

§ 5 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

А.Г. Требухин

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

***Аннотация:** Показано, что проектирование системы автоматизации технологического процесса заключается в создании иерархически взаимосвязанных схем: структурная – функциональная – принципиальная электрическая – монтажная. Описаны основные компоненты интеллектуальной САПР «Controlics». Рассмотрены основные положения нового метода автоматической генерации функциональных схем, основанного на компактном представлении множества измерительных и исполнительных цепей в виде деревьев схмотехнических решений и выделении части ветвей дерева в специальные шаблоны, из которых формируются функциональные схемы. Предлагается алгоритм, позволяющий выявить и исключить из дальнейшего рассмотрения схемы, технически нереализуемые на уровне электрических соединений. Формулируется постановка задачи обобщения структур функциональных схем на основе теории приближенных множеств и этапы ее решения. В результате создаются продукционные правила, применение которых позволяет генерировать схемы систем управления в автоматическом режиме. Описываются методологические и программно-технологические особенности предлагаемой методики и функциональные характеристики необходимого для ее реализации программного обеспечения.*

***Ключевые слова:** Программное обеспечение, проектирование, схема, связь, цепь, шаблон, верификация, обобщение, эвристики, продукции*

Задача автоматизации проектирования схем систем управления

Проектирование системы автоматизации технологического процесса осуществляется на основе создания иерархически взаимосвязанных схем: структурная → функциональная → электрическая → монтажная. Структурная схема синтезируется на основе анализа динамических свойств технологического объекта. Она является инвариантной к множеству технических средств автоматизации (ТСА). Для одной структурной схемы можно предложить множество раз-

личных вариантов ее реализации, каждый из которых представляется в виде некоторой функциональной схемы. Качество системы автоматизации определяется не только особенностями ее структуры, но и набором устройств, реализующих требуемые функции [1].

Разработка структурных схем осуществляется с помощью пакетов модулирования динамических систем (Simulink, LabView и др.). Для создания других видов схемной документации на системы автоматизации используются узкоспециализированные САПР (AutomatiCS ADT, САПР Альфа, CADElectro, SchematiCS и др.). В этих системах создание проекта системы

автоматизации производится в интерактивном режиме, что ведет к проработке единственного варианта ее технической реализации.

Значительное количество ручных операций при разработке функциональных и принципиальных электрических схем не позволяют:

- сосредоточиться на анализе и выборе современных ТСА, их унифицированном описании в базе данных и верификации этих описаний;

- осуществлять сравнение функциональных возможностей различных вариантов технических решений систем автоматизации.

Для повышения качества проектных решений необходимо расширить возможности САПР с помощью:

- средств автоматической генерации для заданной структурной схемы множества вариантов моделей функциональных схем (М_ФС);

- механизма автоматического расширения набора правил построения функциональных схем.

САПР, реализующая эти функции, может рассматриваться как интеллектуальная система, решающая задачи генерации объема понятия о структурной схеме и построения обобщений на множестве функциональных схем.

В Тверском государственном техническом университете создана экспериментальная версия интеллектуальной системы «Controlics» для автоматизированного проектирования схем автоматизации. В ее состав включены:

- база данных и знаний, включающая средства администрирования, описание технических средств автоматизации, архив проектных решений и правила генерации схем;

- клиентское приложение, включающее:
 - редактор структурных схем;
 - построитель задания на проектирование;
 - генератор функциональных и принципиальных электрических схем;
 - модуль обобщения, анализа и выбора схем;

- средства интеграции с внешними приложениями.

Модуль генерации функциональных схем обеспечивает формирование множества альтернативных решений технической реализации присутствующей в задании на проектирование структурной схемы. Модуль обобщения необходим для автоматизации процесса формирования продукций, расширяющих рабочий опыт системы.

Метод автоматической генерации схем и алгоритмы верификации и обобщения проектных решений

В основу модуля генерации функциональных схем рассматриваемой системы положен новый метод, позволяющий автоматически формировать описания графов М_ФС для заданного варианта структурной.

Для компактного представления множества цепей, которые можно использовать для построения М_ФС, предлагается использовать деревья схмотехнических решений (ДСР) [2].

ДСР – связанный ациклический ориентированный граф, объединяющий только те варианты электрических цепей, которые построены с использованием одной модели управляющего устройства. Каждая ветвь ДСР отражает одну цепь, которая может входить в один или несколько вариантов М_ФС.

