

УДК 621.

Б. С. ИЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор

Харьковская национальная академия городского хозяйства, г. Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРИ ТРУБОПРОВОДНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Рассматривается задача определения погрешности расчета баланса газа, включающей неучтенные нетехнологические расходы газа, в системе магистральных газопроводов. Анализируются источники погрешности в условиях неполноты и неточности исходной информации. Описан новый подход к прогнозированию и анализу погрешности баланса, основанный на интегральной зависимости величины погрешности от режимно-технологических параметров с оценкой точности результата. Зависимость рассчитывается с помощью информационных моделей погрешности баланса газа, построенных с применением методов регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей. Формулируются подходы к использованию полученных результатов при разработке и планировании мероприятий по сокращению неучтенных нетехнологических потерь газа.

Розглядається задача визначення погрешності розрахунку балансу газу, що включає невраховані нетехнологічні витрати газу, в системі магистральних газопроводів. Анализуються джерела погрешності в умовах неповноти й неточності вхідної інформації. Описано новий підхід до прогнозування й аналізу погрешності балансу, заснований на інтегральній залежності погрешності від режимно-технологічних параметрів з оцінкою точності результату. Залежність розраховується за допомогою інформаційних моделей погрешності, побудованих із застосуванням методів регресійного аналізу і штучних нейронних мереж. Формулюються підходи до використання отриманих результатів при розробці і плануванні заходів щодо скорочення неврахованих нетехнологічних витрат газу.

Введение

Современный этап развития газотранспортной системы (ГТС) Украины характеризуется постоянным возрастанием требований к ее экономичности. Одним из направлений улучшения этого показателя является уменьшение нетехнологических расходов газа, что предопределяет актуальность задач оценки объемов, локализации и определения природы нетехнологических расходов.

В рамках решения данной проблемы была поставлена задача разработки метода построения зависимости погрешности сведения баланса газа (разбаланса), которая включает неучтенные нетехнологические расходы, от режимно-технологических параметров ГТС для анализа и прогнозирования погрешности [1, 2].

Основная часть

Предметом исследования является баланс газа в рамках ГТС управлений магистральных газопроводов (УМГ) ДК "Укртрансгаз", который в соответствии с "Методикой определения удельных расходов природного газа во время его транспортирования газотранспортной системой и хранения в подземных хранилищах" включает сумму учтенных объемов всех источников поступления газа, сумму учтенных объемов распределения газа потребителям и сумму расходов газа во время эксплуатации ГТС, т.е. а) поступления газа в газопровод из соседних сетей ГТС, месторождений, подземных хранилищ; б) транзитный газ; расходы газа на собственные нужды; потребление газа потребителями; закачка в хранилища; учтенные технические и технологические расходы; утечки газа; другие эксплуатационные расходы.

ГТС характеризуется сложностью, огромным количеством и разнородностью объектов, трудностью формализации протекающих процессов. Информация о составляющих баланса характеризуется неполнотой, неточностью замены реальных

расходов нормативными показателями и погрешностями измерений поступлений и расходов газа. Это делает невозможным подход к анализу баланса, основанный на полном точном учете всех составляющих баланса.

При проведении данного исследования были доступны суточные и месячные значения погрешности сведения баланса газа в ГТС в границах УМГ, а также ряда сопутствующих режимно-технологических параметров (факторов) – объемы потребленного и транспортированного газа, обобщенный показатель входного давления по компрессорным станциям (КС), количество остановов и запусков газоперекачивающих агрегатов (ГПА), изменение запаса газа в трубе за семь последних лет.

Начальное исследование имеющихся данных показало, что детерминированные зависимости погрешности определения баланса от доступных факторов отсутствуют; данные неравномерные в диапазоне изменения независимой переменной; есть нерегулярные точки (разрыва, скачкообразного изменения).

В таких условиях для анализа погрешности расчета баланса была поставлена задача построения на основе неполных данных модели с прогнозными свойствами [1,2]. В случаях сложных объектов, как ГТС, реально возможными являются модели, построенные по принципу "черного ящика". При этом моделируется лишь внешнее функционирование объекта, который имитирует поведенческие особенности системы.

