

Применение темпоральной логики в системе управления балансом газа

А. К. Петрова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
akpetrova@etu.ru

Аннотация. В системе контроля баланса газа необходимо принимать во внимание большое количество изменяющихся во времени нелинейных факторов. Аномалии в этих временных рядах могут свидетельствовать о наличии утечек в системе баланса газа, для их учета могут быть применены интеллектуальные методы. В то же время, подобные отклонения необходимо дифференцировать в зависимости от длительности их нахождения во временной последовательности, чтобы отличить случайное отклонение от системной утечки. Для этой цели может быть применена темпоральная логика, в высказываниях которой учитывается временной аспект. Данный подход был рассмотрен в этой статье.

Ключевые слова: газотранспортная система, баланс газа, интеллектуальные методы, нечеткая логика, нейронные сети, темпоральная логика

I. ВВЕДЕНИЕ

При измерении расхода газа в региональных газотранспортных системах (ГТС) выявление отклонений параметров технологического процесса (ТП) учета расхода газа является актуальной задачей. Наличие отклонений в конечном итоге влияет на баланс газа в ГТС и на экономическую эффективность ее деятельности. Причинами отклонений значений параметров могут быть неисправность измерительного оборудования, повреждение в трубопроводе, изменение свойств газа, человеческий фактор, несанкционированные врезки и т. д. [1–4]. В настоящее время перспективным направлением в задаче контроля параметров ТП учета расхода газа является применение интеллектуальных методов, в том числе гибридных нейро-нечетких систем (ННС). Обработка информации в нейро-нечеткой сети осуществляется в соответствии с логикой работы нечеткой системы, а настройка параметров – по правилам обучения нейронных сетей. Тем самым объединены преимущества нечеткой логики (по наглядности представления и простоте содержательной интерпретации структуры правил вывода) и нейронных сетей – по возможностям построения и обучения правил нечетких продукций [5–7].

Исходными данными для построения нейро-нечеткой модели являются статистические данные, полученные в результате измерения значений параметров рабочей среды (газа) в ГТС: температура газа, давление газа в рабочих условиях, объемный расход газа.

II. НЕЙРОНЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТП УЧЕТА РАСХОДА ГАЗА

Кортеж нейро-нечеткой модели контроля параметров ТП учета расхода газа выглядит, согласно формуле (1) [8–10]:

$$Q_{\text{откл}} = \langle X, Y, Z, \mu(z), R_z, F, D, W \rangle, \quad (1)$$

где X – множество значений параметров ТП учета расхода газа, $x_i \in X$; $i \in \{1; I\}$; Y – множество значений предсказаний, полученных на основе текущих значений входных параметров, нейросети, обученной на более ранних статистических данных данного ТП, $y_j \in Y$; $j \in \{1; J\}$; Z – множество термов, означающих степень отклонения значения выходной переменной от значений, предсказанных искусственной нейронной сетью Z : $l \in \{1; L\}$; R_z – нечеткие отношения, позволяющие со степенью принадлежности $\mu(z)$ отобразить любую пару из конъюнкции множеств X и Y на множество Z .

Образуется система нечеткого вывода 1-го порядка, с двумя входами, x и y и одним выходом z , которая использует правила вида:

$$F(x_i) \text{ and } F(y_j) \rightarrow \frac{\sum_{l=1}^L z_l}{\mu(z)}, \quad (2)$$

F, D – процедура фаззификации и дефаззификации соответственно; W – блок нечеткого логического вывода; $\mu(z)$ – функция принадлежности, определяющая степень соответствия множеств входных факторов множеству Z . Функция принадлежности определяется с помощью искусственной нейронной сети, на основе применения метода решетчатого разбиения (Grid partition), в приложении ANFIS среды Matlab [11].

На выходе осуществляется операция дефаззификации по методу центраида [8–10]:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(z) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(z)}$$

Тогда решения могут быть выражены таким образом:

При $F(x_i) \approx F(y_j)$, $\Leftrightarrow \frac{z_l}{\mu(z)} =$ «скорее, утечки нет».

При $F(x_i) \neq F(y_j)$, $\Leftrightarrow \frac{z_l}{\mu(z)} =$ «скорее, утечка есть».

В случае наличия отклонения может быть осуществлено управляющее воздействие, согласно принятому регламенту (рис. 1).