Любой вершине ДСР соответствует конкретный элемент ТСА. Для соответствующих элементов родительской и дочерней вершин ДСР выполняются условия согласованности типов и диапазонов используемых ими сигналов. Направление связей, принадлежащих цепи, определяется классом висячей вершины ДСР (классом соответствующего ей элемента). Для каждого входящего в ДСР элемента должны выполняться требования:

– независимость характеристик ТСА друг от друга. Вследствие этого преобразование сигнала зависит только от функции преобразования каждого из устройств, а не от их взаимного влияния;

– отсутствие внутренней обратной связи: сигнал в устройстве распространяется однонаправлено — от входа к выходу [3].

Множество цепей одного управляющего устройства можно объединить в одно ДСР. Это дает возможность строить множество $\{M_ФС\}$ на основе одного ДСР независимо от других и безотносительно к сложности структурной схемы. В противном случае, при выборе в качестве корня ДСР датчика (исполнительного устройства), являющегося истоком (стоком) измерительной (исполнительной) цепи, возможные варианты этих цепей для одной $M_ФС$ будут разнесены по разным ДСР и никакой обособленности между ними не будет, что приведет к зависимости числа ДСР от числа измерительных и исполнительных цепей структурной схемы.

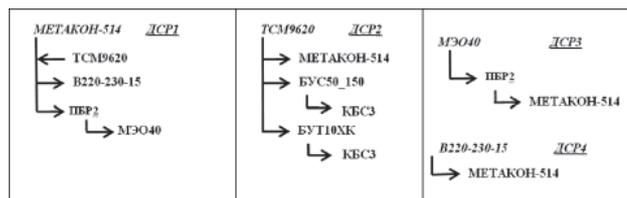
Например, в задание на проектирование включены термометр сопротивления ТСМ9620, лампа сигнальная накаливания В220-230-15, механизм электрический однооборотный МЭО40, регулятор Метакон-514. Возможные варианты ДСР приведены на рисунке 1.

Анализируя единственное ДСР на регуляторе Метакон-514, можно построить максимально возможное количество измерительных и исполнительных цепей.

На основе анализа ДСР можно построить:

- одноконтурные одноканальные схемы $\{vZ1\}$;
- цепи корректирующих связей $\{vZ2\}$;
- цепи «датчик – исполнительное устройство» $\{vZ3\}$;
- цепи «исполнительное устройство – датчик» $\{vZ4\}$.

Рис.1. Деревья схемных решений с различными корневыми вершинами



Схемы $\{vZ1\}$, $\{vZ2\}$, $\{vZ3\}$ и $\{vZ4\}$ названы «шаблонами», а структурные схемы или их фрагменты, техническими реализациями которых являются шаблоны – базовыми структурами. В приведенном выше примере

$\{vZ1\} = \{ТСМ9620 \rightarrow \text{Метакон-514} \rightarrow \text{ПБР2} \rightarrow \text{МЭО40};$

$ТСМ9620 \rightarrow \text{Метакон-514} \rightarrow \text{В220-230-15}\}.$

Из $\{vZ1\}$ легко получить множество функциональных схем, соответствующих структурной Z_{mn} = «mИП-рУ-nИУ», где m,n-любые целые неотрицательные числа. Структурные схемы такого типа находят очень широкое распространение, так как они отражают возможные функциональные связи измерительных и исполнительных цепей одного регулятора. Любую сложную многоконтурную систему (каскадную, комбинированную и др.) можно скомпоновать из различных Z_{mn} , создавая при необходимости связи между регуляторами из $\{vZ2\}$. Использование $\{vZ3\}$ позволяет строить системы управления на базе элементов с жесткой (непрограммируемой) логикой, например для генерации связи между реле температуры и устройством сигнализации с дискретным входом. Применение $\{vZ4\}$ позволяет использовать в задании на проектирование исполнительные устройства, требующие для управления информацию о состоянии регулирующего органа, на который они оказывают воздействие.

Использование шаблонов позволяет значительно упростить процесс генерации функциональных схем:

– необходимое для построения функциональной схемы число шаблонов $\{vZ1\}$ равно максимуму из числа входов и выходов регулятора. Оно может быть меньше количества необходимых каналов управления, несмотря на то, что шаблон из множества $\{vZ1\}$ является технической реализацией одного канала управления;

– независимо от сложности элемента ТСА, для включения в шаблон требуется использовать только один его вход и один связанный с ним выход;

– независимость механизма генерации ДСР от приведенной в задании на проектирование структурной схемы делает процесс генерации практически инвариантным к сложности проектируемой системы. Кроме того, наибольшее число обращений к базе данных ТСА производится на этапе генерации шаблонов, а временная сложность компоновки шаблонов пренебрежимо мала по сравнению со временем их построения. Это особенно актуально для создания распределенных САПР;

– использование шаблонов позволяет определить возможность реализации и оценить перспективность функциональной схемы, не осуществляя ее генерацию.

