

Раздел VI. Искусственный интеллект и нечеткие системы

УДК 004.896

Н.Н. Филатова, А.Г. Требухин

ГЕНЕРАЦИЯ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Описан алгоритм генерации непротиворечивых решающих правил для выбора рациональной альтернативы из множества функциональных схем системы автоматизации с использованием математического аппарата теорий нечеткой логики и приближенных множеств. Алгоритм позволяет проводить многокритериальную оценку сложных вариантов схем без заметного увеличения временной сложности по сравнению с оценкой одно-контурных схем. Сформулированы требования к обучающим множествам функциональных схем с учетом особенностей составляющих их цепей и области применения. Использование алгоритма позволяет упростить разработку схем автоматизации технологических объектов и улучшить качество проработки их проектных решений.

Функциональная схема; канал управления; приближенное множество; отношение неразличимости; решающее правило.

N.N. Filatova, A.G. Trebukhin

GENERATION OF DECISION RULES FOR THE DESIGN OF AUTOMATION SYSTEMS FUNCTIONAL SCHEMES

This paper describes a generation algorithm of consistent decision rules for selecting a rational alternative from set of automation system functional schemes with use mathematical apparatus of fuzzy logic and theory of rough sets. An algorithm allow to spend a multiobjective evaluation of elaborate schemes without noticeable increase in time complexity compared with an evaluation of single-loop schemes. The requirements to training sets of functional schemes taking into account its application and features of chains making them have been formulated. Algorithm allow to reduce time required for development of automation systems and improve the quality of their design decisions.

Functional scheme; control channel; rough set; invisibility relation; decision rule.

Введение. В последнее десятилетие наблюдается рост номенклатуры технических средств автоматизации, как на отечественном, так и на зарубежном рынках, что позволяет при создании нового технического решения в области автоматизации предварительно формировать и анализировать некоторое множество альтернативных вариантов схемы. Становлению новой стратегии проектирования мешает отсутствие автоматических средств формирования схемных альтернатив. Во всех известных САПР разработка функциональных схем проводится в интерактивном режиме, что делает этот процесс не эффективным с точки зрения проектировщика.

Построение решающих правил для автоматического формирования функциональных схем на основе заданной структурной схемы является актуальной задачей, способствующей повышению качества проектных решений.

Автоматическая генерация функциональных схем систем автоматизации. Впервые задача автоматической генерации описаний функциональных схем систем автоматизации была рассмотрена в работе [1]. Два вида правил, используе-

мых для решения этой задачи, более подробно описаны в [2]. Эвристические приемы, положенные в их основу, сформулированы в работах Ахремчика О.Л. и реализуют требования функциональной согласованности и ограничений на типы и диапазоны сигналов блоков, являющихся истоком и стоком каждой отдельной связи. Требования к технической реализации структурной схемы задаются в полном объеме, то есть каждому ее звену назначается свой блок.

В работе [3] рассмотрен алгоритм решения этой же задачи, но в более общей постановке – с не полностью заданными требованиями к технической реализации структурной схемы. В исходных данных может быть приведена только одна характеристика для каждого ее блока (для устройства управления может быть задан производитель, для датчика – измеряемая физическая величина и др.). Результатом генерации будет расширенное множество альтернатив функциональных схем. Для решения задачи компоновки цепей в этом случае введено понятие шаблона. Шаблон является описанием технической реализации одной базовой структуры.

На рис. 1 приведен пример генерации функциональной схемы системы сигнализации температур двух технологических объектов на основе структурной схемы «ИП-РУ-ИУ» и множества из 10 шаблонов.



Рис. 1. Пример генерации функциональных схем

Виды правил для проектирования функциональных схем. Стратегия проектирования функциональных схем на основе предварительной генерации шаблонов предполагает создание правил, по меньшей мере, 4-х видов:

- ◆ *Rule_C*: генерации отдельной связи S_{ij} между блоками ТСА e_i и e_j [1];
- ◆ *Rule_Z*: компоновки шаблонов $\{X_g(S_{ij})\}$ на множестве связей S_{ij} ;
- ◆ *Rule_P*: оценки перспективности шаблонов $\{X_g\}$;
- ◆ *Rule_K*: компоновки контуров схемы на множестве шаблонов.

Эвристические правила *Rule_C* и *Rule_Z* являются наиболее универсальными и обладают высокой точностью и полнотой. На основе эвристики *Rule_Z* создана процедура формирования множества шаблонов X , которое включает варианты решений, отличные по эффективности. Если $||X||$ не уменьшить, то с помощью правил *Rule_K* будет сформировано множество функциональных схем, включающее наряду с близкими к оптимальным и варианты с низкими показателями эффективности. Это приведет к дополнительным временным затратам у проектировщика при анализе альтернатив схем. Проблема выделения эффективных шаблонов и

создания средств для ее решения (*Rule_P*) осложняется нечеткостью, определяющей характеристики «эффективный шаблон», «эффективная функциональная схема». Это вызвано тем, что до настоящего времени отсутствует исчерпывающий перечень характеристик схем автоматизации, позволяющий осуществлять их сравнение. Тем не менее, опытный проектировщик умеет решать эту задачу, опираясь на свойства схем, которые он может и не формализовать.

