

В.С. Годлевский

ОСОБЕННОСТИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СЕТЕВЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Введение. Проблемы управления технологическими режимами больших магистральных газотранспортных систем (МГТС) формируют соответствующие задачи, для решения которых предназначены программные комплексы, выполняющие функции советчиков диспетчеров и технологов. Формулирование и формализация этих задач определяются специфическими свойствами и особенностями режимов МГТС и их объектов, которые определяют специальные требования к методам и средствам решения задач моделирования и расчетов режимов систем. В статье наряду со свойствами и особенностями МГТС, отраженными в литературных источниках (например, [1] – [4]), приводятся дополнительные свойства, с учетом которых формулируются расчетные задачи и конструируются методы их решения.

1. СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ МГТС.

Среди многих особенностей магистральных газотранспортных систем и их режимов отметим следующие.

Неточность задания исходной информации. Информация о техническом состоянии и параметрах объектов МГТС является существенно неопределенной. Это обусловлено следующими причинами:

- протеканием постоянных во времени и непредсказуемых по интенсивности «старений» технологических объектов МГТС, что приводит к случайным отклонениям их параметров от паспортных данных (например, старение нагнетателей приводит к «проседанию» таких их характеристик, как приведенные характеристики нагнетания, политропического к.п.д., внутренней приведенной мощности; засорение трубопроводов приводит к увеличению их гидравлического сопротивления; старение аппаратов воздушного охлаждения приводит также к существенным изменениям их характеристик и др.);

- отсутствием возможности перевода объектов МГТС (нагнетателей, приводов, аппаратов воздушного охлаждения) в специальные режимы для измерения текущих (реальных) параметров этих объектов, что связано с необходимостью вывода их объектов из рабочих схем и режимов МГТС;

- не достаточной оснащенностью объектов МГТС расходомерами, что обусловлено их большими стоимостями и сложностями из-за необходимости учета больших скоростей движения газа и малой его плотности, хотя для повышения эффективности управления расходомеры целесообразно устанавливать не только на всех входах-выходах МГТС, у потребителей, но и на каждом нагнетателе всех цехов компрессорных станций.

Узкие области существования режимов МГТС и ее объектов. Области существования режимов оборудования компрессорных станций и газотранспортных систем в целом являются достаточно узкими, что влечет за собой сложную проблему технологического управления режимами МГТС, которая сводится, прежде всего, к необходимости обеспечения совместного выполнения технологических ограничений для оборудования всех объектов МГТС при постоянных воздействиях на систему многих дестабилизирующих факторов. К основным из этих факторов относятся: нестабильность расходов газа у потребителей; нестабильность погодных условий при существенной зависимости технологических ограничений оборудования компрессорных станций от температуры атмосферы; практически постоянно возникающие и протекающие плановые и аварийные работы на объектах МГТС, которые требуют изменения режимов всех объектов МГТС.

Энергоёмкость процессов транспорта газа. Процесс транспорта газа по магистральным газопроводам является достаточно энергоёмким из-за больших расходов газа и электроэнергии на компримирование газа на каждой компрессорной станции. Это негативно отражается на технологические и экономические показатели всей системы газоснабжения, а также на экологическое состояние окружающей среды.

Взаимозависимость режимов технологических объектов. Для МГТС имеет место большая взаимозависимость друг от друга режимов отдельных объектов МГТС. При этом данная зависимость не уменьшается и даже увеличивается с ростом размерности МГТС. Например, режим компрессорной станции (КС), расположенной в «голове» ПО «Мострансгаз» на газопроводе «Уренгой-Ужгород», имеет достаточно сильную зависимость от режима и загрузки станций этого газопровода на западной границе Украины. Связь степени взаимозависимости режимов объектов МГТС от числа КС на трассе обусловлена следующими особенностями МГТС.