Если построена модель функциональной схемы, то совокупность ее связей можно рассматривать как исходные данные для задачи генерации принципиальных электрических схем (ПЭС). В связи с тем, что любая связь $S_1^{\Phi C} \langle Is=Id_1, St=Id_2 \rangle$ двух элементов Id_1 и Id_2 функциональной схемы $M_{\text{ФС}}$ отличается от связи $S_j^{\text{ПЭС}}$ электрической, ее отображение представляет собой одну и более связи. С одной стороны, может показаться, что задача автоматической генерации ПЭС на основе $M_{\text{ФС}}$ алгоритмически абсолютно не сложна. Следует обращать внимание на моменты, которые не учитываются на этапе генерации $M_{\text{ФС}}$:

– при трансформации связи $S_1^{\Phi C} \langle Is=Id_1, St=Id_2 \rangle$ в электрическую всегда

необходимо проверять, есть ли уже в перечне присутствующих в ПЭС элементов идентичный Id_2 с незадействованным каналом того же типа, что и у Id_2 . В случае его наличия элемент Id_2 не включается в ПЭС, а все его функции передаются найденному элементу. Это делается с целью минимизации количества присутствующих в ПЭС устройств и исключения нерационального использования множества многоканальных элементов, у которых количество задействованных каналов меньше максимально возможного;

– соблюдение условий замкнутости цепей электропитания: источники питания часто не включаются в задание на проектирование и, соответственно, не участвуют в процессе генерации $M_{\text{ФС}}$. Однако существуют схемы, в которых они являются функциональным элементом системы управления. Некоторые ТСА (блоки усиления мощности, датчики релейного типа) включаются в разрыв цепи питания постоянного тока, что не отражается в функциональной схеме. В этом случае контакт «+» у источника питания будет задействован подсоединением соответствующего устройства, а контакт «-» с формальных позиций остается незанятым – цепь питания станет разомкнутой и, в частности, по ней не потечет ток даже при замыкании реле. Для устранения данного недостатка указанный контакт «-» необходимо подключить к контакту «общий выходов» управляющего устройства;

– соблюдение условия согласованности максимальной токовой нагрузки на источники питания: при расчете числа необходимых в схеме блоков питания следует принимать во внимание данные о токах, потребляемых техническими средствами. Для каждого разъема блока питания суммарное значение токов, потребляемых подключенными к нему устройствами, не должно превышать максимально возможного;

– если типы разъемов элементов Id_1 и Id_2 не позволяют их соединить проводниками,

то необходимо подобрать соответствующий межблочный соединитель;

– сгенерированный по всем правилам вариант M_FC на уровне ПЭС может оказаться нереализуемым. Если разъем элемента-источка Id_1 связи $S_i^{FC} \langle Is=Id_1, St=Id_2 \rangle$ занимает все контакты соответствующего многоканального разъема у элемента-стока Id_2 , то оставшиеся свободные функциональные входы Id_2 использовать невозможно. Учитывая это, простое отображение связей M_FC в связи ПЭС невозможно. Стратегию проектирования схем

[структурная \Rightarrow функциональная \Rightarrow электрическая \Rightarrow монтажная]

следует модифицировать:

[структурная \Rightarrow функциональная \Rightarrow

исключение нереализуемых вариантов генерацией ПЭС без цепей электропитания, конец в случае невозможности \Rightarrow

электрическая \Rightarrow монтажная]

В этом случае имеет место не только последовательное преобразование схемных описаний, но и наличие промежуточного этапа верификации (проверки реализуемости) M_FC .

– при проектировании интерфейсных цепей следует учитывать, что в некоторых случаях в процессе генерации ПЭС нельзя использовать прямое соответствие контактов (соединение одноименных контактов). Например, в интерфейсе RS-232 контакты источника TxD должны соответствовать контактам приемника RxD, то есть имеет место перекрестное соединение.

Указанные моменты названы условиями реализуемости функциональных схем.

Учитывая огромное количество содержащихся в реальной базе ТСА элементов, даже для сравнительно простой структурной схемы может быть сгенерировано множество вариантов функциональных. Положительный момент – освобождение проектировщика от рутинных операций перебора ТСА, отрицательный – экономленное на этом время затрачивается на выбор наилучшей альтернативы схемы.

