

А.Н. ПАВЛОВ

КЛАССИФИКАЦИЯ МОНОТОННЫХ И НЕМОНОТОННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГЕНОМА СТРУКТУРЫ

Павлов А.Н. Классификация монотонных и немонотонных информационных систем на основе генома структуры.

Аннотация. В данной статье проведена классификация информационных систем (ИС) на монотонные и немонотонные системы первого и второго типа. Показано, что классификационные признаки данной систематизации хранятся в геноме структуры исследуемой системы. Результаты морфологического анализа ИС позволяют дополнительно привлекать для комплексного ее исследования математический аппарат нечетких графов и методы когнитивного моделирования.

Ключевые слова: монотонная ИС, геном структуры, классификация.

Pavlov A.N. The classification of monotonous and nonmonotonous information systems based on genome of structure.

Abstract. In this paper, the classification of information systems (IS) on monotonous and nonmonotonous system of the first and second types has been performed. It is shown that this systematic classification attributes are stored in the genome structure of the system. The results of morphological analysis of the IS can increase awareness for the integrated study of the mathematical apparatus of fuzzy graphs and cognitive modeling techniques.

Keywords: monotonous and nonmonotonous IS, genome of structure, classification.

1. Введение. Традиционно при использовании многих структурных методов моделирования информационных систем (ИС) условие монотонности их функционирования считалось обязательным или рассматривалось по умолчанию [1–3]. Как правило, это связано со свойством природной монотонности многих реально существующих систем, которое заключается в отсутствии элементов системы, отказ или восстановление которых соответственно увеличивает или снижает надежность системы в целом. Согласно [1] все монотонные системы можно разбить на два типа. При описании моделей структур монотонных ИС первого типа используют графы связности, двух или много-терминальные сети. В этих графах логические связи между элементами представляются двумя способами:

- логическая операция "ИЛИ" (дизъюнкция) — обозначается с помощью параллельного соединения элементов (рис. 1а);
- логическая операция "И" (конъюнкция) — обозначается с помощью последовательного соединения элементов (рис. 1б).



Рис. 1. Параллельное и последовательное соединение элементов ИС.

Для обобщения взаимного влияния элементов ИС друг на друга для монотонных систем первого типа введены нечеткие графы, т. е. графы с весовыми коэффициентами из отрезка $[0, 1]$.

К монотонным системам второго типа относятся такие, структуру взаимодействия элементов которых можно описать монотонными логическими функциями, но не представить графами связности. Как правило, такие ситуации возникают, когда в структуре системы имеются так называемые «поперечные» связи (мостиковые перемычки) (рис. 2). Поперечные связи образуются в результате совместного взаимодействия элементов через различные явные или неявные перемычки, которые чаще всего ошибочно упускаются из виду в расчете на их отсутствие или незначительность [13, 14].

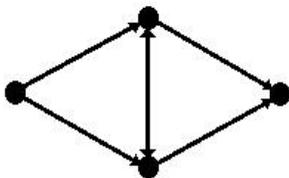


Рис. 2. Мостиковая структура ИС.

2. Структурное моделирование немонотонных систем. Может сложиться впечатление, что немонотонных систем не может быть вообще. Однако в последние годы возникло много новых направлений исследований (в частности, исследование катастрофоустойчивых ИС [8, 12]), в которых становится важной проблема построения структурных моделей функционирования немонотонных сложных системных объектов. Так, например, исследование систем в целенаправленной, неизвестной среде требует включения в структурную модель элементов и подсистем, отражающих процессы разрушения, поражения, проникновения, противодействия противоположной стороны, наличия форс-мажорных обстоятельств. К таким системам можно отнести во-

енно-технические системы, систему обеспечения надежности цепей поставок, систему информационной безопасности технологии облачных вычислений и т. п. [13–17].

Для снятия ограничения на монотонность и обеспечения возможности построения логических условий функционирования элементов как монотонных систем первого и второго типа, так и любых немонотонных сложных системных объектов и процессов профессором Можяевым А.С. был разработан общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) [4], являющийся развитием классических методов логико-вероятностного исчисления надежности, позволяющих исследовать монотонные системы первого типа [1, 5, 6].

Главная особенность и принципиальное отличие ОЛВМ от классических монотонных ЛВМ заключается в том, что ОЛВМ включает новые средства графического представления структур систем (схемы функциональной целостности — СФЦ), включающие изобразительные средства функционально-полного набора логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". Кроме того, предложенный профессором Можяевым А.С. [4] универсальный графический аппарат СФЦ, а также графоаналитический метод решения логических уравнений позволяют построить логико-вероятностную модель функционирования ИС, учитывающую независимые, несовместные события, множественные состояния элементов, многофункциональные элементы и подсистемы.