Первая особенность режимов объектов в МГТС обусловлена наличием эффекта увеличения коэффициентов влияния расхода газа потребителя, расположенного в выходном узле МГТС, на величины перекачиваемого газа на компрессорных станциях по мере их удаления от этого потребителя к поставщику газа (к входному узлу). Этот эффект обусловлен влиянием и суммированием расходов технологического газа на каждой компрессорной станции (на компримирование и собственные нужды) вдоль МГТС. Увеличение коэффициента влияния нелинейно зависит от числа КС и примерно определяется суммой возрастающей геометрической прогрессии, число членов в которой равно числу КС в МГТС, а знаменатель – среднему коэффициенту потерь газа на одной КС (равному отношению объема технологического газа для КС к объему перекачиваемого газа по КС). Таким образом, имеет место нелинейное увеличение вклада каждого потребителя газа в общий расход газа вдоль МГТС по направлению к входному узлу, то есть - нарастающая волна расхода газа от выхода к входу МГТС (чем протяженней МГТС, тем существенней это увеличение).

Вторая особенность состоит в том, что каждая КС в МГТС представляет собой регулятор своего выходного давления. Температура же газа на выходе КС обычно не поддерживается высокой точностью (грубо регулируется с помощью аппаратов воздушного охлаждения). Поэтому увеличение температуры газа на выходе КС существенно зависит от температуры газа на ее входе. Приращение температуры газа на КС далее демпфируется его охлаждением естественным путем вдоль трассы из-за влияния дроссель-эффекта и теплообмена с грунтом. В целом, вдоль МГТС в зависимости от конкретных условий может иметь место волна увеличения коэффициента влияния неточного задания температуры на входах КС при расчетах режимов.

Третья особенность состоит в том, что при выходе на технологические ограничения режимных параметров нагнетателей и другого оборудования КС прекращает выполнять функции регулятора своего выходного давления, что приводит к его уменьшению (или увеличению). Изменение выходного давления КС приводит, в свою очередь, к увеличенному почти по квадратичному закону изменению давления газа на входе последующей КС. Это может привести к нелинейно нарастающей волне изменения давления газа по всей трассе в направлении к выходному узлу МГТС (если последующие КС не имеют технологических возможностей для демпфирования изменений своих входных давлений), то есть - к аварийному режиму.

2. ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ БОЛЬШИХ СЕТЕВЫХ МГТС И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Приведенные выше основные особенности режимов и объектов МГТС формируют комплекс задач моделирования этих режимов и требования к вычислительным методам и средствам их решения. К основным задачам моделирования стационарных режимов сетевых МГТС необходимо отнести следующие.

Идентификация параметров оборудования и режимных параметров. Большую неопределенность в исходной информации о параметрах рассчитываемых МГТС можно существенно уменьшить путем применения методов статистической обработки измерений штатных датчиков расходов, давлений, температур, оборотов на технологическом оборудовании объектов МГТС и методов математической идентификации неизмеряемых параметров. Таким образом, программный комплекс моделирования и оптимизации режимов МГТС должен содержать блок параметрической и структурной идентификации, сопряженный с базой нормативно-справочной и оперативно-технологической информации МГТС. При этом, с целью нейтрализации влияния нестационарных процессов следует обновлять содержание оперативно-технологической базы данных с периодом, равным, примерно 0.5 часа (что диктуется значениями скоростей протекания переходных процессов в магистральных МГТС с типовыми длинами линейных участков). Отметим также, что, как и при поиске допустимых или оптимальных режимов, при проведении идентификации рассматриваемой МГТС сопутствующие расчеты режимов целесообразно проводить с учетом схем приграничных МГТС.

В качестве идентифицируемых параметров оборудования целесообразно использовать следующие: коэффициенты эффективности и теплопередачи линейных участков (ЛУ); изменение запасов газа на ЛУ (например, расходы виртуальных потребителей-поставщиков газа на ЛУ, отражающие изменения запаса газа в них ЛУ в рамках известного квазистационарного метода); коэффициенты «проседания» приведенных характеристик нагнетателей; коэффициенты функциональных зависимостей аппаратов воздушного охлаждения, массовые расходы газа у потребителей, у которых отсутствуют расходомеры. В качестве режимных параметров принимаются: узловые давления и температуры; массовые и объемные расходы и температуры газа по линейным участкам и по нагнетателям компрессорных станций; обороты приводов и развиваемые мощности нагнетателей; технологические расходы газа на компрессорных станциях и др. Идентификацию параметров целесообразно проводить с учетом обеспечения узловых балансных уравнений как для газовых массовых потоков (с учетом изменения запасов газа по ЛУ), так и для энергетических потоков. Полученные в результате идентификации режимы должны характеризоваться выполненными всеми технологическими ограничениями на режимные параметры. С учетом изложенного математическую формулировку задачи идентификации представим в виде:

