С.В. ЕНДИЯРОВ,
С.Ю. ПЕТРУШЕНКО

Разработка оптимальной системы управления и диагностики сложного технологического комплекса (на примере процесса агломерации железных руд)

УДК 004.89, 519.2, 519.85

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

В данной статье предлагается подход управления сложным технологическим комплексом (на примере процесса агломерации) с использованием квази-марковских цепей. В статье рассматривается постановка задачи оптимального управления, а так же выводятся необходимые соотношения динамического программирования с целью максимизации вероятности перехода в заданное состояние. Рассматривается практическая реализация предлагаемого подхода, основанная на разработке онтологии предметной области.

In this article we present an approach for controlling of compound technological complexes (by example of sintering process) using quasi-markov chains. In this article we consider the task of the optimal control as well as necessary equations of the dynamic programming. We also consider some ontology design aspects.

Введение

Управление сложным технологическим комплексом производства железорудного агломерата является сложной задачей. Зависимости качества агломерата от качества компонентов шихты являются нелинейными. Существующие методы прогнозирования качества агломерата обладают низкой точностью. В данной статье предлагается подход управления сложным технологическим комплексом (на примере процесса агломерации) с использованием квази-марковских цепей.

Введение понятия квази-марковской цепи позволяет использовать весь набор существенных признаков влияющих на качественные показатели агломерата. В статье рассматривается постановка задачи оптимального управления, а так же выводятся необходимые соотношения динамического программирования с целью максимизации вероятности перехода в заданное состояние.

Практическая реализация предложенного алгоритма сопровождается проектированием структуры онтологии спроектированной с применением языков RDF(S), OWL. Кроме того рассматриваются запросы на языке SPARQL для извлечения необходимых данных из построенной онтологии.

Для введения понятие квази-марковской цепи, а так же для постановки оптимального управления для квази-марковской цепи опишем данную задачу применительно к «классической» цепи Маркова первого порядка.

1. Оптимальное управление для Марковской цепи первого порядка

Рассмотрим систему с N состояниями, функционирование которой на интервале времени продолжительностью $n_{\max}$ шагов описывается цепью Маркова с доходами. Цепь Маркова называется управляемой, если на каждом шаге $n = 1, 2, ..., n_{\max}$ и в каждом состоянии $j = 1, 2, ..., N$ может быть выбрана некоторая стратегия, определяющая дальнейшее функционирование системы [1]:

$$p_j^{\lambda_j} = (p_{j1}^{\lambda_j}, p_{j2}^{\lambda_j}, ..., p_{jN}^{\lambda_j}) \tag{1}$$

Величина λ_j называется стратегией управления в j состоянии, а $\Lambda_j \in \{\lambda_j\}$ – множеством стратегий управления в j состоянии. Вектор стратегий $\overline{\lambda} = (\overline{\lambda}_1, ..., \overline{\lambda}_j, ..., \overline{\lambda}_N) \in K_1 \times K_2 \times ... \times K_N$ называется политикой. Если стратегия λ_j или политика $\overline{\lambda}$ выбираются на n шаге, то они снабжаются индексом n, а именно λ_{jn} или $\overline{\lambda}_n = (\overline{\lambda}_{1n}, ..., \overline{\lambda}_{jn}, ..., \overline{\lambda}_{Nn})$. Последовательность политик, выбранных на каждом шаге, образует управление $\overline{\overline{\lambda}} = (\overline{\lambda}_1, ..., \overline{\lambda}_j, ..., \overline{\lambda}_{n_{\max}})$. Будем говорить, что управление происходит на конечном горизонте управления, если $n_{\max} < \infty$ иначе о бесконечном.

Пусть $\mathrm{E}(\bar{\bar{\lambda}})$ – эффективность функционирования системы на заданном интервале управления, тогда управление $\bar{\bar{\lambda}}^*$, максимизирующее эффективность функционирования системы называется оптимальным:

$$\mathrm{E}(\bar{\bar{\lambda}}^*) = \max_{\bar{\bar{\lambda}}} \mathrm{E}(\bar{\bar{\lambda}}) \tag{2}$$

Обозначим множество возможных состояний системы Ω, тогда множество $\Omega_0 \subset \Omega$ есть множество заданных состояний:

$$\begin{aligned} &\Omega = \{\omega_1, ..., \omega_j, ..., \omega_N\} \\ &\Omega_0 \subset \Omega = \{\omega_g, ..., \omega_q\} \end{aligned} \tag{3}$$

