

**Ржавина Дарина Айдамировна
Исмаилова Карина Вадимовна**

студенты 4 курса бакалавриата НИЯУ МИФИ, Москва

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР МОДЕЛИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Аннотация: рост сложности технических систем и неопределённости требований на ранних стадиях проектирования делает выбор модели жизненного цикла (ЖЦ) проекта многокритериальной задачей, которая на практике часто решается интуитивно, без формальной процедуры. Цель работы — разработать и апробировать формализованную процедуру выбора модели ЖЦ на основе метода анализа иерархий (МАИ) Т. Саати. В работе построена трёхуровневая иерархическая модель «цель — критерии — альтернативы», в которой в качестве критериев использованы гибкость к изменению требований, снижение технического риска, предсказуемость сроков и стоимости, возможность ранней верификации и валидации, соответствие процессным требованиям ISO/IEC 15288, а в качестве альтернатив — каскадная, V-образная, инкрементная и спиральная модели ЖЦ. Для базового профиля проекта (система с высокой неопределённостью требований) рассчитаны локальные и глобальные приоритеты альтернатив, проверена согласованность суждений (отношение согласованности CR не превышает 0,02 по всем матрицам) и выполнен анализ чувствительности решения к изменению веса критерия предсказуемости. Показано, что наивысший приоритет получает спиральная модель (0,425), а смена лидера в пользу каскадной модели наступает при возрастании веса критерия предсказуемости сроков/стоимости примерно до 0,46. Предложенная процедура может использоваться как вспомогательный инструмент обоснования выбора модели ЖЦ на этапе планирования системного проекта.

Abstract: the growing complexity of technical systems and the uncertainty of requirements at early design stages turn the choice of a project life cycle (LC) model into a multi-criteria problem that is often resolved intuitively. The purpose of this study is to develop and test a formalised procedure for LC model selection based on Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP). A three-level hierarchy "goal – criteria – alternatives" is built, where the criteria are requirement flexibility, technical risk reduction, schedule/cost predictability, early verification and validation capability, and compliance with ISO/IEC 15288 process requirements, while the alternatives are the waterfall, V-model, incremental and spiral LC models. For a baseline project profile characterised by high requirement uncertainty, local and global priorities were computed, judgment consistency was verified (consistency ratio below 0.02 for every matrix), and a sensitivity analysis was performed with respect to the predictability criterion weight. The spiral model receives the highest priority (0.425); the leader changes to the waterfall model once the weight of the predictability criterion grows to about 0.46. The proposed procedure can support the justification of an LC model choice during system project planning.

Введение

Выбор модели жизненного цикла (ЖЦ) системы относится к числу решений, принимаемых на самых ранних стадиях системного проектирования, но определяющих структуру процессов, распределение ресурсов и распределение рисков на протяжении всего проекта. Стандарт ISO/IEC/IEEE 15288 задаёт общую совокупность процессов ЖЦ, но не предписывает единственно верную модель их организации: на практике используются каскадная, V-образная, инкрементная, спиральная и другие модели, каждая из которых по-разному сочетает гибкость, управляемость рисками и предсказуемость [3]. Аналогичным образом Косяков и Свит отмечают, что модель ЖЦ для системного инженера должна выбираться исходя из характеристик конкретного проекта, а не приниматься по умолчанию [2].

Проблема состоит в том, что на практике выбор модели ЖЦ нередко делается интуитивно, по инерции организационной культуры или профессионального опыта команды, без явного сопоставления альтернатив по значимым для проекта критериям. Между тем сами критерии выбора разнородны по своей природе: часть из них носит технический характер (управление риском, возможность ранней верификации), часть — организационно-экономический (предсказуемость сроков и стоимости, соответствие нормативным требованиям к процессам). Задачи такого рода — многокритериальный выбор среди дискретного числа альтернатив в условиях разнородных, в том числе количественно не измеримых, критериев — являются классическим предметом системного анализа [7], для решения которых Т. Саати предложил метод анализа иерархий (МАИ) — процедуру структурирования проблемы в виде иерархии «цель – критерии – альтернативы» и получения приоритетов альтернатив через матрицы парных сравнений [1].