Принятое в ОЛВМ графическое обозначение и аналитическое описание функциональной вершины приведено на рис. 3.

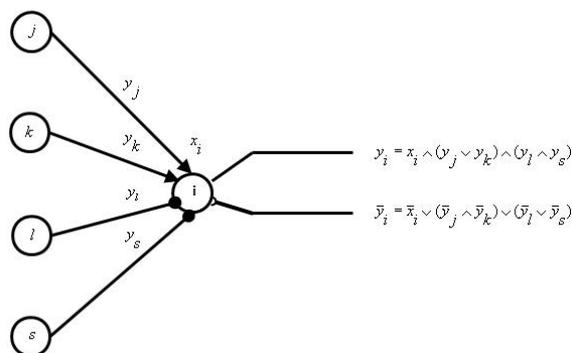


Рис. 3. Графическая иллюстрация СФЦ ОЛВМ.

При построении логической модели функционирования исследуемых систем используются два типа направленных дуг: дизъюнктив-

ные (операция «ИЛИ») дуги — направленность функционального подчинения обозначается стрелками, конъюнктивные (операция «И») дуги — направленность связей логического подчинения на концах дуг обозначается жирными точками. Дуге, непосредственно исходящей из вершины i (прямой выход), сопоставляется функция y_i . Прямая интегративная выходная функция y_i представляет все условия свершения сложного выходного функционального события элемента i в исследуемой системе. Реализация функции y_i зависит, в общем случае, от состояния i -го элемента x_i , характеризующего его надежность, и от реализации логической совокупности заходящих интегративных функций обеспечивающих элементов системы $\{j, k, l, s\}$. Кроме того, введены инверсные выходы (операция «НЕ») вершин. Инверсная интегративная выходная функция \bar{y}_i представляет все условия не свершения сложного выходного функционального события элемента i в исследуемой системе. Это позволяет графически отобразить как условия реализации (например, безотказной работы), так и условия не реализации (отказа, аварии, поражения) соответствующих системных функций на выходах любой вершины формируемой структурной модели системы.

Так же к одному из способов введения операции «НЕ» в структурном моделировании можно отнести методы когнитивного моделирования, в котором наиболее распространенными классами моделей являются взвешенные (знаковые) орграфы, импульсные процессы и нечеткие когнитивные карты [18–24]. В основе когнитивного подхода лежат работы Р. Аксельрода и Робертса Ф.С. [25, 26]. Нечеткая когнитивная карта представляет собой причинно-следственную сеть (или нечеткую положительно-отрицательную семантическую сеть), в которой веса связей лежат на отрезке $[-1, 1]$. Положительно-отрицательные связи можно интерпретировать в терминах нечеткой логики. На когнитивной карте положительные связи типа « x влияет на y » в логической интерпретации можно рассматривать как импликацию $x \Rightarrow y$ или $\bar{x} \Rightarrow \bar{y}$. Отрицательные связи можно представлять как $\bar{x} \Rightarrow y$ или $x \Rightarrow \bar{y}$. Для реализации операции «НЕ» в работах [18–26] были введены отрицательные веса на дугах орграфа. Нахождение взаимовлияния концептов нечеткой когнитивной карты состоит в определении совокупного причинного эффекта от вершины (концепта) i до вершины j

по правилам [24]: $w^*(i, j) = \sum_{l=1}^m T_{q \in A_l} w(q, q+1)$, где S — S-нормы, T — оператор T-нормы, $A_l = (i, k_1^l, k_2^l, \dots, k_{n_l}^l, j)$ — путь от вершины i до вершины j , $l = 1, \dots, m$.

Хотя в рассматриваемом подходе учитывается операция «НЕ», тем не менее описать структурную модель функционирования любой немонотонной системы не представляется возможным. По всей видимости, это также связано с наличием в структуре так называемых «мостиковых» перемычек. По аналогии с монотонными системами назовем немонотонные системы, структуру которых можно представить с помощью нечеткой когнитивной карты, немонотонными системами первого типа. К немонотонным системам второго типа будем относить системы, структуру взаимодействия элементов которых можно описать немонотонными логическими функциями, но не удастся представить нечеткими когнитивными картами.

