	4	2
Локальные соответствия, $\mu_{11}^{(l)}$	0,474	0,619	0,667	0,827	0,867
Веса критериев, ϕ_l	0,1	0,2	0,68	0,4	0,7
$\phi(X / f(x) \geq \mu_{jk}^{(l)})$	$\varphi(1,\ldots,5) = 1$	$\varphi(1,\ldots,4) = 0,994$	$\varphi(2, 3, 4) = 0,979$	$\varphi(4, 2) = 0,836$	$\varphi(2) = 0,700$

Таблица 9. Значения интеграла Шоке по техническим характеристикам

μ_{jk}	Заявка, k		
Насос, j	1	2	3
1	0,826	0,756	0,886
2	0,892	0,475	0,503
3	0,897	0,849	0,443

Таблица 10. Значения интеграла Шоке по коммерческим характеристикам (вес первого критерия 0,8, второго 0,4)

η_{ij}	Производитель, i		
Насос, j	1	2	3
1	0,327	0,420	0,440
2	0,867	0	0,652
3	0	0,627	0,740

Теперь можно переходить к решению транспортной задачи (6). Математическая модель задачи имеет вид:

$$\begin{gathered} a\left(0,327u_{11}+0,867u_{12}+0,42u_{21}+0,627u_{23}+0,44u_{31}+0,652u_{32}+0,74u_{33}\right)+ \\ +\left(1-a\right)\left(0,826\upsilon_{11}+0,756\upsilon_{12}+0,886\upsilon_{13}+0,892\upsilon_{21}+0,475\upsilon_{22}+0,503\upsilon_{23}+\right. \\ \left.+0,897\upsilon_{31}+0,849\upsilon_{32}+0,443\upsilon_{33}\right)\to\max, \end{gathered} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \upsilon_{11}+\upsilon_{21}+\upsilon_{31}=5, \\ \upsilon_{12}+\upsilon_{22}+\upsilon_{32}=7, \\ \upsilon_{13}+\upsilon_{23}+\upsilon_{33}=4, \\ u_{11}+u_{21}+u_{31}=\upsilon_{11}+\upsilon_{12}+\upsilon_{13}, \\ u_{12}+u_{22}+u_{32}=\upsilon_{21}+\upsilon_{22}+\upsilon_{23}, \\ u_{13}+u_{23}+u_{33}=\upsilon_{31}+\upsilon_{32}+\upsilon_{33}, \\ u_{11}\le 2,\quad u_{21}\le 4,\quad u_{31}\le 6, \\ u_{12}\le 7,\quad u_{22}=0\ ,\quad u_{32}\le 3, \\ u_{13}\le 5,\quad u_{23}\le 4,\quad u_{33}\le 2, \end{cases}$$

$$u_{ij},\upsilon_{jk}\in\left\{0,Z^{+}\right\},\quad i=1,2,3;\quad j=1,2,3,\quad k=1,2,3.$$

Решение данной задачи при a=0,5 представлено в табл. 11. Решение показало, что у выбранных поставщиков были произведены закупки насосов с максимально достижимым соответствием коммерческим требованиям и все заявки были удовлетворены с максимально достижимым соответствием техническим требованиям. Отклонение от полученной схемы закупок приведет к снижению значения критерия (6), отображающего агрегированное соответствие коммерческих и технических требований.

Таблица 11. Оптимальное распределение насосов при $a = 0,5$

Производитель, i	Закупили у производителей			Сумма	Тип насосов, j	Получили потребители			Сумма
	1	2	3			1	2	3	
	Неизвестные, u_{ij}					Неизвестные, υ_{jk}			
1	0	0	0	**0**	1	1	2	4	**7**
2	7	0	3	**10**	2	4	0	0	**4**
3	0	4	2	**6**	3	0	5	0	**5**
Сумма	**7**	**4**	**5**		Сумма	**5**	**7**	**4**	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии технологий закупок можно указать два перспективных направления: реализация централизованных закупок, осуществляемая на основе положений 44-ФЗ (Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ (редакция от 09.03.2016)), и переход к «обезличенным», параметрическим закупкам (Караев, Москвитина, Будяков, 2015). Обе технологии, наряду с известными достоинствами (Мягких, Гриненко, 2017), характеризуются завышенными трудовыми и временными затратами. Снижение этих затрат одновременно с повышением качества закупок достигается путем цифровой трансформации, максимальной автоматизации процессов закупки. Цифровая трансформация и автоматизация включают: поддержку принятия решений, применение блокчейн, смарт-контрактов, управление жизненным циклом контракта, искусственный интеллект в сфере закупок и роботизация процессов с целью перевода рутинной работы в закупочных процессах от людей программам (Автоматизация закупок..., 2019). Предложенные в нашей статье модели и алгоритмы могут рассматриваться как теоретическая основа реализации одного из возможных вариантов цифровой трансформации процессов систем корпоративных и государственных закупок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Автоматизация закупок: опыт крупнейших заказчиков, структура рынка, тренды. Исследование_TAdviser (2019). Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/ [*Automation of purchases: Experience of the largest customers, market structure, trends*. Study_TAdviser (2019). Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/ (in Russian).]

Будяков А.Н., Гетманова К.Г., Матвеев М.Г. (2017). Решение задачи выбора ресурсов и их поставщиков в условиях противоречивости технических и коммерческих требований // *Вестник Воронежского государственного университета, серия: Системный анализ и информационные технологии*. № 3. С. 26–34. [**Budyakov A.N., Getmanova K.G., Matveev M.G.** (2017). Resources and their suppliers selection problem solving within contradictory technical and commercial requirements. *Bulletin of the Voronezh State University, series System Analysis and Information Technologies*, 2, 66 (in Russian).]

