



## МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ РИЗИКУ І НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

УДК 519.876.2

### ЭВОЛЮЦИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

**И.А. САВЧЕНКО**

Рассмотрены способы учета параметра времени при использовании модифицированного метода морфологического анализа для вычисления вероятностей альтернатив параметров объекта. Рассмотрена квазистатическая постановка задачи, учитывающая такие факторы изменений со временем, как события и тенденции. Приведен способ учета факторов в рамках морфологической таблицы и недостатки его использования. Представлен разработанный прием учета событий и тенденций как внешних по отношению к морфологической таблице элементов, которые вносят масштабные коэффициенты в задачу модифицированного метода морфологического анализа. Показано решение задачи изучения эволюции объекта с учетом изменений во времени. Рассмотрен вопрос сопровождения морфологической модели и приведены приемы обеспечения ее актуальности на промежутке времени.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

На сегодняшний день одним из важнейших факторов обеспечения устойчивого развития общества является технологическое предвидение как методология инновационного и социально-экономического развития как на национальном или региональном уровне, так и на уровнях отдельных отраслей промышленности или больших предприятий и компаний. В социальном плане целью технологического предвидения является определение общественно и экономически наиболее выгодных технологий будущего. Потребность в предвидении, как процессе принятия решений для сложных систем с человеческим фактором относительно их возможного поведения в будущем вызвана ростом актуальности задачи переформатирования общества, качественного улучшения жизни человека.

В процессе технологического предвидения большинство объектов, процессов, явлений, которые исследуются, характеризуются неточностью, неопределенностью, неполнотой, нечеткостью информации [1], поэтому традиционные математические модели и подходы использовать невозможно или нецелесообразно. Это обусловило появление ряда методов качественного анализа, одним из которых является модифицированный метод морфологического анализа [2].

Модифицированный метод морфологического анализа (МММА) — это мощный метод исследования сложных многомерных проблем, который успешно применяется в процессе предвидения. В этом методе на основе исходных экспертных данных получают вероятности альтернатив характеристических параметров рассматриваемого объекта с учетом связей между ними. С помощью этой информации можно сравнивать критические технологии, сценарии и стратегии с точки зрения воздействия на рассматриваемый объект, строить модель объекта «что-если», фиксируя одни параметры, чтобы проследить поведение других; оценивать риски и т.д.

**Цель работы** — адаптировать МММА для исследования эволюции объекта во времени.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Результаты, полученные для МММА рассматриваемого объекта, действительны только для того момента времени, в контексте которого была получена экспертная информация. Для создания долгосрочных сценариев и стратегий этой информации недостаточно, так как со временем ситуация может существенно измениться. Поэтому в процессе принятия решений важно представлять поведение системы не только в один конкретный момент, а на определенном промежутке времени. Следовательно, целесообразно разработать приемы решения задач МММА с учетом изменений, происходящих в исследуемом объекте со временем.

Рассмотрим факторы, которые могут влиять на объект со временем:

- **события**, которые приводят к мгновенному изменению вероятностей альтернатив параметров;
- **тенденции** или непрерывные изменения вероятностей альтернатив параметров.

Тогда можно сформулировать квазистатическую постановку задачи.

**Дано:**

- морфологическая таблица, которая содержит множество характеристических параметров  $F = \{F_i \mid i \in \overline{1, N}\}$ , каждый параметр  $F_i$  описывается множеством альтернатив  $A_i = \{a_j^{(i)} \mid j \in \overline{1, n_i}\}$ ;

- совокупность событий и тенденций, которые влияют на объект.

**Необходимо:**

- определить вероятности  $p_j^{(i)}$  реализации каждой из альтернатив  $a_j^{(i)}$  в заданный момент времени  $t$  с учетом событий и тенденций, которые повлияли на объект.

### ВРЕМЯ КАК ОТДЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР

Одним из способов учета времени для морфологической модели является включение его в морфологическую таблицу в качестве отдельного характеристического параметра (табл. 1).

В табл. 1  $t_j, j \in \overline{1, n_T}$  — последовательные моменты времени в будущем. Параметр  $T$  всегда является фиксированным. Решается задача МММА для фиксированного параметра [2] при каждой из альтернатив параметра  $T$ , что дает представление о поведении объекта в заданные моменты времени.