Обозначим множество нежелательных состояний $\bar{\Omega}_0 = (\Omega - \Omega_0)$ причем $\bar{\Omega}_0 \cap \Omega_0 = \varnothing$. При этом задана матрица вероятностей переходов P^{λ_n}:

$$\mathrm{P}^{\lambda_n} = \begin{pmatrix} p_1^{\lambda_{1n}} \\ \ldots \\ p_N^{\lambda_{Nn}} \end{pmatrix} \tag{4}$$

где $p_j^{\lambda_{jn}}$ – есть j вектор строка матрицы вероятностей P^{λ_n} переходов:

$$p_j^{\lambda_{jn}} = (p_{j1}^{\lambda_{jn}}, p_{j2}^{\lambda_{jn}}, ..., p_{jN}^{\lambda_{jn}}) \tag{5}$$

Для управляемой цепи Маркова матрица вероятностей переходов P^{λ_n} может выбираться на каждом шаге n из некоторого конечного заданного множества в соответствии с назначенной стратегией $\lambda_{jn} \in \Lambda_j$.

Для приведения системы в заданное множество состояний Ω_0 требуется найти такое управление, которое максимизирует вероятность приведения системы из текущего состояния $\omega_j \in \bar{\Omega}_0$ через заданное число шагов n в заданное множество состояний $\Omega_0 \subset \Omega$.

Данная задача сводится к задаче определения оптимального управления произвольной цепью с доходами при конечном горизонте управления.

Рекуррентное соотношение динамического программирования для полного ожидаемого дохода имеет вид:

$$\Delta_j^*(n) = \max_{\lambda_{jn}}[\psi_j^{\lambda_{jn}} + \sum_{i\in\Omega} p_{ji}^{\lambda_{jn}} \Delta_j^*(n-1)] \quad (6)$$

где $\Delta_j^*(n-1)$ – средний ожидаемый доход, который системы «принесет» двигаясь из состояния j, а вектор столбец $\psi_j^{\lambda_{jn}}$ – средний одношаговый доход состояния, получаемый из состояния j. При этом положим:

$$\Delta_j^*(0) = \begin{cases} 1, если\ j \in \Omega_0 \\ 0, если\ j \in \bar{\Omega}_0 \end{cases} \quad (7)$$

А все элементы вектора $\psi_j^{\lambda_{jn}}$ положим равными нулю $\psi_j^{\lambda_{jn}} = 0$ для всех j и λ_{jn}, тогда получим:

$$\Delta_j^*(n) = \max_{\lambda_{jn}}[\sum_{i\in\Omega} p_{ji}^{\lambda_{jn}} \Delta_j^*(n-1)] \quad (8)$$

Обозначим λ_{jn}^* оптимальной стратегией в j состоянии на n шаге, а $\bar{\lambda}_n^*$ оптимальной политикой на n шаге.

Таким образом, управление сложным технологическим комплексом может быть описано следующим образом: если текущее состояние $\omega_j \in \bar{\Omega}_0$, то необходимо начинать процедуру управления процессом максимизируя вероятность перехода объекта из нежелательного состояния $\omega_j \in \bar{\Omega}_0$ в состояние $\omega_j \in \Omega_0$ до тех пор, пока $\omega_j \notin \Omega_0$. Как только объект переходит в одно из состояний множества Ω_0 то управление можно считать завершенным.

Предполагаем, что для завершения процесса управления объектом потребуется некоторое конечное число шагов $n_{\max} < \infty$. Как только текущее состояние объекта вновь переходит из множества Ω_0 во множество $\bar{\Omega}_0$, то процедура управления вновь активируется.

В результате оптимальное управление объектом заключается в поиске на каждом шаге оптимальной политики $\bar{\lambda}_n^*$, а результатом является оптимальное управление $\bar{\bar{\lambda}}^* = (\bar{\lambda}_1, ..., \bar{\lambda}_j, ..., \bar{\lambda}_{n_{\max}})$.

2. Оптимальное управление квази-цепями Маркова n порядка

В данном разделе дается постановка задачи оптимального управления квази-марковскими цепями n порядка. Для начала необходимо ввести понятие квази-Марковской цепи, с этой целью приведем определение «классической» Марковской цепи n порядка. Марковский процесс – это процесс, для которого вероятность находится в данном состоянии в данный момент можно вывести из сведений о предшествующем состоянии.

Цепью Маркова первого порядка называется одна из форм марковских процессов, для которой каждое конкретное состояние зависит только от непосредственно предшествующего. Цепью второго порядка называют такую, в которой вероятность перехода в последующее состояние зависит как от двух предшествующих, так и от той последовательности, в которой эти состояния наступают.