Для оценки зависимости величины разбаланса от режимно-технологических параметров был произведен корреляционный анализ накопленных данных. Ранжирование факторов по результатам корреляционного анализа показало, что среди доступных для анализа факторов основным является объем потребления газа, с которым связанные измерения расходов газа и нетехнологические расходы при отборе газа на потребление. Второй по значению – обобщенный показатель входного давления по КС, который характеризует режим работы КС и, очевидно, отображает сверхнормативные нетехнологические расходы газа на неоптимальных режимах работы ГПА.

Разрабатываемая модель погрешности расчета баланса должна учитывать основные факторы и отвечать ряду требований:

- допускать неполноту данных, как по количеству замеров, так и по перечню параметров, необходимых для полного описания поведения системы;
- работать при ошибках разной природы в данных, информационном шуме, противоречиях отдельных измерений друг другу;
- учитывать неравномерность данных (данные имеют произвольное распределение в пространстве сменных задачи);
- допускать неодинаковую достоверность в разных областях изменения параметров.

По результатам сравнительного анализа возможных типов построения модели было решено остановиться на моделях на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [3] и регрессионного анализа.

Нейронная сеть может быть формально определенная, как совокупность простых процессорных элементов функционирования (нейронов), объединенных однонаправленными связями. Сеть принимает некоторый входной сигнал и пропускает его сквозь себя с преобразованиями в каждом процессорном элементе. В процессе прохождения сигнала по связям сети происходит его обработка, результатом которой является определенный выходной сигнал. Основные свойства нейронных сетей:

- способность к обучению (с помощью усвоения информации из накопленных данных о поведении объекта моделирования);
- способность к обобщению; после обучения сеть становится нечувствительной к маленьким шумовым изменениям входных сигналов и дает правильный результат на выходе. Основные недостатки аппарата нейронных сетей:
- отсутствие строгой теории на выбор структуры нейронной сети;
- практическая невозможность извлечения приобретенных знаний с обученной ИНС.

Таким образом, аппарат нейронных сетей имеет необходимые свойства робастности, способный работать в условиях неполных и зашумленных данных. ИНС способны автоматически приобретать знания и могут быть использованы для прогнозирования.

Регрессионный анализ является классическим методом статистического анализа, предназначенным для построения аналитической зависимости между одной зависимой переменной и несколькими независимыми на основе ряда известных значений, обычно полученных с возможной ошибкой. Критерием нахождения значений параметров регрессионной модели является минимум суммы квадратов разницы между данным и рассчитанным значением зависимой переменной. От других методов аппроксимации регрессионный анализ отличается тем, что включает механизмы оценки точности результатов. Такой подход позволяет определять наилучшие оценки неизвестных параметров регрессии, адекватность полученной модели, числовую оценку точности модели.

При решении данной задачи были построены уравнения множественной регрессии разбаланса по режимно-технологическим факторам:

$$Q = c + c_1 q_{нотр} + c_2 q_{тп} + c_3 p_{КС} + c_4 n_{пуск16} + c_5 n_{пуск25} + c_6 n_{ост16} + c_7 n_{ост25} + c_8 \Delta q + c_9 z + c_{10} m, \quad (1)$$

где q – величина разбаланса, тыс. м³;

c – параметры множественной регрессии;

$q_{нотр}$ – объем газа, направляемого потребителям, тыс. м³;

$q_{тп}$ – объем транспортированного газа, тыс. м³;

$p_{КС}$ – обобщенный показатель входного давления по КС, атм;

$n_{пуск16}$ – количество пусков ГПА мощностью до 16 МВт;

$n_{пуск25}$ – количество пусков ГПА мощностью свыше 16 МВт;

$n_{ост16}$ – количество остановов ГПА мощностью до 16 МВт;

$n_{ост25}$ – количество остановов ГПА мощностью свыше 16 МВт;

Δq – изменение запаса газа в трубе, тыс. м³;

z – тип периода (1 – период замены диафрагм в измерительных устройствах);

m – номер месяца.