**Таблица 1.** Морфологическая таблица с отдельным характеристическим параметром времени

$T$	$F_1$	$F_2$	...	$F_N$
$t_1$	$a_1^{(1)}$	$a_1^{(2)}$	...	$a_1^{(N)}$
$t_2$	$a_2^{(1)}$	$a_2^{(2)}$	...	$a_2^{(N)}$
...	...	...	...	...
$t_{n_T}$	$a_{n_1}^{(1)}$	$a_{n_2}^{(2)}$	...	$a_{n_N}^{(N)}$

Такой подход применялся в работах некоторых исследователей [3] для обычного метода морфологического анализа. Этот подход является наиболее простым, он не требует дополнительных расчетных процедур, но имеет определенные ограничения. Рассмотрение объекта в определенные моменты времени предполагает, что существуют некоторые неявные события и тенденции, влияющие на объект. Это значительно усложняет процедуру экспертной оценки, поскольку различные эксперты могут неодинаково представлять факторы воздействия на объект для каждого из моментов времени. Появление некоторого неожиданного события, сильно влияющего на вероятности альтернатив параметров морфологической таблицы, автоматически делает устаревшими полученные экспертные оценки относительно следующих моментов времени. Кроме того, накопленные с каждым следующим моментом времени изменения оцениваются отдельно, что увеличивает количество лишних оценок, при этом уменьшая точность.

### ВНЕШНИЙ УЧЕТ СОБЫТИЙ В МОДИФИЦИРОВАННОМ МЕТОДЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для более удобного учета изменений в объекте со временем в методе морфологического анализа целесообразно ввести дополнительные элементы, внешне по отношению к морфологической таблице.

Обозначим  $E$  множество событий, которые могут повлиять на объект, где  $E = \{E_k | k \in \overline{1, n_E}\}$ . Набор этих событий зависит от выбранного промежутка времени и детальности моделирования объекта. При применении метода в процессе предвидения эти события можно определить на этапе предварительного изучения проблемы с помощью других методов предвидения таких, как метод мозгового штурма или метод сканирования.

Каждое событие  $E_k$  определенным образом влияет на вероятности альтернатив параметров морфологической таблицы. Обозначим степень влияния события  $E_k$  на альтернативу  $a_j^{(i)}$  при помощи масштабного коэффи-

циента  $\sigma_{kij}$ . Независимую вероятность альтернативы  $a_{ji}^{(i)}$  с учетом влияния события  $E_k$  будем вычислять таким образом:

$$p_{ji}^{n(i)} = \frac{\sigma_{kij} p_{ji}'^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} \sigma_{kij} p_j'^{(i)}},$$

где  $p_{ji}'^{(i)}$  — независимые вероятности для исходной морфологической таблицы, полученные с помощью экспертных процедур. Тогда вероятность альтернативы  $a_j^{(i)}$  с учетом влияния всех событий множества  $E$  имеет вид

$$p_{ji}^{n(i)} = \frac{\prod_{k=1}^{n_E} \sigma_{kij} p_{ji}'^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} \left( \prod_{k=1}^{n_E} \sigma_{kij} p_j'^{(i)} \right)}.$$

Новые величины независимой вероятности  $p_j^{n(i)}$  используются в качестве входных данных в дальнейшей процедуре модифицированного метода морфологического анализа.

Масштабные коэффициенты  $\sigma_{kij}$  предлагается определять на основе экспертных процедур по следующей шкале (табл. 2).

**Таблица 2.** Шкала оценивания влияния факторов изменений со временем

Степень влияния события $E_k$ на вероятность альтернативы параметра $a_j^{(i)}$ МТ				
Номер уровня	Качественная характеристика уровня влияния	Значения $\sigma_{kij}$ в общем виде	Значения $\sigma_{kij}$ при $q = \sqrt{2}$	Значения $\sigma_{kij}$ при $q = 2$
1	Очень сильное отрицательное	$q^{-4}$	0,25	0,063
2	Сильное отрицательное	$q^{-3}$	0,354	0,125
3	Умеренное отрицательное	$q^{-2}$	0,5	0,25
4	Слабое отрицательное	$q^{-1}$	0,707	0,5
5	Отсутствует	1	1	1
6	Слабое положительное	$q$	1,414	2
7	Умеренное положительное	$q^2$	2	4
8	Сильное положительное	$q^3$	2,828	8
9	Очень сильное положительное	$q^4$	4	16

Значения  $q$  выбираются в зависимости от проблемы. Большие значения  $q$  означают большую степень влияния событий на альтернативы параметров морфологической таблицы.

Отметим, что вопросы экспертам задаются только относительно тех параметров, на которые влияют соответствующие события. Таким образом, на этапе планирования морфологического исследования и составления опросных форм можно существенно уменьшить количество вопросов к экспертам.