Таким образом, прогнозирование состояния сложного технологического комплекса Марковской цепью n порядка представляет собой зависимость вида:

$$p_{\omega_j^{t+1}} = f(\omega_j^{t+1} \big| \omega_j^t, ..., \omega_r^{t-k}) \tag{9}$$

где $p_{\omega_j^{t+1}}$ – вероятность перехода в состояние j в момент времени $t+1$, а ω_j^t – есть состояние, в котором находился технологический комплекс в момент времени t. На практике же состояние технологического комплекса ω_j^{t+1} можно описать следующей зависимостью:

$$p_{\omega_{t+1}} = f(\omega_j^{t+1} \big| (\omega_j^t, ..., \omega_r^{t-k}), (\theta_j^t, ..., \theta_r^{t-k}), ..., (\gamma_j^t, ..., \gamma_r^{t-k})) \tag{10}$$

где $(\theta_j^t, ..., \theta_r^{t-k}), ..., (\gamma_j^t, ..., \gamma_r^{t-k})$ – есть переменные, влияющие на состояние процесса ω_j^{t+1}. Будем называть процесс описываемый зависимостью (10) квази-марковским процессом. Рассмотрим задачу оптимального управления для квази-Марковской цепи.

Предположим, что множества $\overline{\Omega}_0$ и Ω_0 заданы, при этом рассмотрим случай когда:

$$\left|\overline{\Omega}_0\right| \geq 1, \left|\Omega_0\right| = 1 \tag{11}$$

То есть множество допустимых состояний Ω_0 состоит из одного элемента. Обозначим это допустимое состояние $\psi \in \Omega_0$. Для n мерного случая оптимальное управление заключается в поиске такой стратегии λ_{jn}, которая максимизирует вероятность перехода в состояние ψ, минимизируя при этом необходимое количество шагов n, так как в общем случае вероятность перехода из состояния ω_j в состояние ψ за n шагов, будет больше вероятности перехода за $n-1$ шаг.

При этом необходимо учитывать достоверность вероятности перехода $p_{j\psi}$, которая до этого момента не упоминалась.

Обозначим число переменных, используемых для оценки вероятности перехода в состояние ψ, символом ℓ, а многомерную функцию условной вероятности $f_*(\psi|\xi_1,\xi_2,...,\xi_\ell)$.

Обозначим максимальный используемый порядок модели τ, тогда выражение для $f_*(\psi|\xi_1,\xi_2,...,\xi_\ell)$, запишем в следующем виде $f_*(\psi|\xi_1^{\tau-t},...,\xi_\ell^{\tau-t},...,\xi_1^{\tau-t-1},...,\xi_\ell^{\tau-t-1},...,\xi_1^{\tau-t-\ell+1},...,\xi_\ell^{\tau-t-\ell+1})$ или сокращенно $f_*(\psi|\xi_1^{\tau-t},...,...)$. Обозначим эмпирическую функцию $f_*(\psi|\xi_1^{\tau-t},...,...)$, построенную на основе экспериментальных данных следующим образом: $\tilde{f}_*(\psi|\xi_1^{\tau-t},...,...)$.

Управление происходит при приходе химанализ агломерата (например, по FeO) или при изменении текущего состояния ω_j (приход химанализа шихты). Число теоретически возможных переходов определяется всевозможными комбинациями элементов и количеством состояний каждого элемента.

$$\begin{bmatrix} S = S_1 \times S_2 \times ... \times S_p \\ C = (S \times S \times ... \times S)_p \end{bmatrix} \qquad (12)$$

где S – количество комбинаций состояний p векторов, S_j – количество состояний j элемента, а C – количество всевозможных комбинаций векторов относительно друг друга. Число всевозможных комбинаций C даже при небольших значениях p и S_j велико.

Однако на практике нелинейность порождает своего рода квантовый эффект - дискретность путей эволюции. В нелинейной среде возможен не любой путь развития, а лишь определенный набор этих путей, определенный спектр устойчивых состояний [2].

Поэтому функция $\tilde{f}_*(\psi|\xi_1^{\tau-t},...,...)$ является подмножеством функции $f_*(\psi|\xi_1^{\tau-t},...,...)$, так как в связи с вышесказанным объект имеет определенный спектр устойчивых состояний $\tilde{f}_*(\psi \left| \xi_1^{\tau-t},...,...) \subseteq f_*(\psi \right| \xi_1^{\tau-t},...,...)$.

