

Методика вероятностной оценки приоритета направлений исследований при решении прикладных научных задач

Е. Н. Каширская¹, В. А. Холопов², Е. В. Курнасов³, А. П. Кушнир⁴

Московский технологический университет (МИРЭА)

¹kashi@list.ru, ²holopov@gmail.com, ³kurnasov@mirea.ru, ⁴gurinmura@yandex.ru

Аннотация. При выполнении больших научных проектов, как правило, требуется решать объемные сложно формализуемые задачи, связанные с проведением исследований в разных направлениях, не всегда одинаковых по эффективности. Предложена методика вероятностной оценки эффективности возможных направлений научных исследований. Получение значений критериев оценки эффективности возможных направлений исследований производится посредством адаптации методики экспертных оценок. Предложенный метод априорного ранжирования позволяет объективно оценивать субъективное мнение экспертов и сортировать направления по необходимости и важности реализации цели научной работы для выбора наиболее эффективных областей исследований. Проведена вероятностная оценка эффективности направлений исследований при проектировании информационно-программных средств для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства.

Ключевые слова: научное исследование; системный анализ; метод экспертных оценок; критерии ранжирования; автоматизация; производственный процесс

I. ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы над большими научными проектами, когда перед исследователями ставится объемная и сложно формализуемая задача, как, например, в радиоэлектронике [1], в ракетно-космической технике [2], в цифровом производстве [3], трудно определить, какие научные исследования нужно проводить для ее решения. Как правило, для разработки научного проекта в нескольких областях знаний формируется ряд направлений исследований, по которым может пойти дальнейшая работа. При этом остается неясным, достаточно ли эти направления разработаны для решения задач проекта или требуются дополнительные исследования в некоторых областях.

В системном анализе разработано несколько методов, позволяющих оценить перспективность проекта еще на стадии разработки: аналитические, статистические и теоретико-множественные методы, методы математической

логики, графические методы, методы типа «мозговой атаки», «Дельфи», «сценариев», «дерева целей», а также метод экспертных оценок. При невозможности аналитического описания процесса, как это обычно бывает на начальных стадиях разработки нового проекта, следует обращаться к методу экспертных оценок, так как он не требует ни формализации постановки задачи, ни дополнительных аналитических исследований.

II. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе предложен новый способ вероятностной оценки эффективности направлений научных исследований, опирающийся на метод экспертных оценок, который состоит из следующих процедур:

- определение системы критериев для оценки и анализа приоритета направлений научных исследований;
- построение модели оценки эффективности;
- определение методики вероятностной оценки приоритета направлений научных исследований.

На первом этапе определяются критерии и их количественные значения посредством адаптации методики экспертных оценок. Для реализации методики следует сформировать группу компетентных экспертов и воспользоваться процедурой проведения экспертизы априорной информации.

При сборе априорной информации экспертам предлагается заполнить специальные опросные анкеты, в которые записывается полное количество возможных направлений исследований и их оценки в зависимости от степени влияния на получение конечного результата. В результате ранжирования переменных по степени убывания их влияния каждому направлению присваивается определенный ранг. Специалисты (эксперты) могут присваивать различным направлениям одинаковые ранги.

В качестве примера рассмотрим работу над прикладной научно-исследовательской и экспериментальной разработкой по теме «Разработка информационно-

Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по заказу Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58016X0008).

программных средств для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства» (далее –