### УЧЕТ ТЕНДЕНЦИЙ В МОДИФИЦИРОВАННОМ МЕТОДЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Введем множество тенденций  $T = \{T_k | k \in \overline{1, n_T}\}$ , которые влияют на объект, заданный морфологической таблицей. В отличие от событий, тенденции влияют на вероятности альтернатив параметров морфологической таблицы, постепенно изменяя их на протяжении исследуемого промежутка времени.

Будем определять степень влияния тенденции  $T_k$  на альтернативу  $a_j^{(i)}$  при помощи зависимости масштабного коэффициента  $\tau_{kij}(t)$  от времени. Значения этого коэффициента в момент времени  $t$  определяет влияние соответствующей тенденции на вероятность альтернативы параметра МТ. Величина этого влияния задается так же, как и для событий, поэтому в качестве опорных точек при построении зависимости можно использовать табл. 2. Например, если тенденция линейно изменяет влияние на вероятность объекта от значения «отсутствует» до «сильное положительное» за время  $t' = 3$  года, зависимость будет выглядеть так:  $\tau_{kij}(t) = 1 + \frac{2,828-1}{3}t = 1 + 0,609t$ . Тогда в любой момент времени  $t$  можно найти исходные независимые вероятности альтернатив параметров МТ, на основе которых провести расчетную процедуру МММА:

$$p_{ji}^{n(i)}(t) = \frac{\tau_{kij_i}(t)p_{ji}'^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} \tau_{kij}(t)p_j'^{(i)}}$$

или, учитывая все действующие тенденции,

$$p_{ji}^{n(i)}(t) = \frac{\prod_{k=1}^{n_T} \tau_{kij_i}(t)p_{ji}'^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} \left( \prod_{k=1}^{n_T} \tau_{kij}(t)p_j'^{(i)} \right)}$$

Тип зависимости  $\tau(t)$  для описания влияния тенденции на объект зависит от проблемы и от области исследования. Наиболее распространенными типами зависимостей, которые могут быть использованы в задачах модифицированного метода морфологического анализа с учетом тенденций, являются линейные и периодические, однако предложенный метод не накладывает ограничений на вид зависимости.

Экспертное оценивание необходимо для определения конкретных характеристик зависимостей. Например, для линейной зависимости это на-

чальное/конечное значение и продолжительность изменения; для простой периодической зависимости это максимальное/минимальное значение и период изменения. Для более сложных зависимостей могут понадобиться специфические приемы определения характеристик зависимостей.

Если в задаче учитываются и события, и тенденции, то для некоторого момента времени  $t$  состояние объекта определяется с учетом множества  $T$  действующих тенденций и подмножества  $E^* \subset E$  событий, которые произойдут до момента времени  $t$ , тогда независимые вероятности альтернатив параметров МТ вычисляются, как:

$$p_{j_i}^{n(i)}(t) = \frac{\prod_{k=1}^{n_{E^*}} \sigma_{kij_i} \prod_{k=1}^{n_T} \tau_{kij_i}(t) p_{j_i}'^{(i)}}{\sum_{j=1}^{n_i} \left( \prod_{k=1}^{n_{E^*}} \sigma_{kij} \prod_{k=1}^{n_T} \tau_{kij}(t) p_j'^{(i)} \right)}$$

Предложенный прием учета времени в задачах модифицированного метода морфологического анализа является достаточно гибким. Путем комбинирования соответствующих событий или тенденций можно получить результаты расчета для различных сценариев, определенных в процессе технологического предвидения.

### СОПРОВОЖДЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ПРОМЕЖУТКЕ ВРЕМЕНИ

С помощью описанной методики можно строить схемы эволюции изучаемого объекта, рассматривая состояние объекта как до каждого из событий, так и после него. Эволюция может быть представлена как линейно, с накоплением изменений, привнесенных каждым событием, так и в древообразном виде, если наступление каждого из событий не является обязательным, и необходимо рассматривать оба варианта будущего.

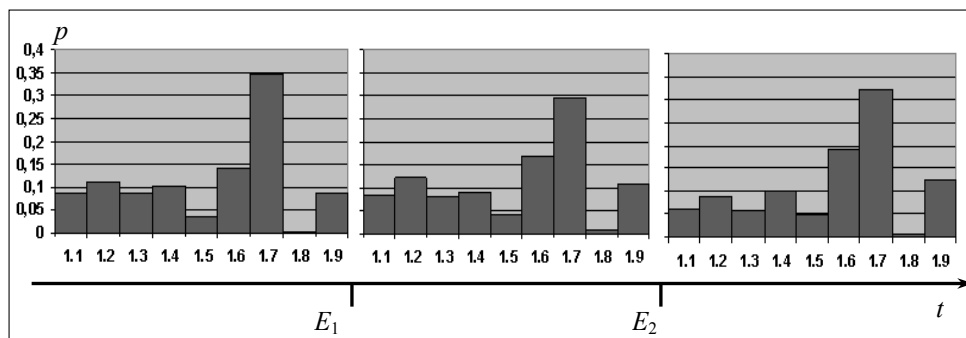


Рис. 1. Представление в линейном виде изменения вероятностей альтернатив параметра объекта со временем