В статье рассматривается ситуация, когда эксперт оценивает качество каждого шаблона с использованием своих латентных знаний и формирует оценки обобщенного интегрального показателя d («хороший шаблон», «плохой шаблон»).

Задачу формализации знаний эксперта в виде правил *Rule_P* можно решить методами теории приближенных множеств, позволяющей работать с неточными и противоречивыми исходными данными. Теория приближенных множеств предложена в начале 1980-х годов польским математиком Павлаком, который ввел понятие информационной системы [4]. Под информационной системой понимается пара $S=(U,A)$, где $U=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – непустое конечное множество объектов (обучающее множество), $A=\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – непустое конечное множество атрибутов. Решающая таблица (система) – это информационная система вида $S=(U, A \cup \{d\})$, где d – атрибут, называемый решением. Объекты принадлежат одному классу эквивалентности $IND(\{A_r\})$, если они не могут быть различимы с использованием атрибутов $\{A_r\}$. Нижнее приближение $\underline{A}X$ множества X является объединением классов эквивалентности, все объекты каждого из которых входят в X . Верхнее приближение $\overline{A}X$ является объединением классов эквивалентности, хотя бы один объект каждого из которых относится к X . Множество BN_A называется граничной (недостовой) областью множества и состоит из объектов, которые нельзя уверенно отнести к X . Если для X верхнее и нижнее приближения совпадают, то X – обычное множество [5]. Для приближенных множеств справедливы соотношения:

$$\underline{A}X \rightarrow X \quad (1)$$

$$U \setminus \overline{A}X \rightarrow \neg X \quad (2)$$

$$BN_A \rightarrow \text{возможно } X \quad (3)$$

Правило оценки перспективности шаблона может быть представлено как

$$X = \{x: \text{Решение}(x) = \{\text{Принять}, \text{Отклонить}\}\} \quad (4)$$

Алгоритм генерации правил для оценки шаблонов. Для автоматической генерации правил вида (4) необходимо создать описание шаблонов, которое должно отражать их функциональные и структурные свойства: $A=Y \cup SO$, где Y – ограниченное число атрибутов ТСА, SO – параметры, характеризующие связи между блоками, включенными в шаблоны.

Учитывая широкое распространение многоканальных блоков, а также то, что все схемы автоматизации включают измерительные цепи, в множество Y как минимум необходимо включить погрешность измерительного преобразователя и стоимость канала регулирования схемы (отношение стоимости используемого регулятора к числу его каналов). Среди параметров, характеризующих всю схему, мы выделяем в множество SO срок службы схемы и комплексный показатель ее технологичности. Срок службы схемы является временным интервалом, в течение которого ни один ее элемент не выйдет из строя.

Алгоритм генерации решающих правил вида (4) включает следующие шаги.

1. Формирование описания шаблонов схем. Мощность обучающего множества U равна числу шаблонов. Каждый из них описывается четырьмя атрибутами из A и одним решающим атрибутом d .

$A = \{a_1: \text{Относительная погрешность измерительного преобразователя}, a_2: \text{Срок службы схемы}, a_3: \text{Комплексный показатель технологичности}, a_4: \text{Стоимость канала регулирования}\}.$

Бинарный атрибут d может принимать значения «принять/отклонить шаблон», остальные атрибуты – количественные.

Работа алгоритма рассматривается на примере анализа множества из 10 шаблонов схем (см. рис. 1), описание которых приведено в табл. 1.

Таблица 1

Шаблон	a_1 , %	a_2 , год	a_3 , отн. ед.	a_4 , руб.	d
x_1	3	3	0,35	6800	1
x_2	5	3	0,34	6800	0
x_3	3	3	0,35	6800	1
x_4	5	3	0,34	6800	0
x_5	5	3	0,35	1800	0
x_6	3	3	0,35	1800	1
x_7	5	3	0,35	1800	0
x_8	3	3	0,35	1800	0
x_9	5	3	0,35	3100	1
x_{10}	3	3	0,35	3100	1

Для всех шаблонов критерий a_2 имеет одно и то же значение, а критерий a_3 изменяется в узких пределах – от 0,34 до 0,35. С помощью a_1 и a_4 можно распознать любой объект обучающего множества с тем же качеством, что и с полным набором атрибутов.