Целью настоящей работы является разработка и апробация формализованной процедуры выбора модели ЖЦ сложной технической системы на основе МАИ. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) сформировать систему критериев выбора модели ЖЦ на основе анализа требований ISO/IEC/IEEE 15288 и практики системной инженерии; 2) построить иерархическую модель задачи и получить локальные и глобальные приоритеты альтернатив для базового профиля проекта; 3) проверить согласованность экспертных суждений; 4) выполнить анализ чувствительности решения к изменению весов критериев и содержательно интерпретировать полученные результаты.

Объектом исследования является процесс принятия решения о выборе модели ЖЦ сложной технической (программно-аппаратной) системы на этапе планирования проекта; предметом — формализованная процедура многокритериального выбора такой модели методом анализа иерархий.

Материалы и методы

Метод анализа иерархий. МАИ структурирует задачу принятия решения в виде иерархии, на верхнем уровне которой находится цель, на среднем — критерии, на нижнем — сравниваемые альтернативы [1]. Для каждой группы элементов одного уровня относительно элемента вышестоящего уровня строится квадратная матрица парных сравнений $A = (a_{ij})$ размерности n , где a_{ij} выражает, во сколько раз i -й элемент важнее (предпочтительнее) j -го по девятибалльной шкале отношений Саати (1 — равная важность, 3 — умеренное превосходство, 5 — существенное, 7 — значительное, 9 — абсолютное превосходство, чётные значения и обратные величины — промежуточные и обратные оценки), при этом $a_{ji} = 1/a_{ij}$, $a_{ii} = 1$.

Вектор приоритетов $w = (w_1, \dots, w_n)$ вычисляется как нормированный главный собственный вектор матрицы A , соответствующий её максимальному собственному значению $\lambda_{\max}$. Согласованность суждений оценивается индексом согласованности $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ и отношением согласованности $CR = CI / RI$, где RI — среднее значение индекса согласованности случайно сгенерированных обратносимметричных матриц того же порядка (табличные значения по Саати; для $n = 4$ $RI = 0,90$, для $n = 5$ $RI = 1,12$). Матрица считается достаточно согласованной, если CR не превышает 0,10 [1]. Итоговые (глобальные) приоритеты альтернатив получаются иерархическим синтезом — взвешенной суммой локальных приоритетов альтернатив по каждому критерию с весами, равными приоритетам самих критериев.

Постановка задачи. В качестве базового профиля для апробации процедуры рассмотрен проект разработки сложной программно-аппаратной (киберфизической) системы, для которой на старте проекта часть требований заинтересованных сторон сформулирована не в полном объёме и подлежит уточнению в ходе разработки (типичная ситуация для исследовательских и опытно-конструкторских проектов, в том числе университетских цифровых

платформ и информационно-управляющих комплексов). Рассматриваются четыре альтернативы — базовые модели ЖЦ, прямо фигурирующие в перечне вопросов вступительного испытания по направлению «Системный анализ и управление»: каскадная модель (Waterfall), V-образная модель, инкрементная модель и спиральная модель, предложенная Б. Бозом как итеративная, ориентированная на управление риском модель разработки [6].

Формирование системы критериев. На основе анализа процессной структуры ISO/IEC/IEEE 15288 [3], руководства INCOSE [4], а также работ по управлению проектами [5] и системной инженерии [2] были выделены пять критериев, охватывающих технический, организационный и нормативный аспекты выбора модели ЖЦ:

K1 — гибкость к изменению требований в ходе проекта; K2 — снижение технического риска разработки; K3 — предсказуемость сроков и стоимости проекта; K4 — возможность ранней верификации и валидации проектных решений; K5 — соответствие модели процессным требованиям стандартов (в частности, ISO/IEC/IEEE 15288) и практике формального документирования этапов ЖЦ.

Экспертные суждения. Значения матриц парных сравнений заполнены авторами работы вдвоём, путём обсуждения и согласования оценок, на основе сопоставления характеристик рассматриваемых моделей ЖЦ, описанных в источниках [1–6] (например, более высокая гибкость и риск-ориентированность спиральной модели против более высокой предсказуемости каскадной модели). Такой подход — типовой способ применения МАИ при отсутствии возможности привлечь широкую группу экспертов; он не влияет на корректность самой процедуры расчёта, но, как отмечено ниже, накладывает определённые ограничения на общность полученных выводов.