Один из путей повышения эффективности САПР в этом случае связан с созданием средств автоматического расширения базы знаний – формировании собственного опыта системы проектирования. Для сравнения схем автоматизации, в основном, используются качественные критерии и большой объем экспертных оценок [4]. В [5] предложена система признаков для описания особенностей структуры функциональных схем. Система включает 8 критериев K , которые оцениваются по числовой шкале. На их основе и с использованием бинарных экспертных оценок производится формирование производных правил, пополняющих базу знаний САПР.

Пусть описание каждой функциональной схемы в пространстве признаков K дополнено оценками ее перспективности. Обучающая выборка формируется на множестве $S = K \cup d_3 \cup d_k$. Необходимо построить на множестве S продукции вида $\langle u, Q, F_v \rightarrow d_k(K, d_3), R \rangle$, где

u – индекс (порядковый номер, имя) правила в базе знаний САПР;

F_v – упорядоченный перечень связей, определяющих структуру измерительных или исполнительных цепей;

Q – множество управляющих устройств, которые могут использоваться с F_v ;

$d_3 = \{1, \text{если эксперт считает схему перспективной}; 0, \text{если эксперт считает схему неперспективной}\}$;

$d_k = \{1, \text{если схема признана перспективной по мнению эксперта } (d_3=1) \text{ и по оценкам системы}; 0, \text{если схема признана неперспективной по мнению эксперта } (d_3=0) \text{ или если между оценкой } d_3 \text{ и оценкой системы есть противоречие}\}$;

R – постусловие продукции, определяющее необходимость проверки функциональной согласованности измерительных и исполнительных цепей схемы, построенной с помощью продукции.

Введение d_k позволяет не формировать продукционные правила путем простого описания структуры каждой из принятых экспертом функциональных схем. Автоматическая генерация правил осуществляется с использованием теории приближенных множеств, работающей и в условиях неопределенности [6]. Указанные правила могут использоваться при автоматическом построении вариантов технической реализации структурных схем автоматизации с целью сокращения элементного перебора ТСА:

- в этом случае имеются уже готовые наиболее и наименее предпочтительные варианты измерительных и исполнительных цепей;

- если какое-либо сочетание элементов ТСА систематически отклоняется, то соответствующую ему ветвь можно не включать в ДСР, что приведет к сокращению числа анализируемых шаблонов путем исключения наименее перспективных вариантов. Это происходит до непосредственной генерации функциональных схем.

Таким образом, можно говорить об использовании в процессе автоматического проектирования схем систем управления правил:

- эвристических при определении возможности создания связи между двумя элементами на этапе генерации ДСР,
- верификации М_ФС и генерации ПЭС,
- усечения ДСР (для исключения из рассмотрения наименее перспективных вариантов М_ФС).

Проектирование схемы управления с помощью САПР «Controlics»

Система проектирования «Controlics» (рис.2) обеспечивает генерацию вариантов

технической реализации схем автоматизации в виде множества альтернативных функциональных схем.

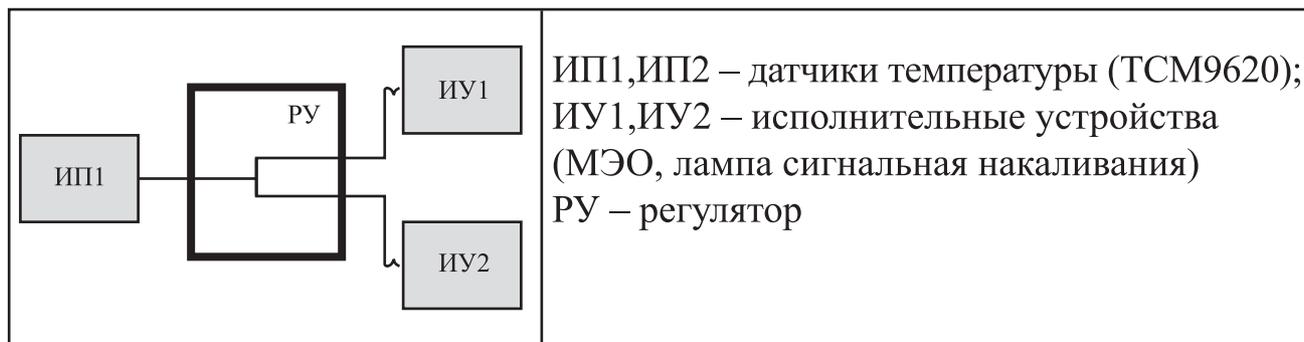
При достаточно полной базе данных технических средств указанное множество альтернатив может включать десятки или сотни схем. С помощью автоматически генерируемых продукционных правил (операция расширения базы знаний САПР) из множества функциональных схем выделяется подмножество наиболее перспективных решений (операция усечения ДСР), которые и предъявляются проектировщику для дальнейшего анализа.

