

УДК 622.691.4:519.87

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРИЧИН ДИСБАЛАНСА ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ТРУБОПРОВОДНОЙ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Павловский М.А.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

e-mail: pma09@ua.ru

Аннотация. В процессе эксплуатации трубопроводных газотранспортных систем (ГТС) по различным причинам в системе постоянно наблюдается дисбаланс транспорта газа, т.е. расхождение между объемом газа, поступившим в систему, объемом газа, накопленным в системе, и объемом газа, покинувшим систему. В статье рассматривается методика, позволяющая определить возможные причины увеличения дисбаланса в трубопроводной ГТС, используя методы математической статистики.

Ключевые слова: дисбаланс, транспорт газа, газотранспортная система, ГТС, математическая статистика, корреляция, регрессия, корреляционно-регрессионный анализ, коэффициенты эластичности, ряд Фурье, дисперсия, среднее квадратическое отклонение

В процессе эксплуатации трубопроводных газотранспортных систем (ГТС) специалистами производственно-диспетчерских служб газотранспортных обществ ОАО «Газпром» ведется постоянный мониторинг поступления и распределения природного газа в системе. При этом по различным причинам в системе постоянно наблюдается некоторое расхождение между объемом газа, поступившим в систему, объемом газа, накопленным в системе, и объемом газа, покинувшим систему. Такое расхождение называется дисбалансом транспорта газа и является важнейшим показателем работы газотранспортного общества, а его отклонение от нуля на относительно большую величину служит первым сигналом о нарушении работы объектов ГТС. Поэтому задача оперативного мониторинга данного показателя и определения причин увеличения его абсолютного значения является неотъемлемой частью работы газотранспортного общества.

К основным причинам увеличения дисбаланса транспорта газа в ГТС можно отнести:

1. ухудшение технического состояния оборудования элементов ГТС, в том числе его физический износ, который может приводить к увеличению потребления газа, расходуемого на собственные нужды, а также к ошибочному расчету объемов прошедшего газа измерительными приборами;

2. ухудшение показателей качества газа, т.е. «загрязнение» газа, и другие непредвиденные изменения компонентного состава газа, которые также приводят к ошибочному расчету объемов поступившего и распределенного газа измерительными приборами;

3. утечки газа, вызванные нарушением герметичности таких объектов ГТС, как запорная арматура, установки очистки и охлаждения газа и др.;
4. потери газа при авариях;
5. измерения за пределами допустимых диапазонов измерительных приборов;
6. погрешности и сбои в работе измерительных приборов и др.

Естественно, что любое газотранспортное общество прилагает большие усилия для предотвращения и устранения перечисленных причин, а именно:

1. регулярно проводит плановые мероприятия по контролю технического состояния оборудования ГТС и его последующему ремонту;
2. выполняет закупку более совершенного измерительного оборудования;
3. совершенствует нормативно-методическое обеспечение для расчета баланса транспорта газа и учета потерь газа, в том числе при расходовании газа на собственные нужды и др.

Тем не менее, как и в любой сложной системе, в ГТС могут возникать непредсказуемые нарушения в работе оборудования, о которых в конечном итоге сигнализирует увеличение дисбаланса транспорта газа. Таким образом, задача анализа причин изменения данной величины сводится к поиску объектов ГТС, нарушения в работе которых к этому привели.

Ввиду высокой сложности современных ГТС, для решения данной задачи требуется провести анализ информации о структуре ГТС, об источниках и объемах поступления газа в систему, об объемах распределения газа в системе и об объемах газа, покинувшего систему через узлы, расположенные на границе с другими газотранспортными обществами. Провести анализ такого объема информации вручную не представляется возможным, поэтому становится актуальной задача автоматизации данного процесса и как следствие задача разработки алгоритма выполнения подобного анализа с применением методов математической статистики и теории принятия решений.

В общем виде уравнение баланса транспорта газа для ГТС, имеющей транзитно-распределительный характер, можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^n Q_{nocm_i} - \sum_{j=1}^m Q_{nomp_j} - \sum_{k=1}^d Q_{mp_k} - Q_{CTH} + \Delta Q_{зГС} = 0, \quad (1)$$

где Q_{nocm_i} – объем газа, поступившего в ГТС через i -й пункт замера расхода газа (ПЗРГ), расположенный на границе с другими газотранспортными (ГТО) и газоперерабатывающими (ГПО) обществами;

Q_{nomp_j} – объем газа, распределенного потребителям через j -ю газораспределительную станцию (ГРС);

Q_{mp_k} – объем газа, покинувшего ГТС через k -й ПЗРГ, расположенный на границе с другими ГТО и ГПО;

$Q_{стн}$ – объем газа, израсходованного на собственные технологические нужды;

$Q_{згс}$ – изменение объема газа, находящегося в ГТС в рассматриваемый период.