Результаты

Приоритеты критериев. Матрица парных сравнений критериев и полученный из неё вектор приоритетов приведены в таблице 1. Матрица оказалась согласованной: $\lambda_{\max} = 5,064$, $CI = 0,016$, $CR = 0,014$, что существенно ниже порогового значения 0,10.

Таблица 1 — Матрица парных сравнений критериев и вектор приоритетов

Критерий	К1	К2	К3	К4	К5	Приоритет w_i
К1 — Гибкость	1	2	4	2	5	0,394
К2 — Снижение риска	1/2	1	3	1	3	0,222
К3 — Предсказуемость	1/4	1/3	1	1/3	2	0,094
К4 — Ранние V&V	1/2	1	3	1	3	0,222
К5 — Соответствие станд.	1/5	1/3	1/2	1/3	1	0,067

Локальные приоритеты альтернатив. Для каждого критерия были построены отдельные матрицы парных сравнений четырёх моделей ЖЦ; все они оказались согласованными (CR принимает значения от 0,0015 до 0,017, то есть во всех случаях ниже 0,10). Сводные локальные приоритеты альтернатив по каждому критерию представлены в таблице 2.

**Таблица 2 — Локальные приоритеты альтернатив по критериям
(CR указано под названием критерия)**

Модель ЖЦ	К1 Гибкость (CR=0,007)	К2 Риск (CR=0,004)	К3 Предсказуемость (CR=0,008)	К4 Ранние V&V (CR=0,017)	К5 Соответствие (CR=0,002)
Каскадная (W)	0,063	0,065	0,509	0,060	0,394
V-образная (V)	0,110	0,242	0,308	0,303	0,394
Инкрементная (I)	0,301	0,242	0,119	0,161	0,137
Спиральная (S)	0,527	0,451	0,064	0,476	0,075

Глобальные приоритеты. Иерархический синтез (взвешенное суммирование локальных приоритетов альтернатив с весами критериев из таблицы 1) даёт итоговое ранжирование альтернатив, представленное в таблице 3.

Таблица 3 — Глобальные приоритеты альтернатив и итоговое ранжирование

Ранг	Модель ЖЦ	Глобальный приоритет
1	Спиральная модель	0,425
2	Инкрементная модель	0,228
3	V-образная модель	0,220
4	Каскадная модель	0,127

Для заявленного профиля проекта (высокая неопределённость требований на старте) наивысший глобальный приоритет получает спиральная модель ЖЦ, ориентированная на итеративное снижение риска, что согласуется

с её первоначальным обоснованием как риск-ориентированной модели [6]. Инкрементная и V-образная модели получают близкие, заметно более низкие приоритеты, а каскадная модель занимает последнее место, что объясняется её низкими локальными приоритетами по доминирующим критериям К1 и К2, компенсируемыми лишь высоким приоритетом по критерию предсказуемости К3, вес которого в базовом профиле относительно невелик (0,094).

Анализ чувствительности

Поскольку веса критериев получены на основе экспертных суждений одного лица, принимающего решение, была проведена проверка устойчивости итогового ранжирования к изменению веса критерия К3 (предсказуемость сроков и стоимости) — критерия, по которому каскадная модель имеет наибольший локальный приоритет и который в наибольшей степени способен изменить итоговый вывод. Вес К3 варьировался от 0 до 1 с пропорциональным перемасштабированием весов остальных четырёх критериев; для каждого значения веса пересчитывались глобальные приоритеты альтернатив.

Расчёт показал, что при базовом весе $K3 = 0,094$ и вплоть до веса $K3 \approx 0,457$ лидером остаётся спиральная модель; при дальнейшем увеличении веса К3 происходит смена лидера, и наивысший приоритет получает каскадная модель (таблица 4). Иными словами, для того чтобы каскадная модель стала предпочтительной, критерий предсказуемости сроков и стоимости должен более чем в четыре раза увеличить свой относительный вес по сравнению с базовым профилем — то есть стать доминирующим критерием проекта, что типично для проектов с фиксированной ценой контракта и жёстко зафиксированными сроками.