2. Фазификация критериев оценки шаблонов. Учитывая возможность ошибочных или неточных сведений в отношении ряда количественных характеристик блоков или цепей ТСА, в предлагаемом алгоритме осуществляется переход к качественным переменным.

Для унификации процедуры сравнения и интерпретации характеристик схемы вводится так называемая универсальная лингвистическая переменная «Атрибут a », значениями которой являются две нечеткие переменные T_1 : «Желаемое значение a » и T_2 : «Не желаемое значение a ». Для каждого критерия частотным методом формируется функция принадлежности $\mu_{T1}(a_i)$ и определяется нечеткое множество первого типа «Желаемое значение a_i ». Семантика понятий второго типа T_2 определяется правилом $\mu_{T2}(a_i)=1-\mu_{T1}(a_i)$.

В результате фазификации и использования операции объединения нечетких множеств, построенных для одной базовой переменной, можно получить лингвистические интерпретации описаний шаблонов.

Описание ($ma(x)$) шаблона может быть представлено только с помощью значений $\mu_{T1}(a_i)$, каждое из которых определяет степень соответствия шаблона нечеткому множеству «Желаемое значение атрибута (a_i)».

3. Дискретизация атрибутов в описании ($ma(x_j)$). Для упрощения процедуры анализа описаний шаблонов ко всем элементам ($ma(x_j)$) применяется операция дискретизации. В табл. 2 представлены результаты фазификации критериев a_1 и a_4 , а также дискретизации $i(ma_1)$ и $i(ma_4)$ значений элементов множества ($ma(x_j)$).

Таблица 2

Шаблон	$\mu_{T1}(a_1)$	$\mu_{T1}(a_4)$	$i(ma_1)$	$i(ma_4)$	d
x_1	0,914	0,102	1	0	1
x_2	0,779	0,102	0	0	0
x_3	0,914	0,102	1	0	1
x_4	0,779	0,102	0	0	0
x_5	0,779	0,852	0	2	0
x_6	0,914	0,852	1	2	1
x_7	0,779	0,852	0	2	0
x_8	0,914	0,852	1	2	0
x_9	0,779	0,622	0	1	1
x_{10}	0,914	0,622	1	1	1

4. Нахождение отношений неразличимости. Для новой решающей системы определяются отношения неразличимости IND , а также нижняя и верхняя границы соответствующего приближенного множества:

$$IND(i(ma_1), i(ma_4)) = \{x_2, x_4\}, \{x_9\}, \{x_5, x_7\}, \{x_1, x_3\}, \{x_{10}\}, \{x_6, x_8\},$$

$$\underline{AX} = \{x_9, x_1, x_3, x_{10}\}, \overline{AX} = \{x_9, x_1, x_3, x_{10}, x_6, x_8\},$$

$$BN_A(X) = \{x_6, x_8\}, U \setminus \overline{AX} = \{x_2, x_4, x_5, x_7\}$$

5. Построение решающих правил. Используя множества \underline{AX} и \overline{AX} , по соотношениям (1–3) строятся решающие правила: производится переход от значений $i(ma)$ к соответствующим непрерывным диапазонам C^{ma}_i и их дефазификация – нахождение диапазонов значений C^a_i с учетом возрастания/убывания функции принадлежности. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Мн-во	Шаб-лон	$i(ma_1), i(ma_4)$	C^{ma1}_i, C^{ma4}_i	C^a_i, C^a_i	прин./откл.
1	2	3	4	5	6
\underline{AX}	x_9	0 1	$\mu_{T1}(a_1) < 0,847$ $0,362 \leq \mu_{T1}(a_4) < 0,737$	$a_1 > 4$ (%) $2486 < a_4 \leq 4536$ (руб.)	прин.
\underline{AX}	x_1, x_3	1 0	$\mu_{T1}(a_1) \geq 0,847$ $\mu_{T1}(a_4) < 0,362$	$a_1 \leq 4$ (%) $a_4 > 4536$ (руб.)	прин.
\underline{AX}	x_{10}	1 1	$\mu_{T1}(a_1) \geq 0,847$ $0,362 \leq \mu_{T1}(a_4) < 0,737$	$a_1 \leq 4$ (%) $2486 < a_4 \leq 4536$ (руб.)	прин.
$U\overline{AX}$	x_2, x_4	0 0	$\mu_{T1}(a_1) < 0,847$ $\mu_{T1}(a_4) < 0,362$	$a_1 > 4$ (%) $a_4 > 4536$ (руб.)	откл.
$U\overline{AX}$	x_5, x_7	0 2	$\mu_{T1}(a_1) < 0,847$ $\mu_{T1}(a_4) \geq 0,737$	$a_1 > 4$ (%) $a_4 \leq 2486$ (руб.)	откл.
BN_A	x_6, x_8	1 2	$\mu_{T1}(a_1) \geq 0,847$ $\mu_{T1}(a_4) \geq 0,737$	$a_1 \leq 4$ (%) $a_4 \leq 2486$ (руб.)	не определено

