

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛАНОВ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

MULTICRITERION APPROACH TO ESTIMATING THE EFFECTIVE IMPLEMENTATION OF THE PRODUCTION PLANS SHIPBUILDING ENTERPRISES

Б. В. Соколов, А. Н. Павлов (Санкт-Петербург), Д. А. Иванов (Берлин),
Д. А. Павлов, А. А. Павлов (Санкт-Петербург)

Введение

Ныне существующие и проектируемые современные судостроительные предприятия (ССП), как и любые другие сложные организационно-технические системы, являются сложными многофункциональными организационно-техническими объектами, созданными на базе новых информационных технологий [1–4]. Поэтому процессы применения указанных объектов сопровождаются появлением гигантских потоков разнородной информации и отличаются как по физической природе измеряемых и контролируемых параметров, так и по составу источников информации о компонентах вектора эффективности выполнения производственных планов (ПрП) СПП. При оценивании эффективности выполнения ПрП СПП, рассматривая их как сложный организационно-технический комплекс, привлекают [4] различные показатели эффективности, которые отражают такие аспекты производственной деятельности: трудоемкость изготовления деталей и корпусных конструкций, сроки постройки и сдачи изделий, эффективность использования производственных площадей, номенклатуру применяемого производственного оборудования и численности обслуживающего персонала и ряд других.

При этом в связи со сложностью рассматриваемой проблемы, многообразием показателей эффективности, подлежащих учету, существенным повышением цены возможных ошибок в современных условиях резко возросло значение разработки научно обоснованного подхода к комплексному оцениванию и анализу эффективности выполнения ПрП СПП.

Анализ многочисленных публикаций по различным аспектам проблемы оценивания эффективности функционирования сложных систем [1, 6–9] показывает, что в настоящее время наметилась прогрессивная тенденция к интеграции различных научных направлений, связанных с рассматриваемой проблематикой.

Структура многокритериального оценивания (оценивания с несколькими отношениями предпочтения, с мультипредпочтением) может быть представлена в следующем виде:

$$\left(\{r_i\}_{i \in \Gamma}, \{F^k\}_{k \in \Gamma_1} \right) \quad (1)$$

Для такой структуры характерным является введение множества отношений предпочтения $\{r_i\}_{i \in \Gamma}$ или представляющих их функций $\{f_i\}_{i \in \Gamma}$, а также согласующего правила F или множества согласующих правил $\{F^k\}_{k \in \Gamma_1}$, направленных на преодоление критериальной неопределенности и разрешения противоречия между исходными от-

ношениями предпочтения. Вводимые согласующие правила F^k определяют результирующие функции выбора $f_{рез}^k = F^k(\{f_i\}_{i \in E})$.

Практика показывает, что выбор рассматриваемых показателей эффективности выполнения ПрП ССП является процессом, во многом имеющим субъективный, творческий характер, требующий в каждом отдельном случае индивидуального подхода и неформальных эвристических методов, т. е. методов, в основе которых лежат интуиция, опыт, аналогии, здравый смысл. При этом существенной особенностью процессов оценивания эффективности выполнения ПрП ССП является то, что данные процессы реализуются в условиях существенной неопределённости. Факторы неопределенности вызваны, как правило, следующими требованиями: проведением реконструкции ССП без остановки действующего производства; внедрением новейшего оборудования, прежде всего, автоматизированного и роботизированного; учитывать затраты на реконструкцию за счет использования существующих производственных зданий и части существующего оборудования, отвечающего требованиям современного производства; предусматривать совместное функционирования принятого комплекса оборудования с уточнением схемы материальных потоков и загрузки оборудования и т. п.

Таким образом, в современных условиях весьма актуальной как в теоретическом, так и практическом плане становится проблема разработки комплекса новых методов многокритериального оценивания эффективности выполнения ПрП ССП в условиях дефицита числовой информации, а также в условиях некорректной, неточной и противоречивой информации.

Комбинированный метод многокритериального выбора

В зависимости от особенностей задачи оценивания эффективности выполнения ПрП ССП частные показатели, как правило, носят неравнозначный по важности характер. Распространенными методами выражения различий критериев по важности являются методы скаляризации [1, 6–9]. Наиболее универсальной сверткой показателей, учитывающей нелинейный характер влияния частных показателей f_i друг на друга и в целом на обобщенный показатель эффективности выполнения ПрП ССП является свертка, приведенная в формуле (2).

$$f_{рез}^{(1)} = F^1(\{f_i\}_{i \in E}) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} f_i f_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \lambda_{ijk} f_i f_j f_k + \dots + \lambda_{12\dots m} f_1 f_2 \dots f_m \quad (2)$$

