



Онтологические модели систем управления технологическими процессами нефтеперерабатывающих производств

© 2026, Т.М. Муртазин

Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), Уфа, Россия

Аннотация

Рассматриваются вопросы разработки подсистемы формирования решений по показателям качества получаемых продуктов и технико-экономическим показателям технологических процессов для систем управления и обеспечения безопасности нефтеперерабатывающих производств на основе использования онтологий. Актуальность работы обоснована необходимостью формализации подходов к определению структуры правил формирования решений в системах управления и обеспечения безопасности, когда используются эвристическая информация и неформализованные знания, и результат синтеза системы управления определяется квалификацией разработчика и привлекаемых экспертов. Описываются подходы к формализации процедуры синтеза подсистемы формирования управлений и диагностики на основе базы знаний в форме иерархии классов онтологий и семантических отношений между элементами классов, в качестве которых рассматриваются типовые технологические процессы и технологические аппараты. Предложенная процедура эволюционного синтеза с использованием иерархии моделей топологического уровня и детализированного описания объекта для заданных условий применения позволяет сформировать решение как пересечение возможных реализаций системы. Такие решения определяются онтологиями объекта и ограничениями со стороны системы управления и требований разработчика, знания которого, как правило, представлены в форме эвристик. Рассматривается пример синтеза топологической модели технологического блока нефтеперерабатывающего производства на основе онтологий для применения в системах управления и диагностики отказов оборудования.

Ключевые слова: управление, диагностика отказа, формирование решений, база знаний, онтология, матрица смежности, технологический процесс, нефтеперерабатывающее производство.

Цитирование: Муртазин Т.М. Онтологические модели систем управления технологическими процессами нефтеперерабатывающих производств. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С.240-254. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-240-254.

Благодарности: автор выражает признательность д.т.н., профессору Веревкину Александру Павловичу за замечания и рекомендации при подготовке данной статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Процесс формирования решений в системах автоматического управления традиционно реализуется последовательностью этапов: 1) получение информации о состоянии объекта управления (ОУ); 2) оценка состояния ОУ относительно желаемого; 3) расчёт управлений на основе заданного алгоритма. Аналогично решается задача диагностики отказов элементов технологического объекта и принятия решения по снижению последствий отказа: 1) получение информации о значениях индикаторов состояния объекта диагностики (ОД); 2) оценка значений индикаторов и формирование диагноза; 3) формирование решений по локализации отказа и сохранению рабочего состояния ОД.

Информацию о состоянии ОУ и ОД можно получить двумя способами: прямое измерение; вычисление по модели. Учитывая, что для объектов нефтеперерабатывающих произ-

водств характерно наличие не измеряемых на потоке параметров [1], например, показателей качества (ПК) продуктов и составов сырья, их оперативное получение возможно только вычислением по моделям [2]. Кроме того, в алгоритмах управления и оптимизации по ПК и технико-экономическим показателям (ТЭП) используются прогнозные модели ОУ. Процедуры оценки состояния ОУ в системах оперативной диагностики (СОД) также включают использование прогнозных моделей индикаторов состояния ОД [3].

На первом этапе процесса формирования управлений строятся модели систем M_S , описывающих в комплексе с измерительной информацией переменные состояния ОУ $Y = [y_1, \dots, y_m]$, m – размерность вектора параметров состояния, как функцию входных определяющих переменных $X = [x_1, \dots, x_n]$, n – размерность вектора входных параметров.

Степень достижения целевых состояний системы управления (СУ) или элементов СУ в системах обеспечения безопасности (СОБ) на втором этапе оценивается по моделям требований M_T . Оценки имеют вид векторных критериев (в СУ) или значений диагностических показателей (в СОБ). Формирование оценок состояния $Z = [\zeta_1, \dots, \zeta_m]$ представляется в форме набора продукционных правил [4], в antecedentes которых используются условия от невязки текущих значений Y и Y^{TP} , где индекс «Тр» отражает требуемые или допустимые значения Y , а консеквентами являются оценки ζ_i ($i=1, \dots, m$) в виде логических значений булевой или нечёткой логики.

На третьем этапе определяются параметры для изменения состояния объекта – управляющие воздействия в СУ или меры реагирования на неисправности в СОБ. Модели формирования решений M_U могут быть реализованы на основе численных методов оптимизации [5] или логических моделей, в частности, продукционных правил.

Технологии усовершенствованного управления и обеспечения безопасности (СУиОБ) предполагают использованием прогнозных моделей систем M_S , которые позволяют производить оценку состояния ОУ по моделям требований M_T при формировании решений по управлению и диагностике состояния оборудования ОУ.

1 Подходы к построению моделей состояния объекта управления

Одним из существенных факторов, определяющих сложность решения задачи моделирования ОУ нефтеперерабатывающих производств для целей оперативного управления по ПК и ТЭП и диагностики отказов, является многосвязность параметров ОУ. Технологические объекты характеризуется как сложные в статическом и динамическом аспектах:

- значения параметров состояния определяются несколькими управлениями, что вносит неопределённость при назначении управлений и формировании диагноза;
- параметры состояния коррелированы между собой;
- взаимосвязи между параметрами состояния, а также связь параметров состояния с параметрами управления имеют различные статические и динамические характеристики.

Для прогноза параметров состояния в СУиОБ применяются модели с использованием: *методов статистической обработки информации* – корреляционный, дисперсионный анализы [6]; *эвристической информации* – когнитивные модели [7]; *методов искусственного интеллекта* – продукционные системы (ПС), семантические сети, нейронные сети, нечёткие модели и их комбинации [4, 8].

Традиционно разработка модели состояния M_S основана на эволюционном синтезе [9].

На первом этапе концептуального моделирования проводят анализ ОУ, определяют перечень параметров, которыми характеризуется ОУ, значения которых в рамках регламентных ограничений обеспечивают технологический режим, определяют перечень управлений и измеряемых возмущений, характеризующих состояние ОУ.

На втором этапе проводят анализ уровней связи между входными и выходными параметрами, определяют значимые параметры для целей решаемой задачи и формируют модель ОУ на топологическом уровне.

На третьем этапе определяют операторы связей между входными параметрами и параметрами состояния и формируют структурную модель.

На четвертом этапе проводят параметризацию модели и определяют значения параметров операторов функциональных зависимостей, например, для моделей в форме уравнений регрессии методом наименьших квадратов или его модификациями. Для обеспечения адекватности модели могут применяться различные методы регуляризации [10].