Если в качестве S-нормы и T-нормы используются операции вероятностной суммы и произведения $S(x, y) = x + y - xy$, $T(x, y) = xy$, то при нахождении взаимовлияния вершин нечеткой когнитивной карты по правилу $w^*(i, j) = \sum_{l=1}^m T_{q \in A_l} w(q, q+1)$ можно использовать функ-

ции надежности или отказа системы, представленные в виде полинома [1, 4–6]: $w^*(i, j) = R(i, j) = 1 - \sum_{k=1}^{\nu} (-1)^{k-1} \sum_{l=1}^{C_{\nu}^k} \prod_{q \in A_l} Q_q$, где ν — количество минимальных сечений отказов, C_{ν}^k — число сочетаний из ν по k , $Q_q \in [0, 1]$ — характеристика (вероятность, возможность) ненадежной работы q -го элемента.

3. Анализ свойств ИС с использованием обобщенного генома структуры. В результате проведенных исследований [7–12] для структур (монотонных и немонотонных ИС) введено обобщенное понятие генома структуры, представляющего собой вектор $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома отказа структуры $T(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = \sum_{t=1}^m (-1)^{t-1} \sum_{i=1}^{C_m^t} \prod_{q \in V_i(R, t)} Q_q$,

составленной из однородных элементов

$$T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n.$$

Геном структуры хранит в себе различные свойства монотонных и немонотонных ИС, используя которые можно проводить классификацию исследуемых систем, приведенную на рис. 4.

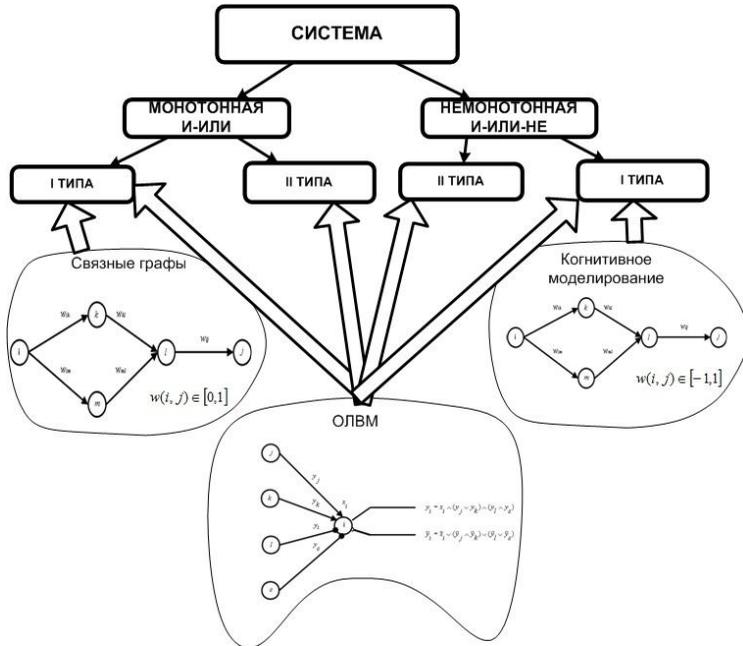


Рис. 4. Классификация ИС.

Для определения монотонности ИС следует использовать следующие свойства генома $\vec{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ структуры [7–12]:

- если $\chi_0 = 0$ и сумма компонент вектора равна 1, то полином отказа $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ описывает структуру монотонной ИС;
- если $\chi_0 = 0$ и сумма компонент вектора равна 0, то ИС является немонотонной и полином отказа не сохраняет «1» (т. е. $T(1) = 0$);
- если $\chi_0 = 1$, то ИС является немонотонной и полином отказа не сохраняет «0» (т. е. $T(0) = 1$).

Кроме того, старшая компонента генома χ_n отвечает за свойство, связанное с наличием в структуре ИС «мостиковых» переемычек. Так для монотонных ИС, если $\chi_n = \pm 1$, то структура ИС является параллельно-последовательной. Если же $|\chi_n| > 1$, то ИС имеет сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть — параллельное, отдельные элементы или подструктуры образуют циклические (мостиковые) связи и отношения между собой. Следовательно, необходимым условием принадлежности ИС к монотонным системам второго типа является следующее $|\chi_n| > 1$ (т. е. абсолютная величина старшей компоненты генома структуры должна быть строго больше 1). Проведенные исследования [7–12] показали, что для немонотонных ИС старшая компонента генома структуры принимает различные значения $\chi_n = \pm 1, \pm 2, \dots$. Можно предположить, что абсолютное значение старшей компоненты генома структуры большее 1 так же может рассматриваться как необходимое условие принадлежности ИС к немонотонным системам второго типа. Другими словами, условие $\chi_n = \pm 1$ является необходимым и достаточным, чтобы структуру взаимодействия элементов немонотонной ИС можно было представить нечеткой когнитивной картой. Если же $|\chi_n| > 1$, то немонотонная ИС может быть как первого, так и второго типа.