Если предположить, что на интервале управления информация о состоянии технологического комплекса или о химсоставе агломерата не поступает, то задача управления сводится к поиску наиболее вероятной одношаговой стратегии.

$$\lambda_{\psi n}^* = \max_{\xi_1^{\tau-t},...,...} [\max_{\tilde{f}_*} \max_{\Psi} [\square \, (\tilde{f}_*(\psi \left| \xi_1^{\tau-t},...,...)) \cdot \Delta_\psi^*(n-1)]] \qquad (13)$$

При этом текущее состояние $\omega_j \in \{\omega_1,..,\omega_j,...,\psi\}$ должно полностью совпадать с состояниями $(\xi_1^{\tau-t-1},...,\xi_\ell^{\tau-t-1}),...,(\xi_1^{\tau-t-\ell+1},...,\xi_\ell^{\tau-t-\ell+1})$, а состояние $(\xi_1^{\tau-t},...,\xi_\ell^{\tau-t})$ используется как управляющие воздействия для достижения состояния ψ.

Для данного случая понятие стратегия $\lambda_{\psi n}^*$ совпадает с понятием политика $\bar{\lambda}_n^*$. Если это не так, то рассматриваемая задача решается относительно состояний $\{\omega_1,..,\omega_j,...,\psi\} \in \Omega$.

$$\begin{aligned}
&\Delta_{\omega_1}^*(n) = \max_{\lambda_{\omega_1 n}} [\sum_{i \in \Omega} \max_{\tilde{f}_*} \max_{\Psi} [\square \, (\tilde{f}_*(\omega_1 \left| \xi_1^{\tau-t},...\omega_i,...))] \cdot \Delta_{\omega_1}^*(n-1)] \\
&\Delta_{\omega_2}^*(n) = \max_{\lambda_{\omega_2 n}} [\sum_{i \in \Omega} \max_{\tilde{f}_*} \max_{\Psi} [\square \, (\tilde{f}_*(\omega_2 \left| \xi_1^{\tau-t},...\omega_i,...))] \cdot \Delta_{\omega_2}^*(n-1)] \\
&\Delta_{\omega_j}^*(n) = \max_{\lambda_{\omega_j n}} [\sum_{i \in \Omega} \max_{\tilde{f}_*} \max_{\Psi} [\square \, (\tilde{f}_*(\omega_j \left| \xi_1^{\tau-t},...\omega_i,...))] \cdot \Delta_{\omega_j}^*(n-1)] \qquad (14) \\
&... \\
&\Delta_{\psi}^*(n) = \max_{\lambda_{\psi n}} [\sum_{i \in \Omega} \max_{\tilde{f}_*} \max_{\Psi} [\square \, (\tilde{f}_*(\psi \left| \xi_1^{\tau-t},...\omega_i,...))] \cdot \Delta_{\psi}^*(n-1)]
\end{aligned}$$

где $\mathrm{R}(\bullet)$ – есть функция, возвращающая для данной вероятности нижнюю границу ее достоверности.

Таким образом, решается задача максимизации вероятности $\tilde{f}_*(\omega_j \left| \xi_1^{\tau-t},...,...)$ на каждом шаге $\Delta_{\omega_j}^*(n-1)$ для допустимых стратегий.

Для состояний из множества $\{\omega_1,..,\omega_j,...,\psi\} \in \Omega$ выбирается максимальная вероятность из множества достоверных вероятностей Ψ, а из наиболее достоверных оценок выбираются максимальные вероятности переходов $\tilde{f}_*$. В результате после того как химанализ агломерата поступает, выбирается стратегия оптимального управления в соответствии с $\Delta_{\omega_j}^*(n)$.

Если достоверность любой стратегии управления слишком мала $\mathrm{R}(\lambda_{jn}) \le \xi$, то применяются другие средства управления процессом, например основанные на фактических знаниях о процессе (база знаний) или же основанная на балансовых соотношения процесса агломерации.

2.1 Выбор оптимальной траектории с поправкой на достоверность правила

Обучение на основе экспериментальных данных приводит к получению вероятностей переходов. Так как экспериментальные данные обычно зашумлены и обладают конечной длинной, то вероятности полученные таким образом будут отличаться от реальных вероятностей переходов. Поэтому для принятия оптимальных решений необходимо учитывать достоверность вероятностных правил получаемых в результате обучения. Каждое правило по результатам обучения может быть оценено следующими параметрами: N – число траекторий совпадающих с данной, S – число траекторий ведущих к состоянию j, $(N-S)$ – число траекторий ведущих к другим состояниям.