При решении задачи управления модель M_s используется для расчёта управлений U :

$$U = \Phi_1(E), \quad (1)$$

$$E = \varphi(Y - Y^T), \quad (2)$$

где $\Phi_1(*)$ – оператор (метод) расчёта управления, может быть реализован на основе численно-оптимизационного подхода или семантико-логического [11], $\varphi(*)$ – функция расчёта невязки E , Y^T – требуемое значение параметров состояния, Y – состояние системы, рассчитанное по модели прогноза состояния ОУ.

При диагностике состояния ОУ на основе параметров состояния Y формируются диагностические показатели Ξ , определённые в качестве индикаторов состояния C ОД:

$$C = \Phi_2(\Xi), \quad (3)$$

где $\Phi_2(*)$ – оператор (метод) формирования диагностического вывода на основе установления причинно-следственных связей между фактами нарушения ограничений для индикаторов состояния и их возможными причинами, например, в виде продукционных правил.

В качестве диагностических показателей могут использоваться значения невязки:

- между измеряемыми и рассчитываемыми по M_s параметрами;
- балансовых моделей (моделей материального, энергетического баланса);
- инвариантов, как результатов вычисления моделей M_s с разной структурой.

Первые три этапа разработки модели состояния M_s выполняются на основе эвристической информации об объекте [12], и результат во многом определяется субъектом, разрабатывающим модель. Ключевым вопросом является структурирование информации на уровне топологического описания модели M_s с учётом обеспечения простоты реализации и точности моделирования, достаточной для целей оперативного управления и диагностики.

Разработка моделей СУиОБ представляет собой процедуру эволюционного синтеза с использованием иерархии моделей: топологическое описание объекта (верхний уровень); детализированное описание объекта для конкретных задач (нижний уровень). Модели верхнего уровня содержат образное описание объекта на уровне параметров множеств X , Y и их связей, характерных для предметной области объекта моделирования (ОМ). Модели нижнего уровня содержат конкретизацию связей в различных формах: вербальные шкалы, числовые коэффициенты, функциональные связи, учёт ограничений от ОМ и задачи моделирования.

2 Онтологии структурного синтеза модели объекта верхнего уровня

Учитывая ограниченный класс технологических процессов и оборудования в составе технологических установок нефтеперерабатывающих производств, можно поставить задачу разработки топологической модели объекта на основе выбора описания из ограниченного набора технологического оборудования ОМ, представляемого онтологиями.

Ключевыми вопросами онтологий является определение понятий (сущностей) предметной области, отношений между ними [13-15]. Формализация представления онтологий включает определение способа описания связей между понятиями.

Общая схема формирования базы знаний в форме онтологий включает этапы создания словаря объектов, концептуализации и формирования топологии ОМ.

Этап создание словаря объектов включает определение множества сущностей, которые характеризуют предметную область создаваемой базы знаний. Например, для нефтеперерабатывающих производств такие сущности можно представить множеством $PrEq$: характеризующим технологическое оборудование (наименование технологического оборудования); характеризующим технологический процесс (управляемые и возмущающие X и контролируемые Y параметры).

Этап концептуализации включает формирование подсистем, представляющих объекты, характерные для конкретной технологической установки, и определение сущностей, характерных данному технологическому оборудованию.

Этап формирования топологии ОМ включает определение структурных свойств подсистем и формального представления связей между сущностями онтологии.

В стандарте [16] описан способ представления моделей данных и баз знаний для проектирования перерабатывающих предприятий в формате RDF и синтаксис языка в категории представлений XML . Способ представления данных для моделирования, принятый в статье, опирается на стандарт [16] и используется для разработки СУиОБ.

Модели на топологическом уровне можно представить в форме графа [17], в котором сущности – это узлы графа, а отношения между ними – дуги. Предоставление графа для формализации топологии ОМ удобно в форме матрицы смежности.

Учитывая многосвязную структуру ОУ, модель объекта на топологическом уровне представляется матрицей смежности размером $n \times m$, n – количество управляющих и возмущающих переменных, m – количество параметров состояния:

$$M_T = [b_{ji}], \quad (4)$$

где b_{ji} – бинарная переменная, определяющая наличие (значение 1) или отсутствие (значение 0) связи между выходным j и входным i параметрами, $i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$.

На параметрическом уровне отношения между параметрами представляются матрицей отношений:

$$M_F = [W_{ji}], \quad (5)$$

где W_{ji} – функциональные связи между входным i и выходным j параметрами.

Результатом онтологического моделирования в задаче формирования M_S верхнего уровня для объектов нефтеперерабатывающих производств является получение формализованного описания отношений сущностей матрицей смежности, как модели топологического уровня:

- технологической схемы производства как отношений типового технологического оборудования $PrEq$;
- технологического оборудования $PrEq$ как отношений характеризующих переменных X, Y .

В соответствии с иерархией сущностей ОМ для синтеза матрицы смежности используется иерархия классов моделей онтологий (см. рисунок 1):

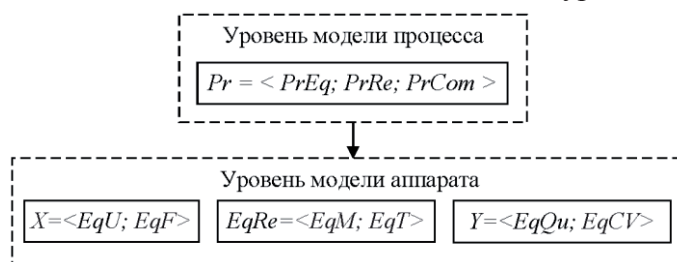


Рисунок 1 – Иерархия классов онтологий моделирования технологического процесса

- класс описания технологического процесса (или технологическая схема процесса) $Pr = \langle PrEq; PrRe; PrCom \rangle$, где $PrEq$ – типовое технологическое оборудование (аппарат), $PrRe$ – отношения, отражающие взаимосвязи между единицами оборудования, $PrCom$ – множество технологических параметров, характеризующих входные и выходные потоки смежных аппаратов, которые могут быть для предыдущего аппарата контролируемой переменной, а для следующего – определяющей переменной (управление или контролируемое возмущение);

- класс описания технологического оборудования, который представлен моделями состояния для отдельного типового оборудования $Eq = \langle Y; X; EqRe \rangle$, где Y – множество параметров состояния технологического оборудования, X – множество входных переменных, определяющих параметры состояния Y , $EqRe$ – отношения между переменными множеств Y и множества X в форме матрицы смежности, $X = \langle EqU; EqF \rangle$, $Y = \langle EqQu; EqCV \rangle$, где EqU – множество управляющих переменных, EqF – множество измеряемых возмущений, $EqQu$ – множество показателей оценки эффективности работы технологического оборудования (ПК получаемых продуктов и ТЭП), $EqCV$ – множество контролируемых параметров технологического режима.