4. Заключение. Предложенная автором концепция обобщенного генома структуры как монотонных, так и немонотонных ИС позволяет анализировать не только топологические свойства монотонных систем, но и разрешает осуществить классификацию исследуемых ИС на монотонные и немонотонные системы первого и второго типа. В случае отнесения ИС к монотонной системе первого типа или немонотонной системе первого типа для комплексного исследования качества ее функционирования можно дополнительно применять соответственно математический аппарат теории нечетких отношений или методы когнитивного моделирования.

Литература

1. *Рябинин И.А., Черкесов Г.Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 166 с.
2. *Райншке К., Ушаков И.А.* Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
3. *Ушаков И.А.* Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов. М.: Дрофа, 2008. 240 с.

4. *Можжаев А.С.* Универсальный графоаналитический метод, алгоритм и программный модуль построения монотонных и немонотонных логических функций работоспособности систем. // Труды третьей Международной научной школы "Моделирование и Анализ Безопасности и Риска (МА БР - 2003)", август 20-23, 2003, СПб, С. 101–110.
5. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
6. *Соложенцев Е.Д.* Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2004. 432 с.
7. *Павлов А.Н.* Исследование генома двухполюсной сетевой структуры // Труды IX Международной научной школы МА БР-2009 «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах», Санкт-Петербург, 7–11 июля 2009 г. СПб.: ГУАП, 2009, С. 429–434.
8. *Павлов А.Н., Соколов Б.В.* Структурный анализ катастрофоустойчивой информационной системы // Труды СПИИРАН, Выпуск № 8. СПб.: СПИИРАН, 2009, С. 128–151.
9. *Павлов А.Н.* Логико-вероятностный и нечетко-возможностный подходы к исследованию монотонных и немонотонных структур // XI Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии XXI века», 12-14 мая 2010 г. Тез. докладов. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2010. С. 483–492.
10. *Павлов А.Н.* Исследование немонотонных систем: анализ «мостиковой» структуры // Труды X Международной научной школы МА БР-2010 «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах», Санкт-Петербург, 6–10 июля 2010 г. СПб.: ГУАП, 2010, С. 85–93.
11. *Павлов А.Н.* Способы реализации функционально полного набора логических операций при когнитивном моделировании // Материалы первой международной конференции «Автоматизация управления и интеллектуальные системы и среды», Россия, Терскол, 20-27 декабря 2010 г. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2010. Т.3. С. 72–76.
12. *Осипенко С.А., Павлов А.Н.* Исследование безопасности сложных технических объектов // Известия Вузов. Приборостроение. 2010. Т.53. №11. С. 27–31.
13. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства // Монография, научное издание / В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свириц, И.А. Гладкова. Под ред. А.С. Можжаева // Проект в рамках Концепции социально-политического проекта РАЕН «Актуальные проблемы безопасности социума» / Российская академия естественных наук. СПб: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.
14. *Можжаев А.С., Громов В.Н.* Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб.: ВИТУ, 2000. 145 с.
15. *Питер Фингар* Dot.Cloud: облачные вычисления - бизнес-платформа XXI века. Акварминовая Книга, 2011. 256 с.
16. *Ivanov D., Sokolov V.* Adaptive Supply Chain Management. London: Springer, 2010. 269 p.
17. *Иванов Д.А.* Supply Chain Management: концепции, технологии, модели. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2005. 172 с.
18. *Кульба В.В., Кононов Д.А., Косяченко С.А., Шубин А.Н.* Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем. М.: СИНТЕГ, 2004. 296 с.

19. *Кульба В.В., Миронов П.Б., Назаретов В.М.* Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых оргграфов // Автоматика и телемеханика. 1993. № 7. С. 130–137.
20. *Корноушенко Е.К., Максимов В.И.* Управление процессами в слабоформализованных средах при стабилизации графовых моделей среды // Труды Института проблем управления РАН. М.: Институт проблем управления РАН, 1999. Т.2. С. 82–94.
21. *Максимов В.И.* Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. 2005. №3. С. 30–38.
22. *Kosko B.* Fuzzy cognitive maps // Intern. Journal of Man-Machine Studies. 1986. Vol.1. P. 65–75.
23. *Федулов А.С.* Нечеткие реляционные когнитивные карты // Теория и системы управления. 2005. № 1. С. 120–132.
24. *Силов В.Б.* Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС, 1995. 228 с.
25. Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites / Ed. by R. Axelrod. Princeton: Princeton University Press, 1976. 405 p.
26. *Робертс Ф.С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 496 с.