Положим, что вероятность $\tilde{f}_*$ распределена по биномиальному закону, тогда доверительные границы для $\tilde{f}_*$, могут быть аппроксимированы выражениями:

$$\tilde{f}_*^U = \frac{S + \frac{1}{2}U_\alpha^2 + U_\alpha^2\sqrt{\frac{S}{N}(N-S) + \frac{1}{4}U_\alpha^2}}{N + U_\alpha^2}$$
$$\tilde{f}_*^L = \frac{S + \frac{1}{2}U_\alpha^2 - U_\alpha^2\sqrt{\frac{S}{N}(N-S) + \frac{1}{4}U_\alpha^2}}{N + U_\alpha^2} \qquad (15)$$

где U_α – квантиль нормального распределения для заданного уровня значимости α. То есть величина $\tilde{f}_*$ будет ограничена сверху и снизу:

$$\tilde{f}_*^L \le \tilde{f}_* \le \tilde{f}_*^U \qquad (16)$$

Тогда функция $\mathrm{R}(\bullet)$ примет вид:

$$\mathrm{R}(\tilde{f}_*) = \tilde{f}_*^L(\tilde{f}_*) \qquad (17)$$

Поведение границ $\tilde{f}_*^L, \tilde{f}_*^U$ изображено на рисунке 1.

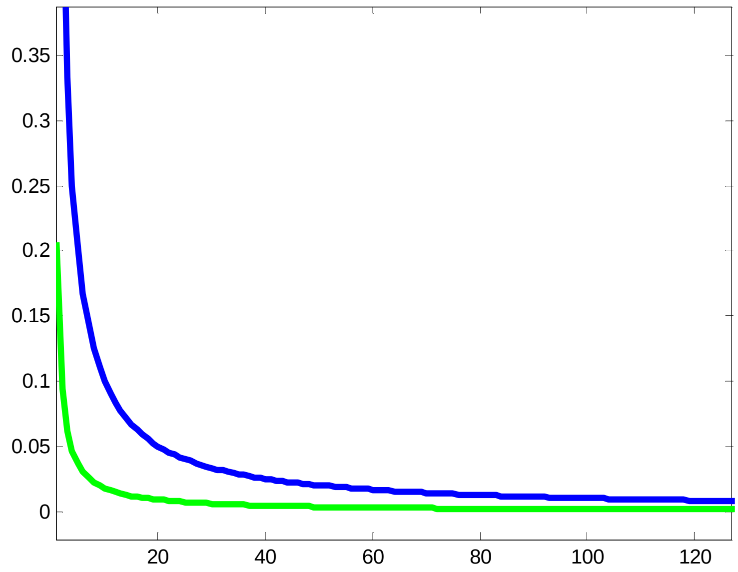

Рис. 1. Поведение границ $\tilde{f}_*^L, \tilde{f}_*^U$ (Зеленым – $\tilde{f}_*^L$; Синим – $\tilde{f}_*^U$)

Видно, что при $N \geq 80$ можно считать правило статистически достоверным. Сходимость в общем случае для разных величин $\tilde{f}_*$ различается значительно. Это может быть связано с отклонениями для $\tilde{f}_* = 1, \tilde{f}_* = 0$ (граничные значения).

3. Проектирование онтологии для решения задачи диагностики и оптимального управления процессом, описываемым квази-марковской цепью

В предыдущей части была описана проблема управления процессом, описываемым квази-марковской цепью. Задача управления была формализована, были выведены необходимые соотношения динамического программирования для максимизации вероятности перехода во множество благоприятных состояний. Рассмотрены два случая, в одном из них понятие стратегии совпадает с понятием политики.

В данной части мы рассмотрим проектирование онтологии для осуществления диагностики и управления сложным технологическим комплексом на примере процесса агломерации железных руд.

3.2 Проектирование онтологии

Для реализации предложенных методов управления сложным технологическим комплексом необходимо создание базы знаний вероятностных правил. В основу вероятностных правил, положим, идеи квази-марковских процессов, что в свою очередь позволит представить информацию о функции $\tilde{f}_{*}(\psi \,|\, \xi_{1}^{\tau-t},...,...)$ в виде набора вероятностных правил.

Для этого в онтологию было введено понятие ProbabilisticRule (Вероятностное правило). Структура вероятностного правила представлена на рисунке 2.

Основными элементами правила является информации о вероятности (hasProbability), об антецеденте (hasCondition-t-1,…, hasCondition-t-N) и консеквенте (hasConclusion) и д.р.

Дополнительно в онтологию были введены правила двух типов: когнитивные правила (CognitiveRule) и диагностические правила (DiagnosticRule). Последние используются для определения состояния технологического комплекса на основе задания границ нормального функционирования.