Здесь коэффициенты $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, m)$ отражают влияние на результирующую оценку отдельно взятых частных показателей, коэффициенты $\lambda_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, m)$ - влияние совокупностей по двум частным показателям, $\lambda_{ijk} (i, j, k = 1, 2, \dots, m)$ – по трем частным показателям и т. д. С одной стороны, назначение коэффициентов важности в формуле (2), является не просто сложной, а суперсложной задачей. С другой стороны, вычисление результирующего показателя, с помощью которого можно определять эффективности выполнения ПрП ССП, усложняется неточными, нечеткими, интервальными значениями частных показателей. Для разрешения указанных проблем предлагается использовать ниже приведенный *метод*, в основе которого лежат нечетко-возможностный подход описания экспертной информации [10–12] и комбинированный подход с применением нечеткой логики и метода теории планирования эксперимента [5].

Допустим, что эффективность выполнения производственных планов ССП оценивается набором показателей $F = \{f_i, i = 1, \dots, m\}$, каждый из которых представляет собой лингвистическую переменную. Например, лингвистическая переменная $f_i =$ «Уровень использования производственных площадей и трудовых ресурсов» может принимать значения из множества простых и составных термов $T(f_i) = \{\text{«низкий»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средний»}, \text{«выше среднего»}, \text{«высокий»}\}$. Набор из нескольких показателей с соответствующими значениями термов характеризует представление ЛПР о результирующем показателе, выражающем обобщенный взгляд на эффективность выполнения производственных планов ССП. Введем для результирующего показателя лингвистическую переменную, например, «Эффективность выполнения производственных планов ССП», которая может принимать следующие значения $T(f_{рез}) = \{\text{«плохая»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«средняя»}, \text{«выше среднего»}, \text{«хорошая»}\}$.

Знания ЛПР в общем виде можно представить следующими продукционными правилами:

$$P_j: \text{«Если } f_1 = A_{1j} \text{ и } f_2 = A_{2j} \text{ и } \dots \text{ и } f_m = A_{mj}, \text{ то } f_{рез} = A_{резj} \text{»},$$

где $A_{ij} \in T(f_i)$, $A_{резj} \in T(f_{рез})$.

Для построения результирующего показателя [5] необходимо перевести значения показателей f_i в шкалу $[-1, +1]$. Крайние значения лингвистической переменной f_i порядковой шкалы маркируют -1 и $+1$, при этом точка «0» соответствует лингвистическому определению середины шкалы согласно физическому смыслу данного показателя (рис. 1).

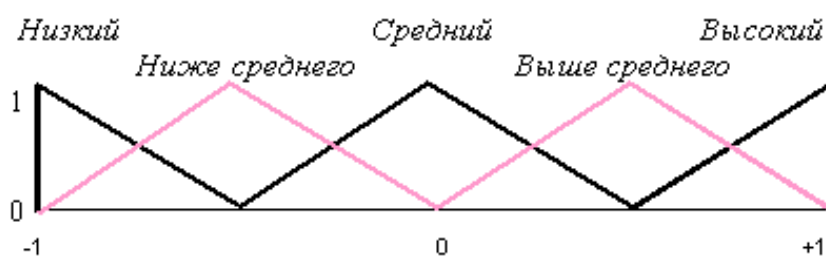


Рис. 1. Кодирование лингвистической переменной в шкалу $[-1,+1]$

Согласно положениям теории планирования эксперимента, для построения свертки частных показателей необходимо построить матрицу экспертного опроса, элементами которой являются крайние значения частных показателей эффективности f_i , то есть минимальные (маркированные «-1») и максимальные (маркированные «1»).

Во время проведения экспертного опроса каждый эксперт отвечает на вопросы вида: «Если частный показатель f_1 имеет значение A_{1j_1} , частный показатель f_2 имеет значение A_{2j_2} , частный показатель f_m имеет значение A_{mj_m} , то какое значение будет иметь результи-

рующей показатель эффективности $f_{резj}$?». В случае, если количество частных показателей эффективности равно 3, матрица опроса будет иметь следующий вид (табл. 1).

Таблица 1

Матрица экспертного опроса

Правило	f_1	f_2	f_3	$f_{рез}$
1	Низкий	Низкий	Низкий	$f_{рез1}$
2	Высокий	Низкий	Низкий	$f_{рез2}$
3	Низкий	Высокий	Низкий	$f_{рез3}$
4	Высокий	Высокий	Низкий	$f_{рез4}$
5	Низкий	Низкий	Высокий	$f_{рез5}$
6	Высокий	Низкий	Высокий	$f_{рез6}$
7	Низкий	Высокий	Высокий	$f_{рез7}$
8	Высокий	Высокий	Высокий	$f_{рез8}$

Для определения результирующего показателя эффективности функционирования ССП (1) с точки зрения реализуемости ПрП формируется ортогональный план экспертного опроса, который для рассматриваемого случая будет иметь следующий вид (табл. 2).