В столбце 6 приведены заключения правил. Для описания посылок можно использовать выявленные диапазоны значений функции принадлежности (столбец 4) или соответствующие им диапазоны значений атрибутов (столбец 5). Например, по шаблону x_9 можно сформировать правило:

- ♦ с использованием посылки (столбец 4) «Если Относительную погрешность датчика можно считать желаемой с уверенностью меньше 0,847 и Стоимость канала регулирования можно считать желаемой с уверенностью 0,362-0,737, то шаблон принимается»;
- ♦ с использованием посылки (столбец 5) «Если Относительная погрешность датчика >4% и Стоимость канала регулирования от 2486 до 4536 руб., то шаблон принимается».

Результаты исследований. По определению и свойствам приближенных множеств, сформированные для одной решающей системы правила не будут противоречивыми. Анализ условий применения правил вида (4) для приведенного выше примера позволил выявить следующие закономерности:

- ♦ принимается любая схема шаблона со средней стоимостью канала регулирования, несмотря на погрешность датчика (\underline{AX});
- ♦ принимается схема шаблона с большой стоимостью канала регулирования при условии высоких требований к точности датчика, то есть вводится ограничение на качество схемы при увеличении ее стоимости (\underline{AX});
- ♦ отклоняется схема шаблона с высокой погрешностью датчика, если стоимость канала регулирования – слишком большая или слишком маленькая ($U\overline{AX}$);
- ♦ возможно принимается схема с дешевым регулятором и достаточно низкой погрешностью датчика (BN_A).

Проведенные эксперименты позволили сформировать требования к составу выборки шаблонов: желательно формировать выборки, включающие в себя шаблоны с датчиками одной физической величины и исполнительными устройствами одного назначения.

Шаблоны рабочего множества ставятся в соответствие число от 0 до 1 – его «вес». Весовым значением может являться отличная от нуля минимальная нечеткая оценка одного из нескольких критериев, указанных в правилах, по которым шаблон принят к дальнейшему рассмотрению. Из набора шаблонов для дальнейшей генерации используются те, весовые значения которых не меньше заданного.

Заключение. Рассмотренный алгоритм генерации непротиворечивых решающих правил оценки схем шаблонов позволяет сократить число наименее перспективных вариантов функциональных схем при их автоматической генерации. Это происходит до их непосредственного формирования, что особенно актуально для принятия эффективных решений в реальном масштабе времени [6].

Предложенный подход можно использовать для реализации механизма автоматического расширения базы знаний САПР систем контроля и управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Филатова Н.Н., Ахремчик О.Л., Курпьянов О.В.* Автоматический синтез функциональных схем // Сб. докладов международной конференции «Знание-Диалог-Решение». KDS – 2007 Varna, Bulgaria. 2007. – С. 338-345.
2. *Ахремчик О.Л., Филатова Н.Н., Бодрина Н.И.* Система проектирования функциональных и принципиальных схем автоматизации // Труды международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'09». – М.: Физматлит, 2009. – Т. 1. – С. 73-80.
3. *Филатова Н.Н., Требухин А.Г.* Структурный синтез схем автоматизации в условиях неполных требований к технической реализации // Известия Волгоградского государственного технического университета: Межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып.13). – С. 72-79.
4. *Pawlak Z.* Rough Sets // International Journal of Information and Computer Science, 1982. – № 11(5). – P. 341-356.
5. *Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Пospelova. – М.: Физматлит, 2008. – 712 с.
6. *Бова В.В., Курейчик В.В.* Интегрированная система гибридного и комбинированного поиска в задачах проектирования и управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 37-42.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.В. Язенин.

Филатова Наталья Николаевна – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный технический университет»; e-mail: nfilatova99@mail.ru; 170023, г. Тверь, пр. Ленина, 25; тел.: 84822444488; кафедра автоматизации технологических процессов; д.т.н.; профессор.

Требухин Алексей Геннадьевич – e-mail: trebuchin2010@yandex.ru; тел.: 84822357898; кафедра автоматизации технологических процессов; аспирант.

Filatova Natalya Nikolaevna – Federal State Budget Educational Establishment of Higher Vocational Education «Tver State Technical University»; e-mail: nfilatova99@mail.ru; 25, Lenina avenue, Tver, 170023, Russia; phone: +74822444488; the department of automation of technological processes; dr. of eng. sc.; professor.

Trebukhin Alexey Gennadyevich – e-mail: trebuchin2010@yandex.ru; phone: +74822357898; the department of automation of technological processes; postgraduate student.