Структура диагностического правила представлена на рисунке 3. Данные правила могут быть использованы с другими методами диагностики [3]. Когнитивные правила это правила вида:

$$\textit{ЕСЛИ } A\uparrow \cap B\uparrow \cap ... \cap G\downarrow \textit{ТО } \Phi\downarrow \qquad (18)$$

Данные правила могут использоваться как в ситуации когда $\square(\lambda_{jn}) \le \xi$, т.е. достоверность любой стратегии управления слишком. Так и совместно с вероятностными правилами для объяснения изменений в ходе технологического процесса.

Структура когнитивных правил представлена на рисунке 4.

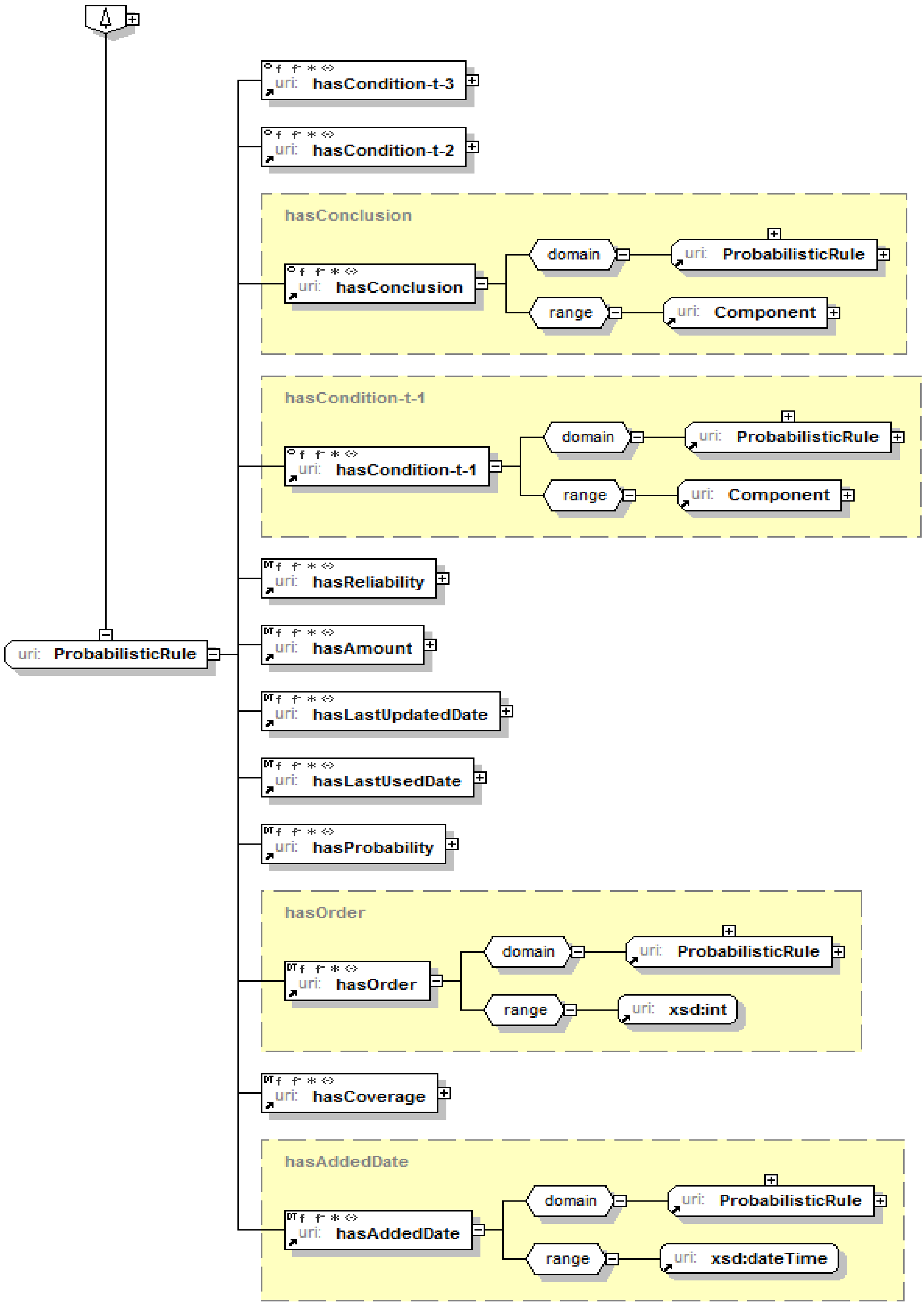

Рис. 2. Структура вероятностного правила для описания зависимостей квази-марковской цепи