Таблица 2

Ортогональный план экспертного опроса

	f_0	f_1	f_2	f_3	f_1f_2	f_1f_3	f_2f_3	$f_1f_2f_3$	$f_{рез}$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	$f_{рез1}$
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	$f_{рез2}$
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	$f_{рез3}$
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	$f_{рез4}$
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	$f_{рез5}$
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	$f_{рез6}$
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	$f_{рез7}$
8	1	1	1	1	1	1	1	1	$f_{рез8}$

При этом столбец f_0 заполняется единицами, столбцы f_1, f_2, f_3 представляют собой значения матрицы опроса (табл. 2), столбцы $f_1f_2, f_1f_3, f_2f_3, f_1f_2f_3$ вычисляются путём перемножения значений соответствующих столбцов, столбец $f_{рез}$ представляет собой значения интегрального показателя эффективности, полученные от эксперта или ЛПР. Указанный ортогональный план формируется отдельно для каждого из экспертов. Согласно теории планирования эксперимента, вычисляются усредненные скалярные

произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор значений результирующего показателя эффективности.

На следующем шаге производится вычисление усреднённых значений коэффициентов полинома производится по следующей формуле:

$$\lambda_i^{cp} = \sum_{j=1}^{k_3} K_j \lambda_i^j,$$

где K_j – коэффициент компетентности j -го эксперта, причем $K_j \geq 0$; $\sum_{j=1}^{k_3} K_j = 1$;

λ_i^j – коэффициент полинома, полученного в результате обработки экспертной информации j -го эксперта;

k_3 – количество экспертов.

После вычисления усреднённых значений коэффициентов полинома строится свертка частных показателей эффективности, которая будет иметь следующий вид:

$$f_{рез} = \lambda_0^{cp} + \sum_{i=1}^m \lambda_i^{cp} f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij}^{cp} f_i f_j + \dots + \lambda_{123m}^{cp} f_1 f_2 f_3 \dots f_m.$$

Таким образом, **предлагаемый метод** оценивания эффективности выполнения ПрП ССП, состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Формирование множества лингвистических шкал для каждого из частных показателей и интегрального показателя эффективности выполнения производственных планов ССП.

Шаг 2. Перевод частных показателей эффективности выполнения производственных планов ССП в шкалу $[-1, +1]$.

Шаг 3. Построение ортогонального плана опроса экспертов по правилам, принятым в теории планирования эксперта для любого количества частных показателей критичности.

Шаг 4. Проведение экспертного опроса (ответы на вопросы продукционных правил).

Шаг 5. Расчёт коэффициентов полинома для каждого эксперта.

Шаг 6. Расчёт усреднённых значений коэффициентов полинома с учётом компетентности экспертов.

Шаг 7. Построение интегрального показателя эффективности выполнения производственных планов ССП.

Среди перечисленных шагов наиболее важным и ответственным является **шаг 4**, связанный с получением ответов экспертов на вопросы, содержащиеся в продукционных правилах. С одной стороны, это вызвано тем, что, скажем, при числе частных показателей эффективности более 4 количество задаваемых вопросов возрастает и становится более 16. Согласно закономерности, выведенной Джорджем Миллером, кратковременная человеческая память экспертов, как правило, не может запомнить и повторить более 7 ± 2 элементов. Что будет приводить к противоречивым высказываниям экспертов. С другой стороны, в соответствии с парадоксом Эллсберга, человек (эксперт) мыслит не аддитивно, что требует для предварительного количественного оценивания его ответов применять неаддитивные меры [10–13].

Рассмотрим методику проведения экспертного опроса, позволяющую разрешить возникшие затруднения. Предположим, что заданы f_i ($i = 1, \dots, m$) частные пока-

затели, которые оценивают эффективность выполнения производственных планов ССП. Для проведения экспертного опроса на *шаге 4* требуется составить 2^m производственных правил вида

$$P_j: \langle \text{Если } f_1 = A_{1j} \text{ и } f_2 = A_{2j} \text{ и } \dots \text{ и } f_m = A_{mj}, \text{ то } f_{pez} = A_{pezj} \rangle,$$

где $A_{ij} \in \{-1_{f_i}, +1_{f_i}\}$ – «низкое» или «высокое» значение показателя f_i ;

$A_{pezj} \in T(f_{pez})$ – термы лингвистической переменной интегрального показателя.