Рис. 1. Применение нейронечеткой модели для контроля параметров ТП учета расхода газа в ГТС

III. ТЕМПОРАЛЬНАЯ ЛОГИКА

Представленная модель контроля параметров ТП расхода газа не учитывает временные связи, которые могут существовать между факторами, влияющими на наличие или отсутствие отклонений в результатах измерений. Например, управляющие воздействия могут быть дифференцированы в зависимости от длительности времени, в течение которого наблюдается отклонение параметров. Если отклонение длится короткое время, то в качестве управляющего воздействия может быть предложено последующее наблюдение, если длительное, то может быть осуществлена коррекция передаваемых объемов газа и организация проверки участка, в котором зафиксировано отклонение. Для описания таких связей необходимы логические утверждения, истинность которых зависит от времени. Подобными возможностями обладают темпоральные логики – логики, в которых истинностное значение логических формул зависит от момента времени, в котором вычисляются значения этих формул.

Могут быть применены два вида темпоральных логик: LTL (Linear Temporal Logic) – темпоральная логика линейного времени, и CTL (Computational Tree Logic) – темпоральная логика ветвящегося времени. Оба вида являются подмножествами расширенной логики ветвящегося времени CTL*. Синтаксис линейной темпоральной логики LTL выглядит следующим образом [12]:

- атомарное утверждение (предикат, который может принимать истинное или ложное значение в зависимости от значений его аргументов) p, q, \dots ;
- логические операторы \neg, \vee ;
- темпоральные операторы X (NextTime, «на следующем шаге»), U (Until, «до тех пор»), F (Future, «когда-то в будущем»), G (Global, «всегда»).

Примеры выражений LTL [12]:

- $F\varphi = true U \varphi$ (когда-нибудь φ станет true);
- $G\varphi = \neg F \neg \varphi$ (φ всегда останется true).

При необходимости формализации процедуры принятия решений на основе внешних событий (в их число могут входить и внешние факторы, влияющие на параметры ТП учёта расхода газа), используется структура Крипке (рис. 2 [12]), имеющая конечное множество состояний и переходов между ними, где каждое состояние помечено множеством истинных в этом состоянии атомарных предикатов. В дополнение к определению формул логики LTL, для формализации

этих состояний и переходов, в логике CTL добавляются кванторы пути: E ("существует такой путь, что...") и A (от All): $A\varphi = \neg E \neg \varphi$ ("на всех путях из данного состояния формула пути φ истинна") [12].

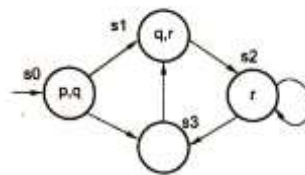


Рис. 2. Структура Крипке

На данном рисунке p, q, r – предикаты состояний, $s0-s4$ – переходы, состояние r бесконечно повторяется.

IV. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕМПОРАЛЬНОЙ ЛОГИКИ В НЕЙРОНЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ

Поскольку в задачах контроля параметров ТП учета расхода газа необходимо учитывать значения в предшествующие моменты времени, на данном этапе было рассмотрено применение логики LTL, в качестве дополнения к рассмотренной выше нейронечеткой модели.

При этом, нечётко-темпоральные лингвистические высказывания, используемые для учёта темпоральных зависимостей, могут быть простыми и сложными. Простое нечётко-темпоральное высказывание образуется применением модальной операции прошлого времени к простому нечёткому высказыванию. Сложное нечётко-темпоральное высказывание образуется путем соединения простого нечётко-темпорального высказывания с другим простым нечётко-темпоральным высказыванием или с простым нечётким высказыванием. В статье рассматривается применение простого нечетко-темпорального высказывания. Кортеж рассмотренной ранее нейро-нечеткой модели был дополнен оператором, содержащим 2 атомарных темпоральных предиката, таких как длительность времени, в течение которого происходит обнаружившееся отклонение значений параметров ТП учета расхода газа («длится короткое время», «длится долго»), и наличие подобного отклонения в прошлом («никогда не было в прошлом», «уже случилось»). Первый предикат может быть реализован в среде Matlab при помощи функции *duration*. Второй можно определить, если для получения значений предсказаний Y использовать LSTM рекуррентную нейронную сеть, способную запоминать данные. Значения этих предикатов темпорального оператора необходимо учитывать в качестве дополнительных параметров входных факторов X и Y , при использовании приложения ANFIS среды Matlab для определения функций принадлежности при помощи нейронной сети.