Регрессионный анализ, который позволяет рассчитать оценку значения величины погрешности баланса по значениям доступных показателей транспортирования газа в ГТС с оценкой точности и адекватности результата, отвечает значительной части требований к методу построения математической модели баланса газа в газотранспортной системе УМГ. Однако, одновременно этот метод имеет существенные недостатки, которые ограничивают его применение: необходимость нетривиальной работы с нелинейными моделями; отсутствие средств для обработки данных в точках разрыва или прыжка; проблемы с нечисловыми факторами. Для некоторой компенсации указанных недостатков для каждого УМГ ДК “Укртрансгаз” была построена модель, которая включает три регрессионных зависимости разных сезонов – зимы, лета и переходного сезона (весна – осень).

Среди параметров есть связанные с резким изменением режима работы ГТС, которые приводят к ошибкам в учете и замерах расходов газа и возникновению цепных реакций, следствия которых затухают на протяжении некоторого времени. Эти процессы включены в модели посредством учета пусков/остановов газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Также существуют периоды переналадки измерительных средств при переходе с одного режима потребления газа на другого (с летнего на зимний и назад), в которые ошибка измерения может увеличиваться, что приводит к возрастанию величины разбаланса. Учет приведенных факторов был выполнен путем введения дополнительных параметров, отражающих период переналадки измерительных средств и сезон работы (летний/зимний/переходный).

Адаптивная информационная модель на ИНС строилась на основе трехслойной нейронной сети [3]. Количество нейронов во внутреннем слое равнялось 5, нейроны каждого слоя соединяются с нейронами предыдущего и последующего слоев по принципу “каждый с

каждым”.

Текущее состояние s нейронов первого слоя определяется как взвешенная сумма с весами w режимно-технологических параметров:

$$s = w + w_1 q_{номр} + w_2 q_{мп} + w_3 p_{КС} + w_4 n_{нук16} + w_5 n_{нук25} + w_6 n_{осм16} + w_7 n_{осм25} + w_8 \Delta q + w_9 z + w_{10} m. \quad (2)$$

Выход нейрона x определяется активационной функцией его состояния $f(s)$. Для модели разбаланса был использован сигмоид – нелинейная функция с насыщением:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-0,5s}}. \quad (3)$$

Выходные значения нейронов первого слоя поступают на вход нейронов внутреннего слоя. Их текущее состояние представляет собою взвешенную сумму входов:

$$s = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \quad (4)$$

Выход единственного нейрона третьего слоя представляет собой выходное значение модели.

Разработанные модели баланса газа – регрессионные и адаптивные информационные на основе искусственных нейронных сетей были протестированы на реальных данных. Результаты тестов представлены в табл. 1. Целью тестирования было определение меры пригодности моделей для применения в методе оценки зависимости величины погрешности баланса газа от режимно-технологических параметров ГТС УМГ.

Таблица 1

Погрешности тестирования построенных моделей

УМГ	Погрешность тестирования модели на ИНС, %	Погрешность тестирования регрессионной модели, %
ДТГ	2,09	2,50
ХТГ	5,56	5,18
ЧТГ	5,52	5,93
КТГ	5,76	7,58
ЛТГ	4,35	6,65
ПТГ	5,75	3,89

По результатам тестирования можно сделать вывод, что обе модели способны адекватно отображать состояние системы в рамках поставленной задачи. Средняя ошибка на тестовых данных для числовой информационной модели на основе ИНС составляет 4,8 %, для регрессионной модели на тех же данных – 5,3 %.

Метод оценки погрешности основывается на результатах сравнительного анализа применения двух моделей. Регрессионная модель предназначена для быстрого получения предварительных результатов и контроля модели на ИНС, что способствует повышению общей достоверности метода.