Правила, где все показатели эффективности выполнения производственных планов ССП кроме одного принимают «низкие» значения, будем называть **простыми правилами опроса** эксперта. Таких правил равно количеству частных показателей эффективности. Будем считать, что правила P_1, P_2, \dots, P_m являются простыми, где соответствующие показатели f_1, f_2, \dots, f_m принимают «высокие» значения.

Сложные (составные) правила можно представить с помощью простых правил следующим образом. Некоторое правило $P_j: \langle \text{Если } f_1 = A_{1j} \text{ и } f_2 = A_{2j} \text{ и } \dots \text{ и } f_m = A_{mj}, \text{ то } f_{pez} = A_{pezj} \rangle$, в котором показатели с индексами $\{i_1, i_2, \dots, i_k\} \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$ принимают «высокие» значения, можно записать так $P_j = P_{i_1} \cup P_{i_2} \cup \dots \cup P_{i_k}$.

Оценки интегральных показателей $f_{pez} = A_{pezj}$ в простых правилах обозначим $g_i = E(a_i, \alpha_i, \beta_i), i = 1, \dots, m$, где $E(\bullet)$ – операция дефаззификации треугольного нечеткого числа $A_{pezj} = (a_i, \alpha_i, \beta_i)$ (например, $E(a_i, \alpha_i, \beta_i) = a_i + \frac{\beta_i - \alpha_i}{3}$).

Вычисление оценок интегральных показателей в сложных правилах предлагается осуществлять путем построения конструктивной параметрической λ -нечеткой меры Сугено [10–12] на конечном множестве простых правил $P_i, i \in \Gamma = \{1, 2, \dots, m\}$, где g_i – плотность распределения этой нечеткой меры. Мера Сугено отражает оценку интегрального показателя в сложном правиле $P_j = P_{i_1} \cup P_{i_2} \cup \dots \cup P_{i_k}$ и имеет следующий вид:

$$G_\lambda(P_j = P_{i_1} \cup P_{i_2} \cup \dots \cup P_{i_k}) = \left[\prod_{l=1}^k (1 + \lambda g_{i_l}) - 1 \right] / \lambda.$$

Построение λ -нечеткой меры Сугено, характеризующей оценку интегрального показателя в сложном правиле, осуществляется нахождением корня λ^* из интервала $(-1, \infty)$ следующего полинома m -1 порядка

$$\left[\prod_{i=1}^m (1 + \lambda g_i) - 1 \right] / \lambda = 1, \quad -1 < \lambda < \infty.$$

Следует отметить, что в работе [12] доказана теорема о том, что рассматриваемые полиномы имеют ровно один корень в интервале $(-1, \infty)$.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), грантов РФФИ (№13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-06-00877, 13-07-12120-офи-м, 15-29-01294-офи-м, 15-07-08391, 15-08-08459, 15-07-01230, 15-06-04195), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проектов ESTLATRUS projects 1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT

Platform» and 2.1/ELRI-184/2011/14 «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems».

Литература

1. Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно–технических комплексах в условиях неопределённости и многокритериальности: учебник/**Б. В. Соколов, Б. В. Москвин, А. Н. Павлов и др.**; под общей ред. Б. В. Соколова. – СПб.: ВИККУ имени А. Ф. Можайского, 1999. – 496 с.
2. **Прангишвили И. В.** Системный подход и общесистемные закономерности/И.В. Прангишвили. – М.: Синтег, 2000. – 528 с.
3. Технология системного моделирования/**Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов и др.**; Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. – 520 с.
4. Технология судостроения: уч. для вузов/**Александров В. Л. и др.**: под общ. Ред. А. Д. Гармашева. СПб.: профессия, 2003. -342 с., ил.
5. **Павлов А. Н.** Методика построения псевдоуниверсальных сверток лингвистических показателей на основе теории планирования эксперимента/ А.Н. Павлов // XI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008), РФ, г. Санкт-Петербург, 23 – 25 июня 2008 г.: Сб. докладов, т. 1, С. 169–172.
6. **Ларичев О. И.** Объективные модели и субъективные решения / О. И. Ларичев. – М.: Наука, 1987. – 143 с.
7. Многокритериальные задачи принятия решений / под ред. Д. М. Гвишиани, С. В. Емельянова. – М.: Машиностроение, 1978.–192 с.
8. **Подиновский В. В.** Парето–оптимальные решения многокритериальных задач/ В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 254 с.
9. **Ногин В. Д.** Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход (2-е изд., испр. и доп.) / В. Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 176 с.
10. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
11. **Пытьев Ю. П.** Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение / Ю. П. Пытьев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 464 с.
12. **Павлов А. Н., Соколов Б. В.** Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2006 – 72 с.
13. **Ellsberg D.** Risk, ambiguity, and the savage axioms / D. Ellsberg // Quarterly Journal of Economics. 1961. Vol. LXXV. P. 643–669.