ПНИЭР). В данной работе рассматриваются четыре группы исследований (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1 ОПРОСНАЯ АНКЕТА ДЛЯ СБОРА ИНФОРМАЦИИ О ВАЖНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ группы	Наименование групп исследований	Направление исследований	Обозначение
1	Подготовка и выполнение производственного задания	Разработка модели производственного задания	X ₁₁
		Разработка алгоритмов формирования расписания	X ₁₂
		Разработка методов реализации НМІ в системах диспетчеризации цифрового машиностроительного производства	X ₁₃
		Разработка методов оптимизации ресурсного обеспечения производственного процесса	X ₁₄
2	Управление оборудованием и мониторинг его работы	Разработка методов диагностики и предсказания неисправностей с использованием систем с искусственным интеллектом	X ₂₁
		Разработка способов опроса и определения состояния технологического оборудования	X ₂₂
		Оптимизация работы Ethernet сети для обеспечения мониторинга в режиме реального времени	X ₂₃
		Определение способов взаимодействия систем АСУП с ЧПУ	X ₂₄
		Разработка модели внешнего управления технологическим оборудованием с ЧПУ	X ₂₅
3	Работа с технологической информацией и управляющими программами	Анализ и разработка форм представления технологической информации в АСУ	X ₃₁
		Анализ возможностей PDM систем для решения задач архивации	X ₃₂
		Оценка объемов передаваемой и хранимой информации	X ₃₃
		Разработка модели информационного обеспечения технологического процесса	X ₃₄
		Исследование методов оптимального хранения информации на цифровых носителях	X ₃₅
4	Цифровое машиностроительное производство	Разработка моделей функционирования цифрового машиностроительного производства	X ₅₁
		Построение модели информационного обеспечения цифрового машиностроительного предприятия	X ₅₂

Специалистам было предложено произвести ранжирование, то есть присвоить ранг каждому направлению в порядке убывания его влияния на получение конечного результата.

К опросу в качестве специалистов (экспертов) были привлечены пять докторов технических и физико-математических наук и три кандидата технических наук с областями научных интересов «Автоматизация технологических процессов и производств», «Технология машиностроения», «Автоматика и телемеханика», «Робототехника и мехатроника».

Результаты опроса сводятся в общую таблицу и представляются в виде матрицы рангов. Например, в табл. 2 показана матрица рангов для первой группы направлений – «Подготовка и выполнение производственного задания».

По данным матрицы рангов с помощью расчетных формул находятся среднее арифметическое по специалистам \bar{x}_j , среднее арифметическое по направлениям \bar{x}_i и дисперсия случайной выборки по каждому из направлений исследований $S_{x_j}^2$:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij},$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij},$$

$$S_{x_j}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2,$$

где m – число специалистов (экспертов), $m=8$; n – количество направлений исследований, $n=4$.

Таким же образом составляются матрицы рангов для остальных групп направлений.

После обработки результатов экспертизы, в несколько этапов проводится оценка нулевой гипотезы. На каждом этапе ставится и проверяется определенная гипотеза, положительный или отрицательный ответ на которую означает либо переход к следующему этапу исследования, либо показывает, что продолжение его невозможно. Во втором случае в качестве результатов исследования служат данные, полученные на уже проведенных этапах.

Гипотезы строятся в порядке убывания их мощности, то есть окончание исследования на этапе $(j + 1)$ не дает никакой новой информации, не содержащейся уже в результатах этапов 1, 2, ..., j .

ТАБЛИЦА II

МАТРИЦА РАНГОВ ДЛЯ ПЕРВОЙ ГРУППЫ НАПРАВЛЕНИЙ

Специалисты	Направления				$\sum_{j=1}^n x_{ij}$	$\left(\sum_{j=1}^n x_{ij}\right)^2$	\bar{x}_i
	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}			
1	2	1	3	4	10	100	2,5
2	1	2	4	3	10	100	2,5
3	2	3	1	4	10	100	2,5
4	1	2	3	4	10	100	2,5
5	1	3	2	4	10	100	2,5
6	3	2	4	1	10	100	2,5
7	1	2	3	4	10	100	2,5
8	1	2	3	4	10	100	2,5
$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	12	17	23	28	80	0	0
$\left(\sum_{i=1}^m x_{ij}\right)^2$	144	289	529	784	6400	0	0
Ранг суммы	1	2	3	4	4	1	2
\bar{x}_j	1,500	2,125	2,875	3,500	0	0	2,5
$(\bar{x}_j)^2$	2,250	4,516	8,266	12,000	0	0	0
S_j^2	0,571	0,411	0,982	1,143	0	0	0

III. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предлагаемой методике гипотезы построены так, что отрицательный ответ означает продолжение исследования, а положительный – окончание.