Тогда выражение (1) примет вид:

$$Q_{откл} = \langle X, Y, Z, T, \mu(T)_Z, \mu(z), R_z, F, D, W \rangle,$$

где T – темпоральный оператор, $t_k \subset T: k \subset \{1;K\}$, в множество которого входят предикат длительности времени, в течение которого происходит обнаружившееся отклонение значений параметров ТП учета расхода газа $t_1 = \varphi: [\varphi_1 = \text{«длится недолго»}, \varphi_2 = \text{«длится долго»}]$, $t_2 = \psi: [\psi_1 = \text{«никогда не было в прошлом»}, \psi_2 = \text{«уже случилось»}]$; $\mu(T)_Z$ – функция

принадлежности текущего момента времени терма лингвистической переменной Z .

Система нечеткого вывода (2) дополнится условием темпоральной логики и примет вид:

$$F(x_i) \text{ and } F(y_j) \text{ and } F(T_k) \rightarrow \frac{\sum_{l=1}^L z_l}{\mu(z)}$$

Согласно этому выражению решения будут выражаться следующим образом:

$$\exists F(x_i) \approx F(y_j), G \frac{T_k}{\mu(T)_Z} \Leftrightarrow \frac{Z_l}{\mu(z)}$$

= "скорее, утечки нет";

$$\exists F(x_i) \neq F(y_j), \text{ AND } U \frac{T_k}{\mu(T)_Z} = [\varphi_1, \psi_1] \Leftrightarrow \frac{Z_l}{\mu(z)} =$$

«необходимо наблюдать»;

$$\exists F(x_i) \gg \text{OR} \ll F(y_j), \text{ AND } U \frac{T_k}{\mu(T)_Z} = [\varphi_1, \psi_2] \Leftrightarrow \frac{Z_l}{\mu(z)}$$

=

«скорее всего, большая утечка».

Схема принятия решений изображена на рис. 3.

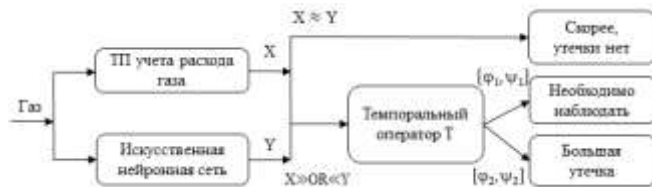


Рис. 3. Схема принятия решений нейро-нечетко-темпоральной модели

Такая подход к формализации решений может позволить учитывать при выявлении отклонений значений параметров ТП учета расхода газа временные факторы, что создаст возможность более гибко реагировать в случае возникновения утечек, оптимизируя при этом затраты на поддержание технологического процесса в рабочем состоянии.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено применение темпоральной логики в структуре нейро-нечеткой модели контроля параметров ТП учета расхода газа в газотранспортной системе. В качестве развития темы может быть рассмотрено применение других темпоральных

предикатов, например, U (Until, «до тех пор»), в отношении к переменной «расходы на поддержание баланса газа», X (NextTime, «на следующем шаге»), в отношении и переменной «скорость нарастания отклонения», а также дополнительных нечетких операторов, таких как степень износа труб, близость к населенному пункту, опыт оператора, и сочетания нечетких и темпоральных операторов. Помимо этого, нейро-нечетко-темпоральная модель может быть применена совместно с инструментами предиктивной аналитики и методами решения оптимизационной задачи по минимизации небаланса газа в ГТС. Данные подходы могут способствовать достижению баланса газа в ГТС, наряду с оптимизацией издержек на его поддержание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-051-2006 Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов, стандарт организации, Москва, 2006.
- [2] Хворов Г.А., Козлов С.И., Аكوпова Г.С., Евстифеев А.А. Сокращение потерь природного газа при транспортировке по магистральным газопроводам ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2013. № 12. С. 66–69.
- [3] Игнатъев А.А. Оценка причин разбаланса объемов газа в системе «поставщик – потребитель» // Газовая промышленность. 2010. № 6. С. 20–22.
- [4] Саликов А.Р. Разбаланс в сетях газораспределения // Газ России. 2015. № 4. С. 36–41.
- [5] Назаров А.В., Лоскутов А.А. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. СПб.: Наука и Техника, 2003, 384 с.
- [6] Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия - Телеком, 2004. 143 с.
- [7] Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004.
- [8] Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л.А. Заде // Математика сегодня: Сборник статей; пер. с англ. М.: Знание, 1974. С.5-49.
- [9] Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику -<http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>
- [10] Ярушкина П.Л. Основы теории нечетких и гибридных систем : учеб. пособие / П.Л. Ярушкина. Москва: Финансы и статистика, 2009. 320 с.
- [11] Нейронные сети. Реализация в Matlab: учебное пособие /С.Г. Николаева. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. 92 с.
- [12] MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 560 с.: ил. + CD-ROM, ISBN 978-5-9775-0404-1