Отношения $PrRe$ представляют технологическую взаимосвязь между технологическим оборудованием установки, отношения $EqRe$ отражают уровень связности между X и Y : $EqRe = \langle EqM; EqT \rangle$, где EqM – матрица смежности параметров множеств $EqQu$ и $EqCV$ с параметрами множества X , $EqT = [t_{ji}]$ – множество термов отношений множеств $EqQu$ и $EqCV$ с множеством X , где t_{ji} – термы, задаваемые экспертно по качественной (лингвистической, нечёткой) шкале, например: сильное влияние, среднее влияние, слабое влияние. Определение термов отношений возможно также интерпретацией коэффициентов корреляции между X и Y по шкале Чеддока [18]. В таблицах 1–3 представлены фрагменты моделей уровня процесса и аппарата нефтеперерабатывающего производства и иерархия отношений между элементами.

Представление отношений в форме матриц смежности позволяет формализовать процедуру составления детализированного описания (модели нижнего уровня) с учётом свойств и ограничений конкретного ОМ. Ограничения представляются в форме матриц:

$$G = \langle GMV, GM, GVS, GCR \rangle,$$

где GMV – квадратная матрица $[n \times n]$, задающая наличие автоматической системы регулирования (АСР) для конкретного управления, с диагональными булевыми переменными mv_{ji} равными 1, если по i -й определяющей переменной ($i=1, \dots, n$) имеется АСР или предусмотрена возможность дистанционного воздействия на параметр, и остальными нулевыми элементами;

$$GMV = \begin{vmatrix} mv_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & mv_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & mv_{nn} \end{vmatrix}$$

GM – матрица $[n \times n]$, задающая наличие технического средства измерения (СИ) технологического параметра для конкретной схемы реализации контроля и управления для рассматриваемого оборудования, с диагональными булевыми переменными m_{ii} равными 1, если по i -й определяющей переменной ($i=1 \dots n$) предусмотрено средство измерения, и остальными нулевыми элементами;

$$GM = \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{nn} \end{vmatrix}$$

GVS – матрица $[n \times n]$, задающая ограничения оборудования автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), с диагональными элементами vs_{ii} равными 1, если для контура определяющей переменной нет ограничений на использование в СУиОБ, в противном случае – 0.

$$GVS = \begin{vmatrix} vs_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & vs_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & vs_{nn} \end{vmatrix}$$

GCR – ограничения учёта уровня связности параметров в матрице смежности: $GCR = \langle GMVRe, GDVRe \rangle$, где $GMVRe = [gmv]$ – термы-ограничения нечёткой матрицы отношений для переменных управления, $GDVRe = [gdv]$ – термы-ограничения матрицы отношений для переменных контролируемых возмущений.

Таблица 1 – Таблица классов онтологий модели технологического процесса (фрагмент)

<i>PrEq</i>	<i>PrCom</i>
Теплообменник	температура продукта на входе (T_{in}), расход продукта на входе (F_{in}), температура продукта на выходе (T_{out}), расход продукта на выходе (F_{out}).
Простая ректификационная колонна (РК)	температура сырья на входе (T_{in}), расход сырья на входе (F_{in}), состав сырья на входе (Q_{in}), температура верха или верхнего продукта на выходе (T^{top}), расход верхнего продукта на выходе (F_{top}), качество верхнего продукта на выходе (Q_{top}), температура низа или нижнего продукта на выходе (T_{bot}), расход нижнего продукта на выходе (F_{out}^{bot}), качество нижнего продукта на выходе (Q_{bot}), температура горячей струи на подогрев куба (T_{heat}), расход горячей струи на подогрев куба (F_{hit}), температура флегмы на орошение (T_{fl}), расход флегмы орошения (F_{fl}).
Флегмовая ёмкость	температура продукта на входе (T_{in}), расход продукта на входе (F_{in}), температура газа на выходе (T_{out}), расход газа на выходе (F_{out}), температура флегмы на выходе (T_{out}), расход нижнего продукта на выходе (F_{out}).

Таблица 2 – Таблица классов онтологий модели простой ректификационной колонны

Класс	Под-класс	N п/п	Элемент класса
<i>X</i>	<i>EqU</i>	1	расход флегмы орошения (F_{fl})
		2	температура горячей струи на подогрев куба (T_{heat})
	<i>EqF</i>	3	температура сырья на входе (T_{in})
		4	расход сырья на входе (F_{in})
		5	состав сырья на входе (Q_{in})
		6	температура флегмы на орошение (T_{fl})
<i>Y</i>	<i>EqQu</i>	1	температура начала кипения бензина ($T_{нк}$)
		2	температура конца кипения бензина ($T_{кк}$)
	<i>EqCV</i>	3	уровень в кубе колонны (L)
		4	давление верха колонны (P_{top})
		5	температура верха (T_{top})
		6	расход верхнего продукта на выходе (F_{top})
		7	температура низа (T_{bot})
		8	расход нижнего продукта на выходе (F_{bot}).

Таблица 3 – Отношения в иерархии классов онтологий

Уровень модели	Обозначение отношения	Значения отношений
<i>Pr</i>	<i>PrRe</i>	<i>true</i> (1), <i>false</i> (0)
<i>Eq</i>	<i>EqT</i>	<i>true</i> (1), <i>false</i> (0)
	<i>EqT</i>	сильное влияние (В), среднее влияние (М), слабое влияние (S)

3 Синтез топологической модели нижнего уровня

Синтез матрицы отношений топологической модели реализуется следующей последовательностью действий.

1) Из базы моделей уровня процессов *Pr* выбором соответствующего технологического оборудования *PrEq* формируют схему соединений аппаратов в субблоке (с/б) и технологических с/б в схеме установки, в которые включают аппараты по функциональному признаку, например, выполнение одной технологической операции – нагрев продукта в печи, ректификация продукта и т.п. (см. рисунок 2).

Схему взаимодействия аппаратов в с/б представляют матрицей отношений *PrRe* размером $N_k \times N_k$, где N_k – количество аппаратов в с/б $k, k=1, \dots, K, eq_{ji}=1$, если технологический аппарат j связан потоком с i , иначе 0.