Гипотеза H_0^1 отвергается, если начальная матрица рангов адекватна матрице переформированных рангов. Оценка адекватности производится с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ [4]:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^n d_j^2}{(b^3 - b)},$$

где $d^2 = t_j^{(1)} - t_j^{(2)}$ – квадрат разности рангов, $t_j^{(1)}$ – ранг суммы для первоначальной матрицы рангов, $t_j^{(2)}$ – ранг суммы для матрицы переформированных рангов; b – размер выборки.

Коэффициент Спирмена ρ должен значимо отличаться от 0. Если гипотеза H_0^1 отвергается, переходим к проверке гипотезы H_0^2 .

Гипотеза H_0^2 отвергается, если мнения экспертов согласуются между собой. Если гипотеза H_0^2 подтверждается, то производится новое анкетирование и переход к гипотезе H_0^1 . Гипотеза H_0^2 – оценка согласованности экспертов проверяется по данным матрицы ранжирования с помощью коэффициента конкордации Кендалла (коэффициент согласованности) [5]:

$$W = \frac{S(\Delta_i^2)}{\frac{1}{12}m^2[n^3 - n] - m \sum_{j=1}^m T_j},$$

где S – сумма квадратов разностей рангов – отклонений от среднего;

$\Delta_i = \left(\sum_{j=1}^m x_{ij}\right) - \frac{1}{2}m(n+1)$ – отклонение от среднего

обобщенной суммы рангов i -го фактора по мнению j -го эксперта, x_{ij} – обобщенная сумма рангов i -го фактора;

$T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^n (t_j^3 - t_j)$ – сумма рангов, приписанных всеми

экспертами i -му элементу выборки, минус среднее значение сумм рангов; t_j – число повторений j -го ранга в i -той строке матрицы ранжирования.

Если матрица ранжирования не содержит совпавших рангов, то коэффициент конкордации определяется следующим образом:

$$W = \frac{12S(\Delta_i^2)}{m^2(n^3 - n)}.$$

Оценка значимости коэффициента конкордации W производится по критерию Пирсона: $\chi_p^2 = m(n-1)W$. Если при заданном уровне значимости q (%) и числе степеней свободы $f = n - 1$ критическое значение χ_{kp}^2 окажется меньше расчетного χ_p^2 , то гипотеза об отсутствии согласия экспертов отвергается. Если гипотеза H_0^2 отвергается, переходим к гипотезе H_0^3 .

Гипотеза H_0^3 проверяется в развитие гипотезы H_0^2 . Гипотеза H_0^3 отвергается, если различие в оценках опрошенных специалистов по вопросу о степени влияния отобранных факторов на изучаемый процесс несущественно. Если гипотеза H_0^3 подтвердится, то необходимо провести анкетирование снова. Проверка гипотезы проводится с помощью дисперсионного анализа. Если гипотеза H_0^3 отвергается, переходим к проверке гипотезы H_0^4 .

Гипотеза H_0^4 подтверждается, если, по мнению опрошенных специалистов, различие во влиянии исследуемых направлений на конечный результат несущественно. В этом случае необходимо расширить список направлений и вторично провести анкетирование. Гипотеза H_0^4 проверяется с помощью дисперсионного анализа. Если гипотеза H_0^4 отвергается, переходим к гипотезе H_0^5 .

Гипотеза H_0^5 подтверждается, если нет определенной структуры влияния направлений исследований на конечный результат. Под «структурой» понимается наличие таких направлений исследований, из которых хотя бы одно не равно нулю или хотя бы одно влияние отлично от других при проверке по некоторому критерию. Если гипотеза H_0^5 отвергается, то анализ априорной информации считается законченным.

IV. РЕЗУЛЬТАТ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

При расчете проводилось исследование априорной информации, полученной от экспертов. При этом последовательно были отвергнуты все вышеупомянутые нулевые гипотезы. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты дисперсионного анализа для первой группы направлений.