Рис.2. Функциональные возможности САПР «Controlics»



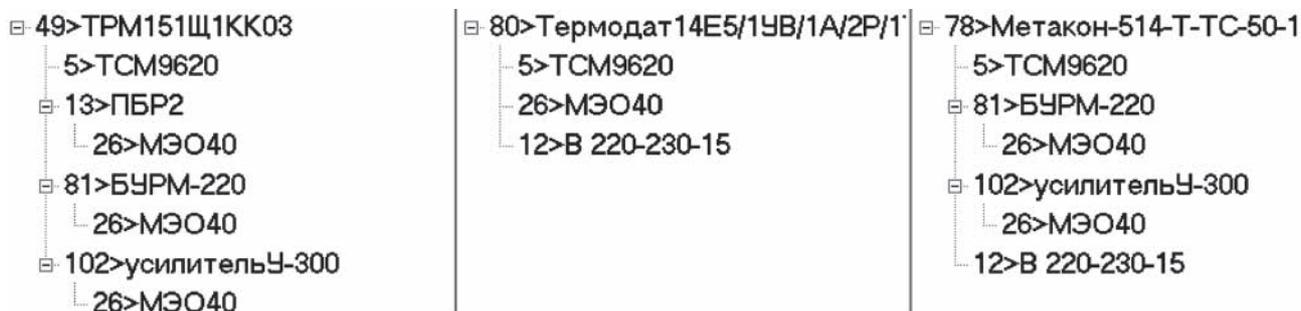
Например, необходимо спроектировать схему управления задвижкой трубопровода с использованием механизма электрического однооборотного (МЭО) на основании показаний датчика температуры (ТСМ9620). Предусмотрено наличие контура сигнализации обрыва линии подключения датчика. Управление МЭО осуществляется без использования датчиков положений. На рисунке 3 представлена структурная схема указанной системы управления.

Рис.3. Структурная схема системы управления



С учетом наложенных ограничений на используемые элементы сгенерированы ДСР на трех специализированных регуляторах температуры (рис.4):

Рис.4. ДСР на трех регуляторах



На основе анализа ДСР построено множество $\{vZ1\}$, представленное в таблице 1.

Таблица 1. Шаблоны функциональных схем

vZ1(1)	ТСМ9620→ТРМ151Щ1КК03→У-300→МЭО40
vZ1(2)	ТСМ9620→ТРМ151Щ1КК03→БУРМ-220→МЭО40
vZ1(3)	ТСМ9620→ТРМ151Щ1КК03→ПБР-2М→МЭО40
vZ1(4)	ТСМ9620→Термодат14Е5/1УВ/1А/2Р/1С→МЭО40
vZ1(5)	ТСМ9620→Термодат14Е5/1УВ/1А/2Р/1С→В220-230-15
vZ1(6)	ТСМ9620→Метакон-514-Т-ТС-50-1→БУРМ-220→МЭО40
vZ1(7)	ТСМ9620→Метакон-514-Т-ТС-50-1→У-300→МЭО40
vZ1(8)	ТСМ9620→Метакон-514-Т-ТС-50-1→ В220-230-15

Из {vZ1} получены 3 М_ФС. Одна из них приведена в таблице 2.

Таблица 2. Табличная модель функциональной схемы

Номер	Исток	→	Сток	Номер
1	термометр сопротивления медный 9620	→	Метакон-514-Т-ТС-50-1	2
2	Метакон-514-Т-ТС-50-1	→	лампа накаливания сигнальная В220-230-15	3
2	Метакон-514-Т-ТС-50-1	→	блок управления БУРМ-220	4
4	блок управления БУРМ-220		механизм электрический однооборотный МЭО40	5

С применением структурного обобщения функциональных схем получены 2 производных правила:

Схема equal МЕТАКОН514-Т-ТС → equal БУРМ-220 → equal МЭО40 принимается

Схема equal МЕТАКОН514-Т-ТС → equal У-300 → equal МЭО40 отклоняется

Эквивалентность equal двух элементов предполагает полное совпадение их функций преобразования, числа каналов, типов и диапазонов используемых сигналов и других существенных характеристик (для датчиков – погрешность и др.).