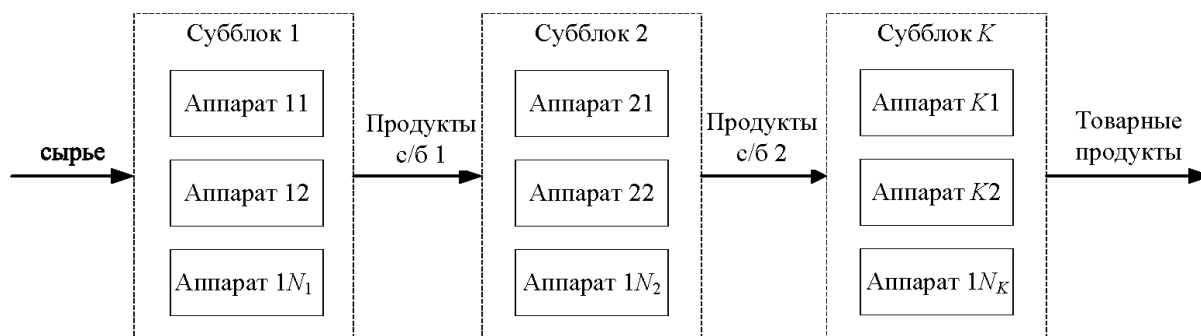


Рисунок 2 – Последовательность технологических потоков процесса

Результатом первого шага является определение: K - количества с/б; N_k - перечня технологического оборудования Eq , входящего в с/б; топологической модели с/б форме матрицы смежности $PrRe$. Например, с/б технологической операции отбензинивания нефти процесса первичной переработки нефти можно представить совокупностью аппаратов: теплообменник подогрева сырья ($p=1$) – простая ректификационная колонна ($p=2$) – аппарат воздушного охлаждения (АВО) ($p=3$) – флегмовая ёмкость ($p=4$) – испаритель ($p=5$) с матрицей отношений ($PrRe^1$).

$$PrRe^k = \begin{vmatrix} 0 & eq_{21} & eq_{31} & \dots & eq_{N_k 1} \\ eq_{12} & 0 & eq_{32} & \dots & eq_{N_k 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ eq_{1N_k} & eq_{2N_k} & eq_{3N_k} & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad PrRe^1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

2) Из базы моделей уровня технологического оборудования Eq для каждого аппарата извлекают топологическую модель, представленную матрицей смежности EqM размером $n \times m$, где $q_{ji} = 1$ (если выходная переменная y_i определяется входной x_j), 0 – иначе; pk – номер аппарата в с/б k , $k=1, \dots, K$, и матрицей термов нечётких отношений EqT размером $n \times m$, из которых конкатенацией матриц отдельных аппаратов одного с/б получают матрицы смежности и нечётких отношений с/б EqM^k и EqT^k . При объединении матриц выполняют подстановку переменных в соответствии со схемой технологических потоков с/б. Так, если переменная x_i для аппарата p является выходной y_j для ($p-1$), то переменная x_i исключается из конкатенированной матрицы смежности, и все взаимосвязи q_{ji} матрицы EqM^{p+1} на основе свойства транзитивности переносятся в новую объединённую матрицу. Для матрицы отношений термы объединённой матрицы для совместных переменных определяются по правилу максимума.

$$EqM^{pk} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} & \dots & q_{m1} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} & \dots & q_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q_{1n} & q_{2n} & q_{3n} & \dots & q_{mn} \end{vmatrix}$$

$$EqT^{pk} = \begin{vmatrix} t_{11} & t_{21} & t_{31} & \dots & t_{m1} \\ t_{12} & t_{22} & t_{32} & \dots & t_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ t_{1n} & t_{2n} & t_{3n} & \dots & t_{mn} \end{vmatrix}$$

Например, для РК ($p=2$) с/б отбензинивания нефти матрица смежности и нечётких отношений для элементов класса таблицы 2 представлена EqM^{21} , EqT^{21} .

$$EqM^{21} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad EqT^{21} = \begin{vmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & B & S & S & B & S & B \\ B & B & 0 & B & B & B & M & B \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{vmatrix}$$

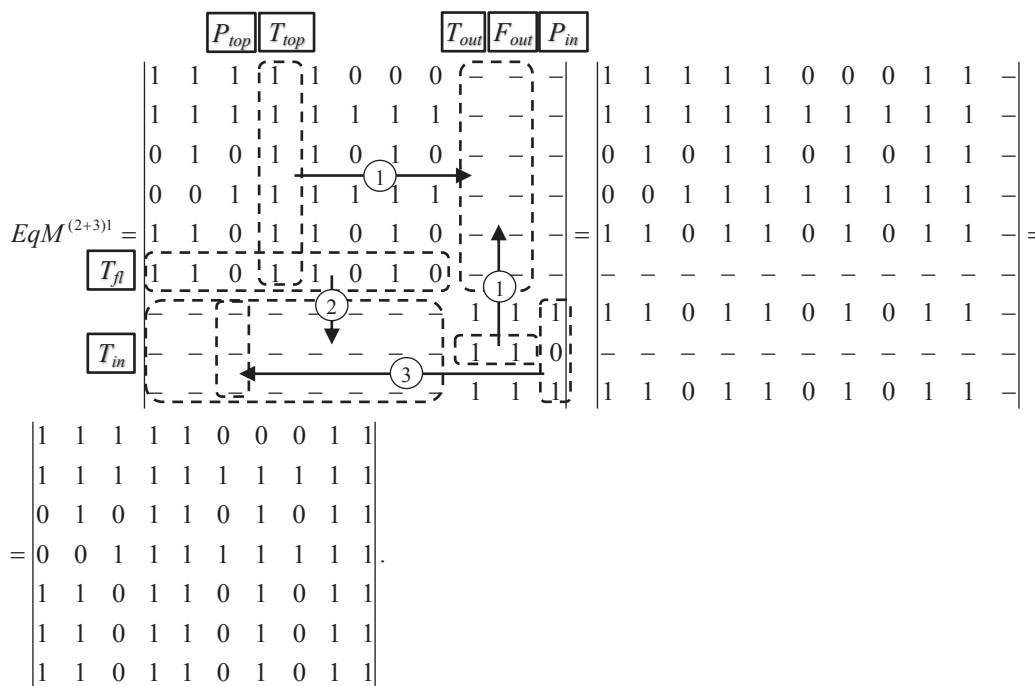
Смежным с РК по технологической схеме является АВО ($p=3$) с моделью EqM^{31} и EqT^{31} . Здесь входными параметрами являются: x =[частота вращения вентилятора (n_{ABO}); температура потока на входе АВО (T_{in}); температура воздуха на охлаждение (T_{air})], а выходными: y =[температура потока на выходе (T_{out}); расход потока на выходе (F_{out}); давление потока на входе (P_{in})]. Давление P_{in} зависит от интенсивности охлаждения газа, поэтому рассматривается как выходной параметр.

$$EqM^{31} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad EqT^{31} = \begin{bmatrix} B & B & B \\ M & M & 0 \\ B & B & B \end{bmatrix}$$

Конкатенированная матрица имеет вид $EqM^{(2+3)1}$.