На рис. 1 и 2 показано отличие между представлениями эволюции объекта. Ожидается, что на объект повлияют два события  $E_1, E_2$ . На рис. 1 изображена линейная эволюция объекта, то есть считается, что произойдет

событие  $E_1$  и принесет соответствующие изменения в вероятности альтернатив, после чего произойдет событие  $E_2$  и окажет свое влияние на объект. На рис. 2 показаны пути эволюции объекта для всех четырех возможных подмножеств событий: ни одно из событий не осуществилось; осуществилось событие  $E_1$ ; осуществилось событие  $E_2$ ; осуществились оба события  $E_1, E_2$ .

При наличии большого количества событий схема, подобная изображенной на рис. 2, будет слишком громоздкой. Поэтому для

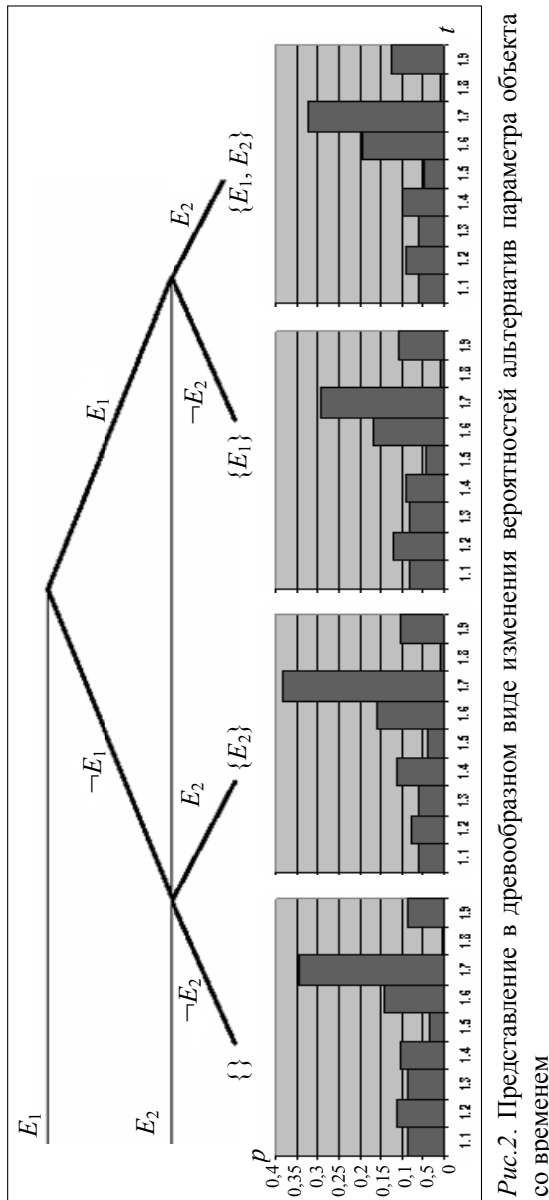


Рис.2. Представление в древообразном виде изменения вероятностей альтернатив параметра объекта со временем

рассмотрения эволюции объекта в древообразном виде можно применять программные средства, в которых предлагается список потенциальных событий, которые можно отмечать как состоявшиеся или не состоявшиеся, соответствующим образом изменяя вероятности альтернатив параметров объекта.

Схемы линейной эволюции объекта удобно использовать в случаях, когда события являются запланированными, то есть они с достаточно высокой вероятностью состоятся, и примерно известно время их наступления. Это позволяет заранее представлять поведение объекта в будущем и принимать решение сразу по результатам исследования проблемы. С другой стороны, древообразную эволюцию объекта следует использовать для решения проблем, где представление о событиях, которые могут произойти, является достаточно неопределенным, и необходимо сопровождать объект на промежутке времени, принимая решение в соответствии с текущими потребностями. При этом события из

множества  $E$  не обязательно должны быть конкретными, это могут быть определенные группы событий, которые примерно одинаково влияют на объект исследования. Например, если рассматривается рынок мобильных телефонов, то потенциальные события могут быть сформулированы, как «появление успешной модели в конкурента» или «появление новой техно-

логии передачи данных», без указания конкретных сведений. Подобные абстрактные описания значительно расширяют множество событий, которые могут повлиять на объект, таким образом существенно увеличивая степень подготовленности к неожиданным обстоятельствам.