Следовательно, для разработки методики анализа причин дисбаланса транспорта газа в ГТС определенного ГТО необходимо определить элементы данной ГТС, изменение объемов прохождения газа через которые оказывает влияние на изменение величины дисбаланса. К таким элементам относятся:

1. ПЗРГ, расположенные на границе с ГТО и ГПО, от которых газ поступает в ГТС рассматриваемого общества;

2. ГРС, через которые газ распределяется конечным потребителям, и которые потребляют часть газа на собственные нужды;

3. компрессорные станции, потребляющие часть транспортируемого газа на собственные нужды;

4. ПЗРГ, расположенные на границе с ГТО и ГПО, в ГТС которых газ поступает из ГТС рассматриваемого общества;

5. некий условный абстрактный элемент, характеризующий объем потребления газа, который находится в ГТС, за отчетный период;

6. некий условный абстрактный элемент, характеризующий объем газа, поступивший в ГТС за отчетный период.

На следующем этапе анализа необходимо определить, изменения в работе каких из выделенных элементов могли оказать влияние на увеличение величины дисбаланса в ГТС.

Сегодня ГТО хранят в своих оперативных базах данных достаточно подробную информацию о структуре ГТС в виде технологических схем, ведут учет значений параметров газа, получаемых с объектов ГТС в оперативном режиме с использованием системы телемеханики, а также выполняют детализированный посуточный учет объемов поступившего и распределенного природного газа. Следовательно, ГТО располагают достаточным объемом информации для автоматизации процесса анализа причин суточного дисбаланса транспорта газа с использованием следующей методики:

1. Используя информацию, хранящуюся в оперативной БД Общества, для каждого из анализируемых элементов формируются массивы X_k , содержащие значения суточных объемов газа по данным элементам за предыдущие n суток;

2. Формируется массив Y , содержащий значения суточных дисбалансов за предыдущие n суток;

3. Используя массивы X_k и Y , выполняется многофакторный корреляционно-регрессионный анализ:

а) для каждого из анализируемых элементов рассчитываются коэффициенты парной корреляции между массивами X_k и Y [1]:

$$r_k = \frac{\sum X_k Y - \frac{\sum X_k \sum Y}{n}}{\sqrt{\left(\sum X_k^2 - \frac{(\sum X_k)^2}{n}\right)\left(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}\right)}}; \quad (2)$$

б) формируется матрица X , столбцы которой соответствуют массивам X_k для тех $m = \max\left[15, \frac{n}{3}\right]$ элементов, для которых были получены максимальные коэффициенты r_k ;

в) вычисляется массив коэффициентов множественной регрессии [1]:

$$a = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (3)$$

где X^T – матрица, транспонированная к матрице X ;

$(X^T X)^{-1}$ – матрица, обратная к матрице $X^T X$.

Обратная матрица рассчитывается по формуле [2]:

$$(X)^{-1} = \frac{1}{|X|} X_{np}, \quad (4)$$

где X_{np} – присоединенная матрица к матрице X ;

$|X|$ – определитель матрицы X .

Присоединенная матрица рассчитывается по формуле [2]:

$$X_{np} = (A_{ij})^T, \quad (5)$$

где A_{ij} – алгебраическое дополнение элемента x_{ij} матрицы X , рассчитываемое через минор M_{ij} данного элемента:

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}. \quad (6)$$

Полученные коэффициенты парной корреляции и коэффициенты регрессии показывают, как дисбаланс транспорта газа зависит от объемов газа, учтенных по каждому из рассматриваемых элементов ГТС.

4. Выполняется проверка надежности полученных коэффициентов регрессии при помощи t -критерия Стьюдента;

5. По полученным коэффициентам регрессии рассчитываются более информативные β -коэффициенты:

$$\beta_k = a_k \frac{\sigma_{X_k}}{\sigma_Y}, \quad (7)$$

где σ_{X_k} – среднее квадратическое отклонение значений массива X_k ;

σ_Y – среднее квадратическое отклонение значений массива Y .

β -коэффициенты в данном случае показывают на сколько единиц изменяется среднее квадратическое отклонение значения дисбаланса при изменении среднего квадратического отклонения объема газа, учитываемого по k -му элементу, на единицу.

6. Для проверки тесноты связи между величиной дисбаланса и значениями объемов газа, учитываемых по каждому из анализируемых элементов, рассчитывается коэффициент множественной корреляции:

$$r_y = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{факт}}^2}{\sigma^2}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{факт}}^2$ – факторная дисперсия значений дисбаланса;

σ^2 – общая дисперсия значений дисбаланса.

Факторная дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{n-1}, \quad (9)$$

где \hat{Y}_i – значение дисбаланса, рассчитанное по фактическим значениям объемов газа для каждого из анализируемых элементов ГТС с использованием полученных коэффициентов регрессии.