Учитывая, что температура верха РК $T_{top}(j=5) = T_{in}(i=8)$, $T_{fl}(i=5) = T_{out}(j=9)$, $P_{top}(j=4) = P_{in}(i=11)$, можно получить совместную модель РК и АВО (контуром выделены взаимосвязи коммуницирующих переменных):

$$EqM^{(2+3)1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & - & - & - \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & - & - & - \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & - & - \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & - & - & - \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & - & - \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & 1 & 1 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & 1 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



На схеме стрелками обозначено наследование связей с учётом коммуницирующих параметров: 1 – для $T_{top} = T_{in}$; 2 – для $T_{fl} = T_{out}$; 3 – для $P_{top} = P_{in}$.

3) Актуализируют матрицы смежности EqM с учётом реализации АСР или наличия средства измерения для параметров множества X конкретного технологического оборудования. Формируют матрицу смежности AMV_0^k , которая отражает взаимосвязь параметров множества Y с параметрами управления, и матрицу смежности ADV_0^k которая отражает взаимосвязь параметров Y с параметрами контролируемых возмущений:

$$AMV_0^k = GMV^k \times EqM^k, \tag{6}$$

$$ADV_0^k = (GM^k - GMV^k) \times EqM^k, \tag{7}$$

где AMV_0^k , ADV_0^k – актуализированные матрицы смежности управлений и контролируемых возмущений с учётом реализации АСУТП.

Пример выполнения данного шага для топологической модели РК.

Пусть для конкретной РК доступно управление от АСР для всех элементов подкласса EqU (см. таблицу 2), тогда матрица GMV представлена квадратной матрицей 6×6 с диагональными элементами $[1; 1; 0; 0; 0; 0]$, что интерпретируется как наличие АСР расхода флегмы на орошения (F_{fl}), и температуры горячей струи (T_{heat}), а возможность измерения в АСУТП элементов EqF квадратной матрицей ограничений GM^k с диагональными элементами $[1; 1; 1; 0; 0; 1]$, что интерпретируется как отсутствие СИ для параметров: расход сырья на входе (F_{in}), состав сырья на входе (Q_m). Тогда актуализированные матрицы смежности для управлений и контролируемых возмущений имеют вид:

$$AMV_0^{21} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$ADV_0^{21} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

4) Актуализируют матрицы, полученные на шаге 3, с учётом состояния технических СИ и управления для каждого технологического оборудования:

$$AMV^k = GVS \times AMV_0^k, \tag{8}$$

$$ADV^k = GVS \times ADV_0^k, \tag{9}$$

где AMV^k, ADV^k – актуализированные матрицы смежности управлений и контролируемых возмущений с учётом ограничений на использование средств автоматизации в СУиОБ.

Для рассматриваемого примера моделирования РК ограничения на состояние средств автоматизации и их использование в СУиОБ не накладываются.

5) Формируются матрицы нечётких отношений TMV и контролируемых возмущений TDV k -го с/б композицией нечёткой матрицы отношений онтологии объекта EqT с актуализированными матрицами смежности AMV, ADV :

$$TMV^k = EqT^k \circ AMV^k, \tag{10}$$

$$TDV^k = EqT^k \circ ADV^k. \tag{11}$$

Здесь принятое обозначение операции (\circ) означает результат логического поэлементного умножения:

$$tmv_{ji}^k = \begin{cases} t_{ji}^k, & \text{если } amv_{ji}^k = 1, \\ 0, & \text{если } amv_{ji}^k = 0, \end{cases} \quad tdv_{ji}^k = \begin{cases} t_{ji}^k, & \text{если } adv_{ji}^k = 1, \\ 0, & \text{если } adv_{ji}^k = 0. \end{cases}$$

Для модели РК получаются матрицы нечётких отношений:

$$TMV_0^{21} = \begin{vmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & B & S & S & B & S & B \\ B & B & 0 & B & B & B & M & B \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{vmatrix} \circ \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$DMV_0^{21} = \begin{pmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & B & S & S & B & S & B \\ B & B & 0 & B & B & B & M & B \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{pmatrix}.$$

б) Формируется матрица нечётких отношений MTe с/б k объединением матриц TMV , TDV с учётом ограничений $GMVRe$, $GDVRe$ на уровень взаимосвязей для управляющих и возмущающих переменных:

$$MTU^k = TMV^k \cap GMVRe^k, \tag{12}$$

$$MTF^k = TDV^k \cap GDVRe^k, \tag{13}$$

$$MTe^k = MTU^k \cup MTF^k, \tag{14}$$

где $GMVRe$, $GDVRe$ – термы, определяющие уровень взаимосвязи выходных Y с входными X , который следует учитывать в топологической модели объекта для переменных управлений и возмущений.

Здесь операция \cap возвращает результат логического поэлементного пересечения $mtu_{ji}^k = tmv_{ji}^k \cap gmvre_{ji}^k$, $mtf_{ji}^k = tdv_{ji}^k \cap gdvre_{ji}^k$, а операция \cup возвращает результат логического поэлементного объединения $mt_{ji}^k = mtu_{ji}^k \cup mtf_{ji}^k$.

Пусть для модели РК накладывается ограничение на уровень взаимосвязи термом B (учитывается только сильное влияние), тогда актуальная матрица нечётких отношений представляется как:

$$MTU^{21} = \begin{pmatrix} M & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ M & M & B & B & S & S & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cap B = \begin{pmatrix} 0 & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B & B & 0 & 0 & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$MTF^{21} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & M & M & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S & B & 0 & B & B & 0 & S & 0 \end{pmatrix} \cap B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & B & B & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$MTe^{21} = MTU^{21} \cup MTF^{21} = \begin{pmatrix} 0 & B & B & B & B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B & B & 0 & 0 & B & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & B & B & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad MT^{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Шаги 2-6 повторяют для всех с/б и формируют нечёткую матрицу отношений $MTe_Pr = \bigcup_k MTe^k$ технологической установки.