Павлов Александр Николаевич — к.т.н., доцент; старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН. Специалист в области системного анализа и принятия решений в условиях существенной неопределенности. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор более 130 научных трудов. pavlov62@list.ru; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0103, факс +7(812)328-4450.

Pavlov Alexander Nikolaevich — PhD., associate professor; senior researcher, Laboratory for Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, SPIIRAS. Specialist in the field of systems analysis and operations research in conditions of substantial uncertainty. Research interests: development of research fundamentals for the structural dynamics of complex organizational-technical systems control theory. The number of publications — more than 130. pavlov62@list.ru; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0103, fax +7(812)328-4450.

Поддержка исследований. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00311, 11-08-01016, 11-08-00767, 12-06-00276, 12-07-00302), ОНИТ РАН (проект №2.11), Программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

Рекомендовано лабораторией информационных технологий в системном анализе и моделировании, ведущий научный сотрудник Зеленцов В.А., д-р техн. наук, проф. Статья поступила в редакцию 26.04.2012.

РЕФЕРАТ

Павлов А.Н. Классификация монотонных и немонотонных информационных систем на основе генома структуры.

Свойство монотонности систем заключается в отсутствии элементов системы, отказ или восстановление которых соответственно увеличивают или снижают надежность системы в целом. К монотонным системам первого типа относятся такие, структуру взаимодействия элементов которых можно описать монотонными логическими функциями и представить графами связности. Монотонные системы второго типа, описываемые монотонными логическими функциями, не удастся изобразить графами связности. Как правило, такие ситуации возникают, когда система имеет сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть - параллельное, отдельные элементы или подструктуры образуют циклические (мостиковые) связи и отношения между собой.

Для построения структурных моделей немонотонных информационных систем (ИС) требуется использование функционально-полного набора логических операций "И", "ИЛИ" и "НЕ".

Предлагается немонотонные ИС классифицировать аналогично монотонным на системы первого и второго типа. Причем показано, что немонотонные ИС первого типа могут быть представлены нечеткими когнитивными картами, а к немонотонным ИС второго типа относятся системы, структуру взаимодействия элементов которых можно описать немонотонными логическими функциями, но не удастся представить нечеткими когнитивными картами.

Концепция обобщенного генома структуры монотонных и немонотонных систем, предложенная автором статьи, помогает в проведении указанной классификации. Ряд свойств, которыми обладают компоненты генома структуры, разрешают классифицировать системы на монотонные и немонотонные. Если абсолютное значение старшей компоненты генома структуры равно единице, то монотонная или немонотонная ИС относится к системам первого типа, для исследования качества функционирования которых в случае монотонности можно привлекать нечеткие графы, а в случае немонотонности - нечеткие когнитивные карты. Сделано предположение о том, что не выполнение указанного свойства является необходимым условием принадлежности ИС к системам второго типа.

SUMMARY

Pavlov A.N. The classification of monotonous and nonmonotonous information systems based on genome of structure.

Monotonicity property of the systems is the lack of elements of the system failure or restoration which, respectively, increase or decrease the reliability of the system as a whole. The monotonous systems of the first type include such structure interaction of the elements which can be described by monotone Boolean functions and provide connectivity graphs. Monotonous systems of the second type described by monotonous Boolean functions cannot be represented by graphs of connectivity. Typically, such situations arise when the system is a complex combination structure of the elements one part of which form a consequent connection, and the other one - parallel and it' elements or substructures form a cyclic (bridged) connections and relationships between themselves.

For the construction of structural models of nonmonotonous information systems (IS) it is required the use of the full set of logical operations "AND", "OR" and "NOT".

It is proposed to classify nonmonotonous IS similarly to monotonous systems of first and second types. It is shown that the nonmonotonous IS of the first type can be represented by fuzzy cognitive maps, and the second type of nonmonotonous IS include systems, the structure of elements' interaction in which can be described as nonmonotonous logic functions, but cannot provide fuzzy cognitive maps.

The concept of a generalized genome structure of monotonous and nonmonotonous systems proposed by the author of the paper aids in carrying out this classification. A number of properties that have components of the genome structure allow the system to classify nonmonotonous and monotonous. If the absolute value of the older component of the genome structure is equal to one, then a monotonous or nonmonotonous IS refer to the systems of the first type, the quality of functioning of which can be investigated by monotony fuzzy graphs, as in the case of non-monotony - fuzzy cognitive maps. It is assumed that no execution of the specified property is a prerequisite for membership in the IS systems of the second type.