$$F(X, R, R_0) = 0, \quad (2.1)$$

$$\Phi_0 \leq \Phi(X, R, R_0) \leq \Phi_1, \quad (2.2)$$

$$\min_R \sum_{i=1}^n \alpha_i [x_i(R, R_0) - x_{i0}(R, R_0)]^2. \quad (2.3)$$

В (2.1)–(2.3) приняты следующие обозначения:

$F(X, R, R_0) = [f_1(\dots), \dots, f_n(\dots)]^T$ - векторная функция системы режимных уравнений для МГТС (уравнений линейных участков, компрессорных станций, балансных узловых уравнений и др.); $X(R, R_0) = [x_1(\dots), \dots, x_n(\dots)]^T$ - вектор зависимых (расчетных) режимных параметров (давлений, температур, расходов газа, оборотов приводов нагнетателей); R - вектор идентифицируемых параметров; R_0 - вектор заданных (известных) параметров; $\Phi(X, R, R_0)$ - вектор режимных технологических параметров и функций от них; Φ_0, Φ_1 - векторы значений допусков; $x_i(R, R_0)$ и $x_{i0}(R, R_0)$ - расчетные и измеренные значения зависимых режимных параметров ГТС; α_j - весовые положительные коэффициенты, причем $\alpha_i = 0$, если зависимый режимный параметр $x_j(R, R_0)$ не является измеряемым.

Отметим, что в (2.1) и далее задача расчета режимов МГТС формулируется при условии задания значений давлений и температур во входных узлах схемы, массовых

расходов газа в выходных и внутренних узлах МГТС. Неизвестными (искомыми) переменными в (2.1) являются значения давления и температуры газа во всех узлах схемы, кроме входных узлов, обороты приводов нагнетателей, массовые расходы по нагнетателям и линейным участкам, температуры газа на выходах линейных участков. По этим искомым переменным определяются расходы газа на компримирование в каждом нагнетателе КС, а также все функциональные параметры оборудования КС, которые входят в технологические ограничения (2).

Также отметим, что постановка задачи идентификации в виде (2.1) - (2.3) является, по нашему мнению, более корректной и строгой, чем распространенная и известная в литературе, например [1], постановка задачи идентификации, которая учитывает (2.3) и отдельные блоки системы (2.1) для линейных участков МГТС.

Планирование и оптимизация режимов. Анализ приведенных особенностей режимов МГТС приводит к выводу, что для обеспечения поиска технологически допустимых режимов из узких областей их существования расчетный комплекс моделирования режимов МГТС должен содержать в качестве необходимой составной части программный блок параметрической и структурной оптимизации режимов МГТС. Под структурной оптимизацией здесь понимается выбор рабочих схем включения оборудования – схем нагнетателей в цехах, схем самих цехов компрессорных станций, аппаратов воздушного охлаждения, схем включения трубопроводов на линейных участках, кранов, межсистемных перемычек и др. Применение блока параметрической и структурной оптимизации является необходимым прежде всего при планировании новых технологически допустимых режимов МГТС в случае проведения аварийных и штатных плановых ремонтных работ, при планировании новых режимов на будущие временные интервалы при изменении расходов газа у потребителей, при изменении параметров поставщиков газа (давлений, суммарных расходов газа), при изменении температуры атмосферы по МГТС. Применение данного блока также является необходимым при решении задачи минимизации суммарного по всей МГТС расхода газа на его компримирование. Данный блок оптимизации должен обеспечивать возможность поиска оптимальных решений как в автоматическом, так и в интерактивном режимах. Отсутствие этого блока в программном моделирующем комплексе резко уменьшает его эффективность и «ценность», поскольку «ручной» поиск диспетчером новых планируемых режимов на основе его интуиции даже с помощью «быстродействующего» программного комплекса далеко не всегда позволяет получить удовлетворительные и, тем более, близкие к оптимальным решения в случае больших сетевых МГТС.