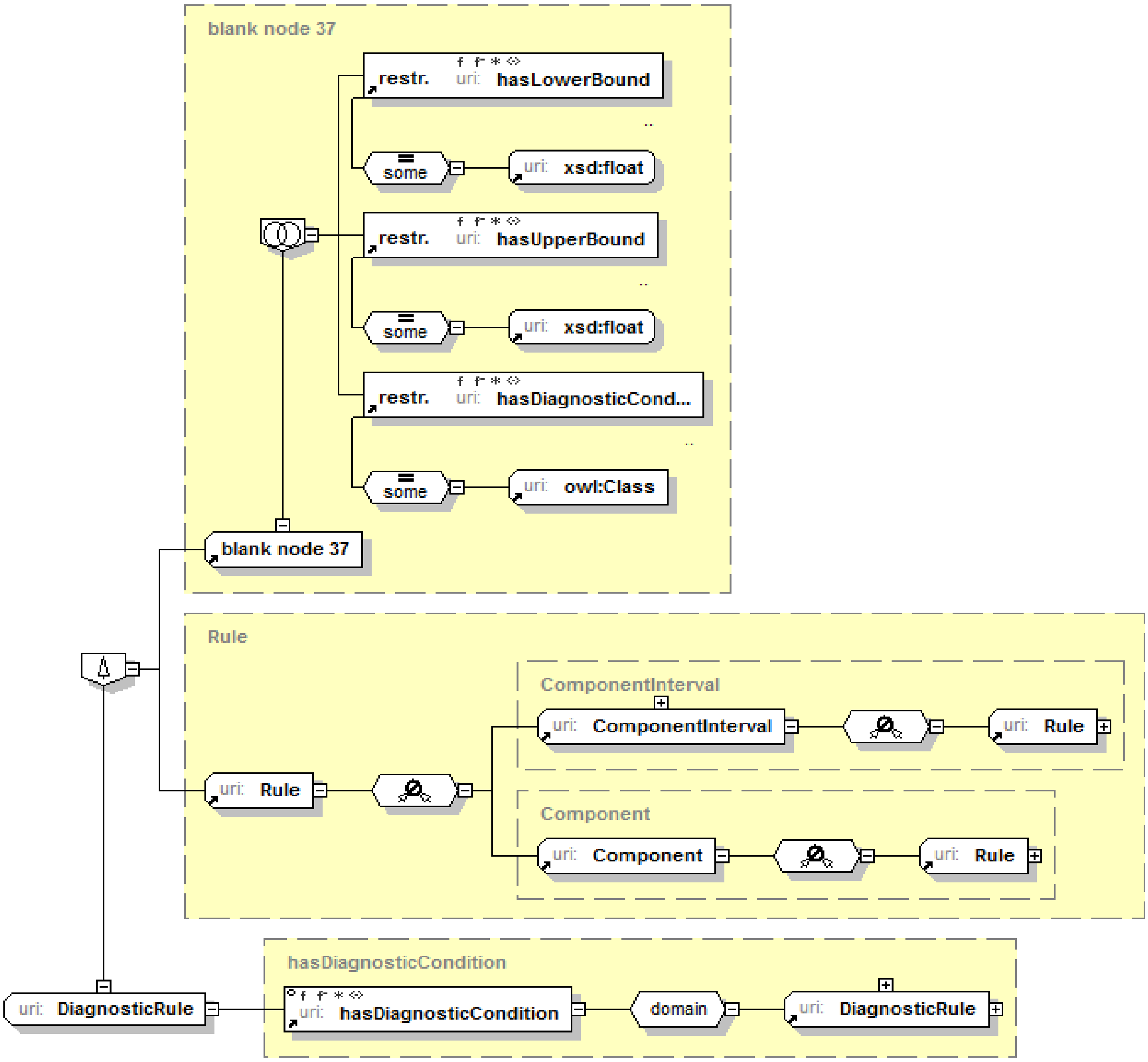

Рис. 3. Структура диагностического правила

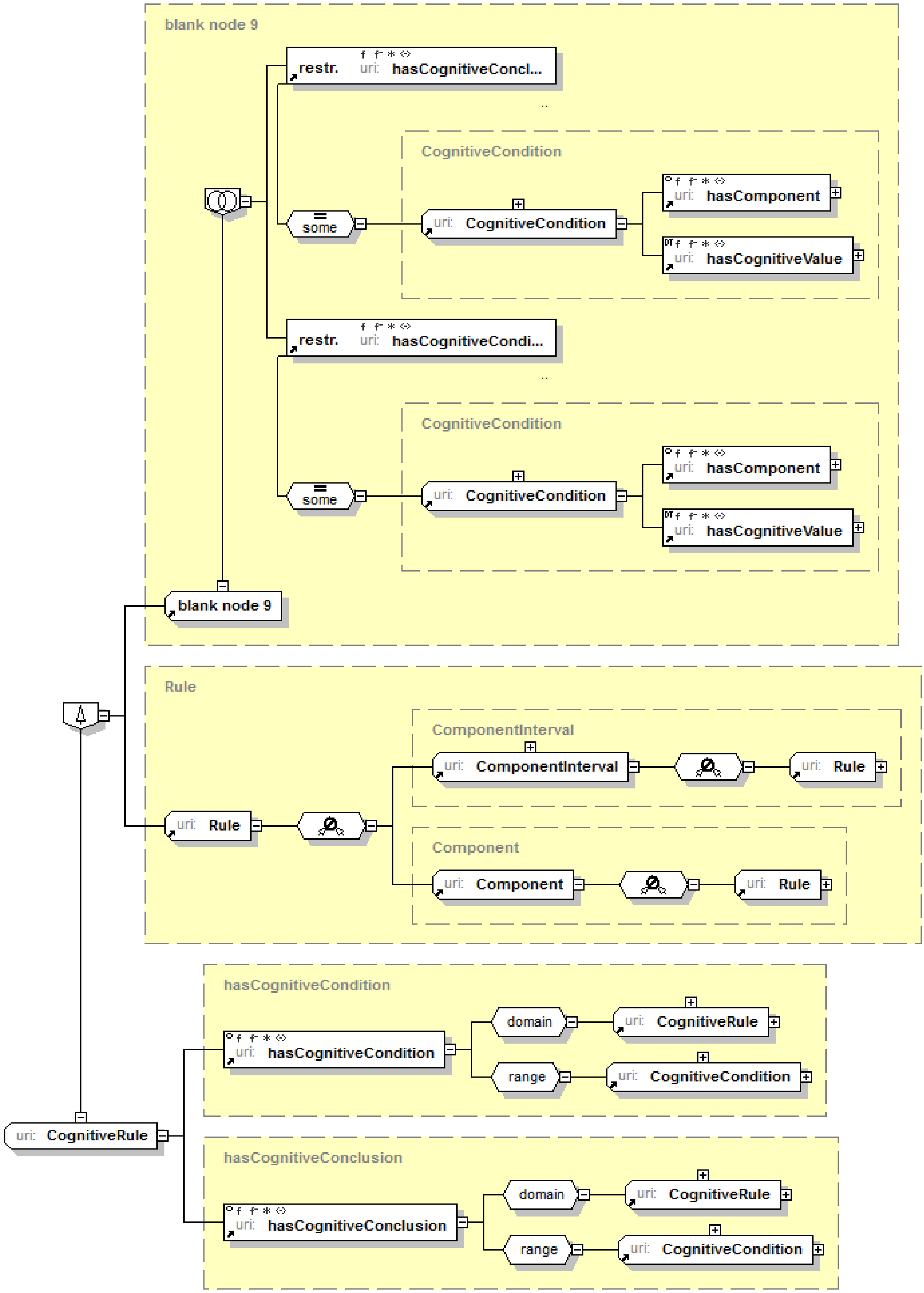

Рис. 4. Структура когнитивного правила, отражающего основные зависимости процесса агломерации

Выводы

В данной статье были рассмотрены проблемы оптимального управления квази-марковскими цепями n порядка. В начальной части приводятся сведения, относящиеся к управлению цепями Маркова первого порядка, вводятся необходимые обозначения и определения, которые используются в дальнейшем.

В последующей части статьи вводится понятие квази-марковской цепи n порядка. На основе определений первой части дается формальная постановка задачи оптимального управления выводятся необходимые уравнения динамического программирования.

Далее рассматривается практическая реализация предлагаемого подхода, основанная на разработке онтологии предметной области. Рассматривается ряд ключевых понятий таких как: вероятностные правила, когнитивные правила и диагностические правила. Рассмотренные типы правил позволяют производить диагностику и управление сложным технологическим комплексом.

Литература

1. *Соколов Г. А., Чистякова Н. А.* Теория вероятностей. Управляемые цепи Маркова в экономике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 245 с.

2. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии, № 12, 1992.

3. *Yendiyarov S., Petrushenko S.* Robust Probabilistic Online Change detection Algorithm based on the Continuous Wavelet Transform // World Academy of Science, Engineering and Technology, France, Issue 60, December 2011, pp. 1810-1814.

E-MAIL: ENDEYAROV@OLYMPUS.RU

E-MAIL: VETRODUB@GMAIL.COM

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Д.Т.Н. ЗОБНИН Б.Б.