Заменой термов матрицы нечётких отношений MTe_Pr на булевы переменные получают матрицу смежности топологической модели M_T ОУ и после параметризации – модель ОУ M_f , которая используется для реализации численно-оптимизационного подхода расчёта управлений [19]. Матрицу смежности M_T можно использовать для формирования продук-

ционных правил по управлению, реализуя принцип управления на основе семантологического подхода [11].

На рисунке 3 представлена функциональная модель получения топологической модели ОУ на основе онтологий.

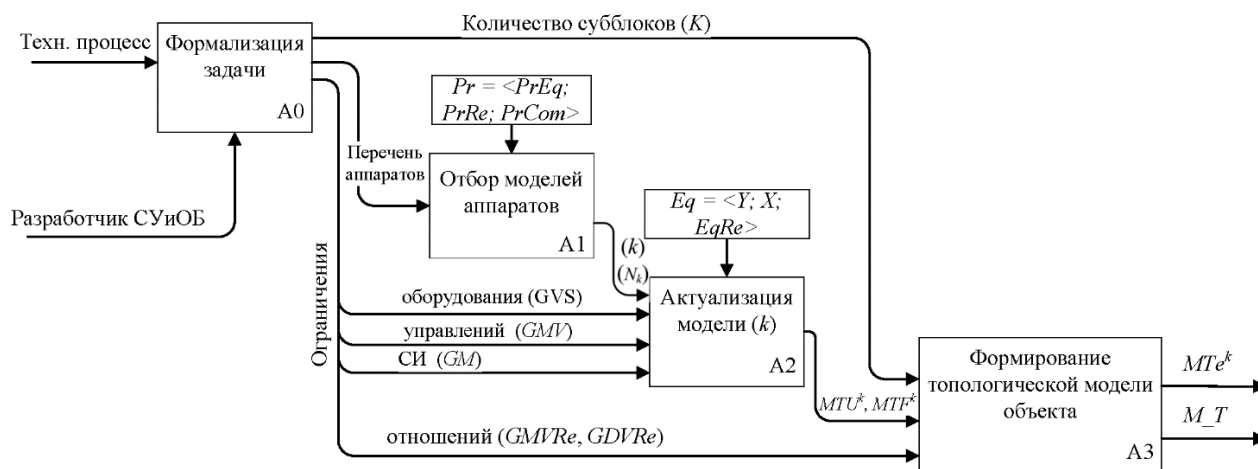


Рисунок 3 - Функциональная модель процесса синтеза топологической модели на основе онтологий

4 Синтез модели в задаче оперативной диагностики состояния

Один из методов решения задачи оперативной диагностики предполагает использование в качестве индикатора, характеризующего состояние ОД $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n\}$, уровень рассогласования информации, получаемой по различным информационным каналам, в том числе по моделям [3]. Определение топологической модели для альтернативных каналов получения информации также может выполняться на основе онтологической базы знаний.

Формирование диагнозов может выполняться на основе анализа как численных значений невязок, так и качественных взаимосвязей параметров ОД. Рассматриваются взаимосвязи между входными управляющими параметрами и выходными параметрами состояния, имея в виду, что параметры внутри множеств X, Y также могут быть коррелированы между собой. Размерность матрицы смежности топологической модели для целей диагностики EqM^D составляет $(n+m) \times (n+m)$. Отношения между переменными при формировании матрицы нечётких отношений EqT^D должны описываться термами t_{ji} , $i, j=1, \dots, (n+m)$, указывающими направление зависимости, например: большая отрицательная, малая отрицательная, малая положительная, большая положительная.

Синтез топологической модели ОД выполняется по процедуре, рассмотренной в разделе 3. Для придания различия к обозначениям, принятым в разделе 3, добавляется индекс D . В задаче диагностики ограничения реализации АСР (GMV) не рассматриваются.

Использование полученной топологической модели в задаче диагностики состояния оборудования возможно для формирования логических выражений (ЛВ) СОД, определяющих соответствие градиента $k_{ji}(p)$ зависимостей входных и выходных параметров направлению исправного состояния объекта диагностирования. Градиент определяется по значению отношения:

$$k_{ji}(p) = \frac{\Delta y_j(p-\tau)}{\Delta x_i(p)} = \frac{y_j(p-\tau) - y_j(p-\tau-1)}{x_i(p) - x_i(p-1)},$$

где $y_j(p), y_j(p-\tau-1), x_i(p), x_i(p-1)$ – значения параметров x_i, y_j в дискретные отсчёты времени p и на предыдущем цикле опроса с учётом транспортного запаздывания τ по каналу передачи

воздействий $i-j$. Знак градиента сравнивается с условными знаками термов («-1» для «большая отрицательная», «малая отрицательная» и «+1» – для «малая положительная», «большая положительная») матрицы нечётких отношений MTe^D и формируются логические переменные LV :

$$\begin{aligned} \text{для положительной связи } t_{ji} (+1): LV_{ji} &= \begin{cases} 1, \text{ если } k_{ji} > 0, \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} & i, j = \overline{1, (n+m)}. \\ \text{для отрицательной связи } t_{ji} (-1): LV_{ji} &= \begin{cases} 1, \text{ если } k_{ji} < 0, \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} & i, j = \overline{1, (n+m)}. \end{aligned}$$

Тогда ЛВ, позволяющие рассчитать индикатор неисправного состояния СИ, получают как:

$$\xi_d = \bigvee_{i=1}^{n+m} \left(\bigwedge_{j=1}^{n+m-1} (LV_{ji}) \wedge \overline{LV_{di}} \right), \quad (15)$$

т.е. состояние неисправности датчика параметра d диагностируется, если нарушена взаимосвязь между x_i, y_j , определённая значением (термом) $t_{di}, d=1, \dots, (n+m)$, при этом для других пар переменных матрицы MTe^D знак градиента $k_{ji}(p)$, соответствует значениям $t_{ji}, j \neq d$.