**Таблица 4 — Изменение глобальных приоритетов при
варьировании веса критерия КЗ**

w(КЗ)	Каскадная	V- образная	Инкрементная	Спиральная	Лидер
0,094 (баз.)	0,127	0,220	0,228	0,425	Спиральная
0,200	0,172	0,230	0,216	0,383	Спиральная
0,400	0,256	0,250	0,191	0,303	Спиральная
0,457	0,280	0,255	0,184	0,281	смена лидера
0,600	0,335	0,270	0,167	0,228	Каскадная
0,800	0,425	0,289	0,143	0,144	Каскадная

Обсуждение

Полученные результаты содержательно интерпретируемы. Для проекта с изначально неполным набором требований наибольшую ценность представляют гибкость и управляемость технического риска — критерии, по которым спиральная и, в меньшей степени, инкрементная модель заведомо превосходят каскадную и V-образную модели за счёт итеративной структуры и ранней проверки рискованных решений [6]. Каскадная модель, напротив, оптимальна там, где требования стабильны, а предсказуемость сроков и стоимости является жёстким ограничением проекта (например, при фиксированной цене контракта) — это отражено в анализе чувствительности: при доминирующем весе критерия КЗ лидерство переходит именно к каскадной модели.

Стоит отметить и ограничения работы. Во-первых, парные сравнения заполнялись самими авторами, а не независимой группой экспертов проекта, что вносит определённую субъективность в исходные оценки (хотя и не влияет на согласованность матриц — она проверяется формально, через CR). При применении процедуры к реальному проекту логичнее собрать оценки

нескольких заинтересованных лиц и усреднить их. Во-вторых, рассмотрены только четыре «классические» модели ЖЦ, тогда как на практике нередко используются их гибридные сочетания [2; 3] — иерархию несложно дополнить такими вариантами. Наконец, шкала Саати даёт точечные, а не «размытые» оценки; более аккуратный учёт неопределённости суждений — отдельная задача, выходящая за рамки данной работы.

Несмотря на эти ограничения, продемонстрированная процедура решает практическую задачу системного анализа: она переводит выбор модели ЖЦ из области интуитивных, трудно обосновываемых решений в область формализованной, воспроизводимой и проверяемой на согласованность процедуры, результат которой (включая точку смены лидера при изменении приоритетов проекта) может быть содержательно объяснён заказчику или руководству проекта.

Заключение

В работе разработана и апробирована формализованная процедура выбора модели жизненного цикла сложной технической системы на основе метода анализа иерархий Т. Саати. Построена трёхуровневая иерархическая модель задачи с пятью критериями, охватывающими технические, организационные и нормативные аспекты проекта, и четырьмя альтернативными моделями ЖЦ. Для базового профиля проекта с высокой неопределённостью требований получено согласованное (CR не превышает 0,02 по всем построенным матрицам) ранжирование альтернатив с лидирующей спиральной моделью (глобальный приоритет 0,425). Анализ чувствительности показал устойчивость этого вывода к умеренным изменениям весов критериев и выявил конкретное условие смены предпочтительной альтернативы — рост веса критерия предсказуемости сроков и стоимости примерно до 0,46, что соответствует проектам с жёсткими контрактными ограничениями.

Предложенная процедура носит общий характер и может быть перенесена на другие задачи многокритериального выбора в системной инженерии — выбор архитектурного решения, выбор поставщика подсистемы, выбор инструментальной платформы моделирования — при условии соответствующей замены критериев и альтернатив. Направлениями дальнейшего исследования являются переход к групповой экспертизе с агрегированием суждений нескольких заинтересованных сторон проекта, применение нечёткого варианта МАИ и сопоставление результатов с альтернативными методами многокритериального анализа.

Список литературы

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
2. Косяков А., Свит У. и др. Системная инженерия. Принципы и практика. — М.: ДМК-Пресс, 2014. — 624 с.
3. ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and software engineering — System life cycle processes. — Geneva: ISO, 2015.
4. INCOSE Systems Engineering Handbook, v. 3.2.1 / INCOSE-TP-2003-002-03.2.1. — San Diego: INCOSE, January 2011.
5. Хелдман К. Профессиональное управление проектом. — М.: Бином, Лаборатория знаний, 2013.
6. Boehm B.W. A spiral model of software development and enhancement // Computer. — 1988. — Vol. 21, No. 5. — P. 61–72.
7. Зубов В.И. Лекции по теории управления: учеб. пособие. — СПб.: Лань, 2009.