Общая дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}. \quad (10)$$

7. Выполняется проверка надежности полученного коэффициента множественной корреляции по критерию Фишера;

8. Для тех элементов, которые соответствуют таким объектам ГТС как ГРС и ПЗРГ выполняется анализ изменения параметров транспорта газа (температура и давление) на данных объектах на дату обнаружения дисбаланса, а именно:

а) для каждой ГРС и каждого ПЗРГ из оперативной БД Общества загружаются массивы T_k и P_k среднесуточных значений температуры и давления газа, прошедшего через данные узлы за последние n суток;

б) полученные значения параметров представляют собой числовые ряды, которые раскладываются в коэффициенты ряда Фурье по следующим формулам:

$$\alpha_k = \sum_i T_{ki} \cos\left(\frac{2\pi k(i-1)}{n}\right); \quad (11)$$

$$\beta_k = \sum_i T_{ki} \sin\left(\frac{2\pi k(i-1)}{n}\right); \quad (12)$$

в) на основе полученных α и β -коэффициентов рядов Фурье рассчитываются контрольные значения параметров, которые должны были быть получены на дату обнаружения дисбаланса:

$$T_{k(n+1)} = \sum_i \alpha_{ki} \cos\left(\frac{2\pi i(n-1)}{n}\right) + \sum_i \beta_{ki} \sin\left(\frac{2\pi i(n-1)}{n}\right); \quad (13)$$

г) затем для каждого из анализируемых элементов вычисляется коэффициент, показывающий насколько рассчитанные значения отличаются от соответ-

ствующих им фактических значений:

$$K_{\Delta_k} = \left| \frac{Q_{расч_k} - Q_{факт_k}}{Q_{пост}} \right| + \left| \frac{P_{расч_k} - P_{факт_k}}{P_{max_k}} \right| + \left| \frac{T_{расч_k} - T_{факт_k}}{T_{max_k}} \right|, \quad (14)$$

где $Q_{пост}$ – суммарный объем газа, поступивший в систему от соседних ГТО и ГПО;

P_{max_k} – максимально-допустимое давление газа на объекте ГТС, соответствующему k -му элементу;

T_{max_k} – максимально-допустимая температура газа на объекте ГТС, соответствующему k -му элементу и т.д.

9. По результатам анализа для каждого из анализируемых элементов рассчитывается итоговый коэффициент корректности:

$$K_{кор_k} = |r_k| \cdot (1 + K_{\Delta}) + |\beta_k|. \quad (15)$$

Используя рассчитанные коэффициенты корректности можно сделать вывод, как изменение объема газа по тому или иному элементу могло послужить причиной увеличения дисбаланса в ГТС. Например, если для определенного ПЗРГ получился высокий коэффициент корректности, то это может свидетельствовать о том, что в работе данного ПЗРГ произошли нарушения, которые в итоге привели к увеличению величины дисбаланса.

Рассмотренный вариант анализа дисбаланса транспорта газа позволяет разработать технологические рекомендации по управлению дисбалансом ГТС и может быть использован для получения первоначальной информации о том, нарушения в работе каких объектов ГТС послужили для этого причиной. Эта информация существенно сузит диапазон поиска и послужит основой для дальнейшего анализа диспетчером ПДС газотранспортного общества причин увеличения дисбаланса транспорта газа. Для повышения точности разработанной методики анализа, можно воспользоваться системой высокоточного математического моделирования трубопроводной ГТС [3], что позволит заменить используемый в данной методике расчет контрольных значений параметров газа на таких объектах как ПЗРГ и ГРС при помощи прямого и обратного преобразований Фурье на гидродинамический расчет этих значений.

Литература

1. Харламов А.И., Башина О.Э., Бабурин В.Т. Общая теория статистики: Учебник. М.: Финансы и статистика, 1994. 296 с.
2. Хемди А. Таха. Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 912 с.
3. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов, изд. 2-е, перераб. и доп. М.: МАКС Пресс, 2009. 436 с.

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS TO ANALYZE THE CAUSES OF IMBALANCE IN THE GAS TRANSMISSION SYSTEM

M.A. Pavlovsky

Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

e-mail: pma09@ya.ru

Abstract. *For the various reasons in the gas transmission systems (GTS) a unbalance of gas transport, i.e. a divergence between the volume of the gas which has arrived in the system, the volume of the gas which had been saved up in system, and the volume of the gas which has left system, is constantly observed. The article describes the technique, which make it possible to determine probable reasons of unbalance increase in a pipeline GTS using methods of mathematical statistics.*

Keywords: *unbalance, gas transmission, gas transmission system, GTS, mathematical statistics, correlation, regression, correlation-regression analysis, elasticity coefficient, Fourier series, dispersion, standard deviation*

References

1. Kharlamov A.I., Bashina O.E., Baburin V.T. *Obshchaya teoriya statistiki: Uchebnik (General theory of statistics. Textbook)*. Moscow, Finansy i statistika, 1994. 296 p.
2. Khemdi A. Takha. *Vvedenie v issledovanie operatsii, 7-e izd. Per. s angl.* Moscow, Publising House "Williams", 2005. 912 p. (Transl. from: Hamdy A. Taha. *Operations Research: An Introduction. 7 ed.* Prentice Hall, 2003. 830 p.)
3. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Pryalov S.N. *Osnovy chislennogo modelirovaniya magistral'nykh truboprovodov, izd. 2-e, pererab. i dop.* (Fundamentals of numerical simulation of trunklines). Moscow, MAX Press, 2009. 436 p.