Индикатором неисправности технологического оборудования является нарушение всех отношений, задаваемых матрицей MTe^D , т.е. нарушена адекватность балансовых моделей:

$$Eq_k^D = \bigvee_{j=1}^m \bigwedge_{i=1}^n \overline{LV_{ji}}. \quad (16)$$

Для РК матрица нечётких отношений системы диагностики с учётом установленных ограничений имеет вид $MTe^{D(2)}$, где для простоты изложения показаны взаимосвязи только между элементами классов X и Y . Терм РВ означает большое положительное, NB – большое отрицательное. Тогда можно записать ЛВ диагностики для каждого СИ, например для неисправности преобразователя давления в колонне (P_{top}):

$$MTe^{D(2)} = \begin{vmatrix} 0 & \text{РВ} & \text{РВ} & \text{РВ} & \text{NB} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{NB} & \text{РВ} & 0 & 0 & \text{РВ} & \text{NB} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{РВ} & 0 & \text{РВ} & \text{РВ} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\xi_4 = (LV_{21} \wedge LV_{31} \wedge \overline{LV_{41}} \wedge LV_{51}) \vee (LV_{32} \wedge \overline{LV_{42}} \wedge LV_{72} \wedge LV_{82}) \vee (LV_{26} \wedge \overline{LV_{46}} \wedge LV_{56}).$$

Поскольку для формирования LV_{ji} используются приращения параметров $\Delta y_j, \Delta x_i$, вычисление ЛВ по (15) и (16) возможно только для переходных режимов. Для исключения ложных диагнозов неисправного состояния необходима оценка статистической значимости результата вывода ЛВ, которая проводится расчётом статистических критериев [20]. Так, если используется критерий Стьюдента, то неисправное состояние по значениям ЛВ будет диагностировано при $t > t_{кр.}$. Расчётом t для различных n_D , где n_D – количество положительных выводов по (15), (16), определено, что диагноз является статистически значимым при $n_D > 3$ (для уровня значимости вывода $p < 0,05$) на периоде $(3-5)T$, где T – постоянная времени передаточной функции по каналу $i-j$.

Получение ЛВ по (15) и (16) возможно отдельно для различных уровней связности параметров MTe^D с ранжированием диагностического заключения. Заменяя значения термов MTe^D на коэффициенты k_{ji} , применяя условия формирования нечётких логических переменных с учётом уровня отклонения градиента от заданного допустимого диапазона значений k_{ji} , получают нечёткие ЛВ, которые позволяют проводить диагностику функциональных отказов [20].

Топологическая модель M_T^D может использоваться для отбора факторов и формирования структуры контрольных моделей в форме уравнений линейной регрессии.

Заключение

Разработана иерархическая структура моделирования СУиОБ нефтеперерабатывающего производства на основе онтологий. На верхнем уровне формируется модель ОУ инвариантная к конкретным условиям. На нижнем – модель, релевантная особенностям конкретного объекта и решаемой задачи.

Предложен способ представления информации в онтологиях на основе матриц смежности и нечётких отношений и формальная процедура синтеза топологических моделей объекта управления и диагностики для целей проектирования СУиОБ. Использование модели ОУ в форме онтологии для типовых объектов обеспечивает решение следующих задач:

- определение основных объектов, сущностей и отношений, необходимых для получения моделей СУиОБ;
- представление информации о технологическом объекте в структурированном и формализованном виде, удобном для алгоритмизации синтеза моделей СУиОБ с учётом ограничений, накладываемых технологическим оборудованием;
- обеспечение методологической основы для синтеза СУиОБ, которая определяет структуру модели формирования решений по управлению и диагностики.

Список источников

- [1] **Веревкин А.П.** Особенности задачи управления процессами разделения нефтяных смесей на установках АВТ. *Межвузовский сб. «Нефть и газ»*. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1996. №3. С.82–84.
- [2] **Zhong W., Yu J.** MIMO soft sensors for estimating product quality with on-line correction. *Chemical Engineering Research and Design*, 2000. Vol.78. №4. P.612–620. DOI:10.1205/026387600527554.
- [3] **Witczak M.** Modelling and estimation strategies for fault diagnosis of non-linear systems. *Analytical to Soft Computing Approaches*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 212 p.
- [4] **Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.** Инженерия знаний. Модели и методы. СПб: Издательство «Лань», 2016. 324 с.
- [5] **Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М.** Методы оптимизации. М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1978. 352 с.
- [6] **Драйпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 391 с.
- [7] **Збрицак С.Г.** Когнитивное моделирование: теоретические основы, методы, ограничения. *Russian Journal of Economics and Law*, 2025. №3 (Т.19). С.675–695. DOI: 10.21202/2782-2923.2025.3.675-695.
- [8] **Хайкин С.** Нейронные сети. Полный курс. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2016. 1104 с.
- [9] **Емельянов В.В., Курейчик В.М.** Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
- [10] **Веревкин А.П., Муртазин Т.М.** Моделирование производственных процессов на основе когнитивной информации и временных рядов. *Системная инженерия и информационные технологии*, 2022, Т.4, №1(8). С.12-19. DOI: 10.54708/26585014_2022_41812.
- [11] **Горшков С.** Введение в онтологическое моделирование. ООО ТриниДата, 2016. 165 с.
- [12] **Давтян М.** Эвристическое моделирование данных в информационных системах. *Труды Института системного программирования РАН*, 2011. Том 21. С.349–356.
- [13] **Guarino N.** Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. *Int. J. of Human Computer Studies*, 1995. Vol.43(5/6). P.625–640.
- [14] **Chen W., Kloul L.** An advanced driver assistance test cases generation methodology based on highway traffic situation description ontologies. *International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering, and Knowledge Management*: Springer, Cham, 2018. P.93–113. DOI: 10.1007/978-3-030-49559-6_5.
- [15] **Моисеева Т.В.** Формирование понятийно-терминологического аппарата теории интересубъективного управления. *Онтология проектирования*, 2020. Т.10. №3(37). С.351-360. DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-3-351-360.
- [16] ГОСТ Р ИСО 15926-1-2008 Интеграция данных жизненного цикла для перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Дата введения 2008-12-18. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва: Стандартинформ, 2010. 19 с.
- [17] **Оре О.** Теория графов. 2-е изд. М.: Наука, 1980. 336 с.
- [18] **Крамер Г.** Математические методы статистики, 2 изд. М: Мир, 1975. 648 с.
- [19] **Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III.** Process dynamics and control. University of California. Wiley. Fourth Edition, 2017. 502 p.

[20] Муртазин Т.М., Назаров Т.Т. Формирование решений в системах диагностики отказов элементов автоматизированных технологических комплексов. *Автоматизация процессов управления*, 2025. №1(79). С.95-102. DOI: 10.35752/1991-2927_2025_1_79_95.