Оценка погрешности включает такие этапы:

- расчет ожидаемой величины погрешности баланса с помощью основной модели на искусственных нейронных сетях $G_{ИНС}$ и регрессионной модели – G_p с определением среднеквадратичного отклонения σ результата;
- анализ отклонения значений $|G_p - G_{ИНС}|$ как оценки точности определения

погрешности баланса;

- расчет допустимой оценки верхней границы погрешности.

Метод оценки погрешности баланса может применяться для решения 2-х категорий задач:

- 1) анализа достоверности определения объема погрешности;
- 2) прогнозирования объема погрешности.

В первом случае, когда известен фактический объем погрешности, расчетные значения применяются для сравнительного анализа. Величину различия между фактическим и расчетными значениями погрешности баланса можно рассматривать как меру достоверности определения объема погрешности. Расхождение величин погрешностей может свидетельствовать об ошибке в данных, влияние неучтенных обстоятельств, ситуаций и т.п. В таком случае необходимо провести дополнительный анализ. Выявления таких случаев является одной из целей применения метода.

Во втором случае, для прогнозирования, выполняется расчет ожидаемой погрешности баланса с помощью обеих моделей для одного набора значений режимно-технологических параметров, который формируется из плановых задач и ожидаемых величин на прогнозный период. Если результаты обеих моделей близкие, выход модели на ИНС принимается как достоверный результат с точностью, которая определяется различием между результатами.

Разработанный метод был апробирован на реальных данных из всех управлений магистральных газопроводов ДК „Укртрансгаз”. В табл. 2 представлены результаты выполненного прогнозирования погрешности баланса для одного из УМГ ДК «Укртрансгаз».

Таблица 2

Пример прогноза погрешности баланса ГТС в границах УМГ

Период	Относительная погрешность расчета баланса (от объема поступления газа), %		
	январь	февраль	
Период I	0,27 %	0,23 %	
Период II	0,66 %	0,51 %	
Период III	0,33 %	0,31 %	
Период IV	0,23 %	0,23 %	
Период V	0,19 %	0,17 %	
Период VI	0,29 %	0,26 %	
Период VII	0,21 %	0,16 %	
Min за I – VII период.	0,19 %	0,16 %	
Max за I – VII период	0,66 %	0,51 %	
Среднее значение	0,31 %	0,27 %	
Прогноз на VIII период	регрессионная модель	0,29 %	0,26 %
	ИНС	0,24 %	0,21 %
Фактическое значение за VIII период	0,22 %	0,18 %	

Фактические значения несколько (на 0,02–0,07 %) меньше прогнозируемых. Это можно объяснить применением дополнительных мер энергосбережения. Результаты апробации

подтверждают дееспособность разработанного метода анализа и прогнозирования погрешности расчета баланса газа.

Вывод

По результатам ранжирования факторов и апробации можно сделать вывод, что основными направлениями мероприятий по уменьшению погрешности сведения баланса являются повышение качества учета отбираемого на потребление газа, равномерная загрузка ГПА на номинальных режимах, повышение точности определения расхода газа на производственно-технологические нужды в соответствии с регламентами эксплуатации оборудования.

Список литературы

1. Ильченко Б. С., Беккер М. В., Прищепо А. А., Метод и его применение для прогнозирования объемов разбаланса при транспортировке и распределении газа / XII Міжнародна конференція «Ресурсозбереження у ринкових відносинах», тези доповідей, – Київ.: НДЦ «Нафтохім», 2005 – С. 3–5.
2. Ильченко Б. С., Прищепо О. О., Прищепо І. О. Аналіз та прогнозування похибки розрахунку балансу газу в системі магістральних газопроводів / Матеріали XIII Міжнародної конференції «Ресурсоенергозбереження у ринкових відносинах», 12–16 червня 2006 р. / Під редакцією Халявко М.П. та ін. – Київ.: ПВП «Задруга», 2006 – С. 135–146.
3. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника. / Мир, М., 1992 – 184 с.

Поступила в редакцию 07. 02 2013 г.