Если и в дальнейшем будут создаваться правила, в которых сочетания *У-300 → МЭО40* систематически отклоняются, то соответствующая ему ветвь будет исключена из ДСР, тем самым сократится число неперспективных функциональных схем.

Заключение

Построение схемных решений систем управления основывается не только на последовательном преобразовании моделей

технической структуры системы, но и выполнении цикла верификации модели функциональной схемы.

Предложенная методика позволяет сократить временную сложность генерации схем автоматизации путем сокращения количества переборов элементов.

Сформирован набор правил (эвристических и производных), применение которых позволяет генерировать схемы систем управления в автоматическом режиме.

Использование в «Controlics» клиент-серверной архитектуры позволяет на рабочих станциях проектировщиков не устанавливать никаких СУБД. Для представления исходных данных и результатов генерации схем используются графовые и табличные модели. Запросы к базам данных осуществляются только на этапе генерации одноканальных схем. Это делает временную сложность генерации практически инвариантной к сложности схемы, что актуально для распределенных систем с малой пропускной способностью каналов

связи. Использование экспорта/импорта заданий на проектирования и результатов генерации с использованием форматов dxf, xls, xml, html позволяет интегрироваться с другими программными комплексами (AutoCAD и др.).

Разработанное программное обеспечение можно использовать не только для генерации схем различного рода, но и верификации описания конкретного элемента в базе данных ТСА. Оно позволяет строить множество схем на базе одного элемента, например системы контроля с использованием конкретного датчика, системы управления на базе конкретной модели регулятора и др.

Библиография:

1. Ахремчик, О.Л. Информационная база для автоматизированного проектирования схем систем управления технологическими объектами / О.Л. Ахремчик // Информационные технологии. – 2009. № 8. – С. 17-21.
2. Филатова, Н.Н. Автоматическая генерация деревьев схемотехнических решений / Н.Н. Филатова, А.Г. Требухин, О.Л. Ахремчик // Труды международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'11». М.: Физматлит, 2011. Т.2. С 122-130.
3. Корячко, В.П. Теоретические основы САПР / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
4. Емельянов, С.В. Системное проектирование средств автоматизации / С.В. Емельянов, Н.Е. Костылева, Б.П. Матич, Н.Н. Миловидов. М.: Машиностроение, 1978. 190 с.
5. Филатова, Н.Н. Автоматическое обобщение вариантов технической реализации структурных схем систем автоматизации / Н.Н. Филатова, А.Г. Требухин // Труды международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'12». М.: Физматлит, 2012. Т.1. С 174-181.
6. Вагин, В.Н. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская, М.В. Фомина. М.: Энергоатомиздат, 2008. 712 с.

References (transliteration):

1. Akhremchik, O.L. Informatsionnaya baza dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya skhem sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob'ektami / O.L. Akhremchik // Informatsionnye tekhnologii. – 2009. № 8. – С. 17-21.
2. Filatova, N.N. Avtomaticheskaya generatsiya derev'ev skhemotekhnicheskikh resheniy / N.N. Filatova, A.G. Trebukhin, O.L. Akhremchik // Trudy mezhdunarodnogo kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «AIS-IT'11». М.: Fizmatlit, 2011. Т.2. S 122-130.
3. Koryachko, V.P. Teoreticheskie osnovy SAPR / V.P. Koryachko, V.M. Kureychik, I.P. Norenkov. М.: Energoatomizdat, 1987. 400 s.
4. Emel'yanov, S.V. Sistemnoe proektirovanie sredstv avtomatizatsii / S.V. Emel'yanov, N.E. Kostyleva, B.P. Matich, N.N. Milovidov. М.: Mashinostroenie, 1978. 190 с.
5. Filatova, N.N. Avtomaticheskoe obobshchenie variantov tekhnicheskoy realizatsii strukturnykh skhem sistem

avtomatizatsii / N.N. Filatova, A.G. Trebukhin // Trudy mezhdunarodnogo kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «AIS-IT'12». M.: Fizmatlit, 2012. T.1. S 174-181.

6. Vagin, V.N. Dostovernyy i pravdopodobnyy vyvod v intellektual'nykh sistemakh / V.N. Vagin, E.Yu Golovina, A.A. Zagoryanskaya, M.V. Fomina. M.: Energoatomizdat, 2008. 712 s.