ТАБЛИЦА III РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Вариация	Степень свободы	Сумма квадратов отклонений	Дисперсия
Между специалистами	$m - 1 = 7$	0	0
Между направлениями	$n - 1 = 3$	18,25	6,083
Остаточная вариация (специалисты)	$m(n - 1) = 24$	40,00	1,667
Остаточная вариация (направления)	$n(m - 1) = 28$	240,00	0,777

Проверка гипотез H_0^3 и H_0^4 проводится по F -критерию Фишера:

$$F_1 = \frac{S_{\text{спец.}}}{S_{\text{ост.спец.}}}, F_2 = \frac{S_{\text{напр.}}}{S_{\text{ост.напр.}}},$$

где $S_{\text{напр.}} = n \sum_{i=1}^m (\bar{x}_{ij} - \bar{X})^2$, $S_{\text{спец.}} = m \sum_{j=1}^n (\bar{x}_{ij} - \bar{X})^2$ –

характеристики рассеяния между направлениями и в оценках специалистов соответственно, \bar{X} – среднее значение выставленных рангов;

$S_{\text{ост.спец.}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X})^2$, $S_{\text{ост.напр.}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{X})^2$ – остаточные дисперсии.

Сравнения значений критерия Фишера для специалистов и направлений исследований показаны в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV СРАВНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КРИТЕРИЯ ФИШЕРА

Группа направлений	Специалисты			Направления		
	F_1	F_{1kp}	$F_1 < F_{1kp}$	F_2	F_{2kp}	$F_2 > F_{2kp}$
1	0	5,095	выпол.	7,831	4,121	выпол.
2	0	5,095	выпол.	23,434	4,121	выпол.
3	0	5,095	выпол.	16,250	4,121	выпол.
4	0	5,095	выпол.	11,732	4,121	выпол.

V. ИТОГИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенная оценка эффективности направлений исследований, выполненная в рамках ПНИЭР, установила приоритетность направлений по необходимости и важности реализации цели и задач проектирования информационно-программных средств для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства. Это позволило исполнителям провести научные исследования, которые наименее проработаны в современной науке и

имеют наибольшую значимость для ПНИЭР, так как им был присвоен первый ранг (табл. 5).

ТАБЛИЦА V ВЫБРАННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

№ группы	Наименование групп исследований	Направление исследований
1	Подготовка и выполнение производственного задания	Разработка модели производственного задания
2	Управление оборудованием и мониторинг его работы	Оптимизация работы Ethernet сети для обеспечения мониторинга в режиме реального времени
3	Работа с технологической информацией и управляющими программами	Оценка объемов передаваемой и хранимой информации
4	Цифровое машиностроительное производство	Разработка моделей функционирования цифрового машиностроительного производства

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка результатов мнений экспертов позволила выбрать следующие области теоретических и прикладных исследований:

1. Разработка модели производственного задания.
2. Оптимизация работы Ethernet сети для обеспечения мониторинга в режиме реального времени.
3. Оценка объемов передаваемой и хранимой информации.
4. Разработка моделей функционирования цифрового машиностроительного производства.

Предложенная методика обработки априорной информации была использована для получения вероятностной оценки эффективности направлений исследований при выполнении работ по ПНИЭР [3, 6], что позволило выбрать научные направления, в наибольшей степени подходящие для реализации цели и задач данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиотехнологической технологии // Российский технологический журнал. 2016. № 1 (10). С. 4-20.
- [2] Макаров М.И., Медведев А.А., Савельев Ю.М., Макаров В.М. Автоматизированная система обеспечения эксплуатации ракетно-космической техники космодрома. решаемые задачи и перспективы развития // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 5 (14). С. 46-54.
- [3] Romanov A., Romanov M., Kharchenko A., Kholopov V. Unified architecture of execution level hardware and software for discrete machinery manufacturing control systems // Proceedings - 14th IEEE Student Conference on Research and Development: Advancing Technology for Humanity, SCOREd 2016. IEEE, 2016. P. 7810088.
- [4] Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
- [5] Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 472 с.
- [6] Kashirskaya E.N., Kurnasov E.V., Kholopov V.A., Shmeleva A.G. Methodology for assessing the implementation of the production process // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. IEEE, 2017. Pp. 232–235.