Сведения об авторе

Муртазин Тимур Мансурович, 1975 г. рождения. Окончил Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ) в 1997 г., к.т.н. (2001). Доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии УГНТУ. В списке научных трудов более 100 работ в области разработки автоматических систем управления. ORCID 0009-0009-0655-338X. Author ID (РИНЦ): 389995; Author ID (Scopus): 57200149142. tm.murtazin@mail.ru.



Поступила в редакцию 03.02.2026, после рецензирования 09.04.2026. Принята к публикации 30.04.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-240-254



Ontological models of control systems for technological processes in oil refining production

© 2026, Т.М. Murtazin

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russia

Abstract

The paper addresses the development of a subsystem for decision generation based on product quality indicators and techno-economic parameters of technological processes for control and safety systems in oil refining production using ontological approaches. The relevance of the work is justified by the need to formalize approaches to defining the structure of decision-generation rules in control and safety systems, particularly in cases where heuristic information and non-formalized knowledge are used, and where the outcome of control system synthesis depends on the qualifications of developers and participating experts. Approaches to formalizing the synthesis procedure for control generation and diagnostic subsystems based on a knowledge base represented as a hierarchy of ontology classes and semantic relationships between class elements are described. Typical technological processes and technological apparatuses are considered as elements of these classes. The proposed evolutionary synthesis procedure, based on a hierarchy of topological-level models and a detailed description of the object for specified operating conditions, makes it possible to generate a solution defined as the intersection of possible system implementations determined by the object ontologies, execution constraints of the control system, and developer requirements, whose knowledge is generally represented in the form of heuristics. An example is presented of synthesizing a topological model of a technological unit in oil refining production based on ontologies for application in control systems and equipment fault diagnosis systems.

Keywords: control, fault diagnostics, decision generation, knowledge base, ontology, adjacency matrix, technological process, oil refining production.

For citation: Murtazin T.M. Ontological models of control systems for technological processes in oil refining production [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 240-254. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-240-254.

Acknowledgment: The author expresses gratitude to Alexander Pavlovich Verevkin, Doctor of Technical Sciences and Professor (Eng.) for his remarks and recommendations during the preparation of this paper.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Hierarchy of ontology classes for technological process modeling

Figure 2 – Sequence of technological flows in the process

Figure 3 – Functional model of the ontology-based synthesis process for a topological model

Table 1 – Table of ontology classes of the technological process model (fragment)

Table 2 – Table of ontology classes of the simple distillation column model

Table 3 – Relationships within the hierarchy of ontology classes

References

- [1] **Verevkin AP.** Features of the control problem for separation processes of petroleum mixtures at CDU/VDU units [In Russian]. *Interuniversity collection "Oil and Gas"*. Ufa: USPTU Publishing House, 1996; 3: 82–84.
- [2] **Zhong W, Yu J.** MIMO soft sensors for estimating product quality with on-line correction. *Chemical Engineering Research and Design*, 2000; 78(4): 612–620. DOI:10.1205/026387600527554.
- [3] **Witczak M.** Modelling and estimation strategies for fault diagnosis of non-linear systems. *Analytical to Soft Computing Approaches*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 212 p.
- [4] **Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI.** Knowledge engineering. Models and methods: Textbook [In Russian]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2016. 324 p.
- [5] **Moiseev NN, Ivanilov YuP, Stolyarova EM.** Optimization methods [In Russian]. Moscow: Nauka, Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 1978. 352 p.
- [6] **Draper N, Smith H.** Applied regression analysis [In Russian]. Moscow: Statistic, 1973. 391 p.
- [7] **Zbrishchak SG.** Cognitive modeling: theoretical bases, methods, limitations. [In Russian]. *Russian Journal of Economics and Law*, 2025. 19 (3). 675–695. DOI: 10.21202/2782-2923.2025.3.675-695.
- [8] **Haykin S.** Neural networks: A comprehensive foundation [In Russian]. Moscow: Williams Publishing House, 2016. 1104 p.
- [9] **Emelianov VV, Kureichik VM.** Theory and practice of evolutionary modeling. [In Russian]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 432 p.
- [10] **Verevkin AP, Murtazin TM.** Simulation of production process based on cognitive information and time series [In Russian]. *Systems Engineering and Information Technologies*. 2022; 4(1): 12–19. DOI: 10.54708/26585014_2022_41812.
- [11] **Gorshkov S.** Introduction to Ontological Modeling. TriniData LLC, 2016. 165 p.
- [12] **Davtyan M.** Heuristic data modeling in information systems. [In Russian]. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2011; 21: 349–356.
- [13] **Guarino N.** Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation // *International Journal of Human-Computer Studies*. 1995; 43(5/6): 625–640.
- [14] **Chen W, Kloul L.** An advanced driver assistance test cases generation methodology based on highway traffic situation description ontologies. *International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering, and Knowledge Management*. Springer, Cham, 2018. P. 93–113. DOI: 10.1007/978-3-030-49559-6_5.
- [15] **Moiseeva TV.** Conceptual and terminological apparatus formation of intersubjective management theory [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2020; 10(3): 351–360. DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-3-351-360.
- [16] GOST R ISO 15926-1-2008 Integration of life cycle data for processing enterprises, including oil and gas production enterprises. [In Russian]. Date of introduction 2008-12-18. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Official ed. Moscow: Standartinform, 2010. 19 p.
- [17] **Ore O.** Graph theory. 2nd ed. [In Russian]. Moscow: Nauka, 1980. 336 p.
- [18] **Kramer G.** Mathematical Methods of Statistics, 2nd ed. Moscow: Mir, 1975. 648 p.
- [19] **Dale E, Seborg, Thomas F, Edgar, Duncan A, Mellichamp, Francis J, Doyle III.** Process dynamics and control. University of California. Wiley. Fourth Edition, 2017. 502 p.
- [20] **Murtazin TM, Nazarov TT.** Decision-making by the diagnostic systems in the automated engineering systems [In Russian]. *Automation of Control Processes*. 2025; 1: 95–102. DOI: 10.35752/1991-2927_2025_1_79_95.

About the author

Timur Mansurovich Murtazin (b. 1975) graduated from USPTU in 1997, Candidate of Technical Sciences in 2001. Associate Professor at the Department of Automation, Telecommunications and Metrology, USPTU. The list of scientific publications includes over 100 works in the field of automated control systems development. ORCID 0009-0009-0655-338X. Author ID (РИНЦ): 389995; Author ID (Scopus): 57200149142. tm.murtazin@mail.ru.

Received February 03, 2026. Revised April 9, 2026. Accepted April 30, 2026.