Караев А.Э., Москвитина И.В., Будяков А.Н. (2015). Использование методики планирования по обезличенным МТР при закупках и поставках комплектного оборудования для крупных проектов нефтяной отрасли // *Нефть России*. № 10. С. 52–53. [**Carayev A.E., Moscvitina I.V., Budyakov A.N.** (2015). The use of a planning method for impersonal material and technical resources in the procurement and supply of complete equipment for large projects in the oil industry. *Oil of Russia,* 10, 52–53 (in Russian).]

Леденева Т.М., Подвальный С.Л. (2016). Агрегирование информации в оценочных системах // *Вестник Воронежского государственного университета, серия: Системный анализ и информационные технологии*. № 4. С. 155–164. [**Ledeneva T.M., Podvalniy S.L.** (2016). The aggregation of information in the evaluation system. *Bulletin of the Voronezh State University, series System analysis and information technologies*, 4, 155–164 (in Russian).]

Матвеев М.Г. (2021). Информационные технологии формирования предложения на электронной торговой площадке с технологией «маркетплейс» // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 1. С. 105–112. [**Matveev M.G.** (2021). Information technologies for supply creation on e-trading platform with marketplace technology. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 1, 105–112 (in Russian).]

Мягких Н.Ю., Гриненко С.В. (2017). Механизм централизации системы государственных закупок // *Научное обозрение. Экономические науки*. № 3. С. 69–72. [**Myagkikh N.Y., Grinenko S.V.** (2017). Mechanism of centralization of system of public procurements. *Scientific Review. Economic Sciences*, 3, 69–72 (in Russian).]

Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта (1986). Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. [*Fuzzy sets in models of control and artificial intelligence* (1986). D.A. Pospelov (Ed.). Moscow: Nauka (in Russian).]

Таха Х.А. (2001). Введение в исследование операций. М.: Издательский дом «Вильямс». [**Taha H.A.** (2001). *Introduction to operations research*. Moscow: Williams Publishing House (in Russian).]

Ягер Р. (ред.) (1986). Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь. [**Yager R.** (ed.) (1986). *Fuzzy sets and possibility theory. Resent developments.* Moscow: Radio i svjaz'. Originally published by New York, Oxford, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press.]

Amin S.H., Razmi J. (2009). An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation. *Expert Systems with Applications*, 36, 4, 8639–8648.

Amin S.H., Zhang G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39, 8, 6782–6791.

Detyniecki M. (2000). *Mathematical aggregation operators and their application to video querying*. Ph.D. dissertation, University of Paris VI, Paris, France.

Mendoza A., Ventura J.A. (2012). Analytical models for supplier selection and order quantity allocation. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 8, 3826–3835.

Mendoza F., Ventura J.A. (2011). Modeling actual transportation costs in supplier selection and order quantity allocation decisions. *Operational Research*, 13, 1, 5–25.

Moosavi S.A., Ebrahimnejad S. (2017). A new multi-objective mathematical model for supplier selection in uncertain environment. *13th International Conference on Industrial Engineering (IIEC2017).*

Roth A.E. (2003). The origins, history, and design of the resident match. *Jama*, 289, 7, 909.

Roth A.E., Rothblum U.G. (1999). Truncation strategies in matching markets — in search of advice for participants. *Econometrica*, 67, 1, 21–43.

Yager R.R. (1988). Ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making // *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 18, 183–190.

Digital technology of centralized procurement organization

N.A. Aleynikova,
Voronezh State University, Voronezh, Russia; e-mail: balbashovan@mail.ru

M.G. Matveev,
Voronezh State University, Voronezh, Russia; e-mail: mgmatveev@yandex.ru

Received 10.08.2021

Abstract. The article is devoted to the development of models framework for digital transformation of processes in corporate and public procurement systems. In particular, the solution of the problem of multicriteria choice in economic systems described by the three-part graph “producer — resource — consumer” is considered. A mathematical model for the optimal distribution of a homogeneous resource from suppliers to consumers in a centralized procurement system is proposed. This model is reduced to a transport problem with intermediate points. Optimization is aimed at achieving maximum compliance in terms of the totality of technical and commercial characteristics of a homogeneous resource. To set the requirements for these characteristics on the part of the consumer, it is proposed to use fuzzy variables. This provides the consumer with a flexible mechanism for describing resource requirements based on his preferences. An operator of aggregation of local correspondences concerning a set of characteristics is proposed in the form of a discrete Choquet integral with a fuzzy measure. Using the example of production equipment, it is shown how it is possible to formalize the parameters of the model, and then to optimize and automate the process of distributing equipment by solving a transport problem with intermediate points in such a way, that the maximum correspondence in its characteristics is achieved. The developed models and algorithms can be used to create information services on electronic trading platforms, including the of public procurement.

Keywords: digital transformation; centralized procurement system; homogeneous resource; linguistic and fuzzy variables; aggregation; Choquet integral; fuzzy measure; multi-criteria choice; transport problem with intermediate points.

JEL Classification: M15.

Quoting: **Aleynikova N.A., Matveev M.G.** (2022). Digital technology of centralized procurement organization. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 70–79. DOI: 10.31857/S042473880018980-7