Если при рассмотрении объекта на интервале времени учитывались тенденции, то во время сопровождения объекта необходимо также отслеживать моменты запланированного в исследовании завершения тенденции и продлить ее, либо исключить из списка рассматриваемых тенденций. Если за счет некоторых обстоятельств тенденция  $T_k$  перестала влиять на объект или изменила характер влияния, необходимо внести изменения, актуальные на соответствующий момент времени для тенденции  $T_k$ , исключить  $T_k$  из множества тенденций  $T$  и, если необходимо, добавить тенденцию, которая влияет на объект в новых обстоятельствах.

Определенные события, например, упомянутые выше неконкретные события могут привести к появлению новых тенденций, иногда тенденций постепенного возвращения к предыдущему состоянию. Такие тенденции действуют только после возникновения соответствующего события, и это необходимо учитывать при сопровождении объекта.

Рассмотрение эволюции объекта в древообразном виде с учетом тенденций позволяет сохранять актуальность морфологической модели на длительном промежутке времени, выполняя достаточно простые действия. Однако для долгосрочных моделей иногда может возникнуть необходимость синхронизировать результаты вычислений с реальным миром, для чего нужно провести новое оценивание базовой морфологической таблицы и пересмотреть множество событий, исключив те, которые гарантированно состоялись или не состоялись. Другие результаты предыдущих расчетов останутся актуальными.

Таким образом, необходимые действия по сопровождению объекта на интервале времени собраны в табл. 3.

**Таблица 3.** Действия по сопровождению объекта на интервале времени

Причина изменений	Действия по сопровождению морфологической таблицы
Осуществилось событие из множества $E$	Внести соответствующие изменения в исходные вероятности альтернатив параметров. Если это событие привело к появлению новой тенденции, то добавить соответствующую тенденцию к множеству $T$
Закончился назначенный срок действия тенденции	Внести соответствующие для данного момента времени изменения в исходные вероятности альтернатив параметров. Если тенденция продолжает действовать, добавить тенденцию с соответствующими характеристиками в множество $T$
Тенденция досрочно прекратила влиять на объект или сильно изменилась	Внести соответствующие для данного момента времени изменения в исходные вероятности альтернатив параметров. Исключить тенденцию из множества $T$ и, если необходимо, провести анализ влияния новой тенденции на объект и добавить ее в множество $T$
Возникла новая тенденция	Провести анализ ее влияния на объект и добавить тенденцию с соответствующими характеристиками в множество $T$



Продолжение табл. 3

Появились сведения о новых потенциальных событиях	Провести анализ их влияния на объект и добавить события с соответствующими характеристиками в множество $E$
Произошло непредвиденное событие, которое слабо повлияло на объект	Провести анализ ее влияния на объект и внести соответствующие изменения в исходные вероятности альтернатив параметров
Произошло непредвиденное событие, которое сильно повлияло на объект Настало запланированное время пересмотра модели Из-за накопления малых изменений характеристики модели не отражают действительность	Провести новое экспертное оценивание альтернатив параметров морфологической таблицы. Матрица взаимосвязей альтернатив параметров остается без изменений. Провести новые расчеты. Пересмотреть множества событий и тенденций

## ВЫВОДЫ

В задачах сценарного анализа, ориентированных на рассмотрение некоторого объекта, процесса или явления на протяжении достаточно длительного времени, целесообразно применять модифицированный метод морфологического анализа с приемами учета событий и тенденций как факторов воздействия на объект со временем. Предложенные приемы облегчают написание альтернативных сценариев объекта благодаря гибкости использования изменяемого множества событий и тенденций, которые заданным способом воздействуют на объект исследования.

Такой подход позволяет ЛПП представлять, моделировать состояние и поведение объекта на протяжении длительного времени после проведения исследования без дополнительного привлечения специалистов по технологическому предвидению и экспертов. С помощью достаточно простой стратегии сопровождения объекта обеспечивается долгосрочная актуальность морфологической модели объекта и возможность дальнейшего предсказания его поведения в будущем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ: проблемы, методология, приложения. — К.: Наук. Думка, 2011. — 728 с.
2. Савченко І.О. Методологічне і математичне забезпечення розв'язання задач передбачення на основі модифікованого методу морфологічного аналізу // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2011. — № 3. — С. 18–28.
3. Ritchey T. Futures Studies using Morphological Analysis // Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series. — 2005. — P. 14. — <http://swemorph.com/pdf/futures.pdf>.

Поступила 11.10.2014