Задачу планирования и оптимизации режимов МГТС сформулируем в виде

$$Fs(X, R_1, R_{01}, V) = 0, \quad (2.4)$$

$$\Phi_{0TS} \leq \Phi_{TS}(X, R_1, R_{01}, V) \leq \Phi_{1TS}, \quad (2.5)$$

$$\min_{V, S} W_T(X, R_1, R_{01}, V, S) . \quad (2.6)$$

В (2.4) – (2.6) приняты следующие обозначения: где S – функция, которая задает схему включения оборудования МГТС; (2.4) – система уравнений типа (2.1), которая зависит от текущей схемы включения оборудования; $\Phi_{TS}(X, R_1, R_{01}, V)$ - вектор режимных и параметрических ограничений для текущего набора значений температур атмосферы на компрессорных станциях и схемы включения оборудования; $W_T(X, R_1, R_{01}, V, S)$ - целевая функция, учитывающая множества наборов значений температуры атмосферы на компрессорных станциях и схем включения оборудования; V - вектор варьируемых параметров (давлений на выходах компрессорных станций, во входных и выходных узлах МГТС, массовых расходов у потребителей и поставщиков газа, массовых расходов газа по нагнетателям КС и др.), элементы вектора V входят во множество элементов векторов R и R_0 ; R_1, R_{01} - подвекторы векторов R и R_0 , которые не входят в вектор V . Функция S описывает

множество допустимых рабочих схем включения оборудования МГТС (схем включения нагнетателей и аппаратов воздушного охлаждения (АВО) в компрессорных станциях (КС); схем включения цехов и их групп относительно друг друга – общий вход - общий выход, общий вход – раздельный выход, раздельный вход – раздельный выход; схем включения линейного оборудования – линейных кранов, межсистемных переключателей и др.).

В состав вектора ограничений (2.5) входят ограничения на значения оборотов приводов, приведенных расходов, выходных давлений, выходных температур газа, развиваемые мощности по нагнетателям КС, на давления и расход газа у потребителей и поставщиков и другие технологические ограничения.

Отметим, что в ограничения (2.5) необходимо также вводить неравенства, которые отражают запас общей загрузки МГТС. Дело в том, что при минимизации расхода газа на компримирование проявляется так называемый эффект максимума давлений на выходах КС. Этот эффект может приводить к потере запасов нагнетателей на КС по мощностям, допустимым оборотам, по объемным приведенным расходам. Поэтому при небольшом увеличении расхода газа, например, на выходе лучевой МГТС и при уменьшении давления на выходе КС в начале МГТС из-за отсутствия резервов по мощностям, оборотам, приведенным объемным расходам может привести, как было отмечено выше, к резкому уменьшению давлений на последующих КС вдоль МГТС. В качестве функций неравенств, отражающие запас общей загрузки МГТС, можно использовать, например, коэффициенты загрузки МГТС по расходу газа, которые для j -го выходного граничного узла представим в виде:

$$K_{загр.j} = \frac{Q_j}{\max Q_j}, \quad (2.7)$$

где Q_j - текущее расчетное значение массового расхода; $\max Q_j$ - максимально возможное значение массового расхода, которое определяется путем решения задачи (2.5) - (2.6) при использовании в качестве целевой функции расход газа на j -ом выходном граничном узле МГТС.

На этапе планирования режимов МГТС целевую функцию (2.6) для упрощения задачи можно не учитывать, при этом планируется (конструируется) с учетом (2.4) и (2.5) новый режим, для которого все технологические ограничения должны быть выполнены. На этапе оптимизации режима решается задача (2.3) - (2.5). В качестве целевой функции могут выступать в зависимости от технологических, экономических, политических ситуаций различные функции типа суммарные потери газа на технологические нужды, мера отклонений расчетных давлений в выходных узлах МГТС от заданных значений и др.

Учет схем приграничных МГТС. Совместный анализ особенностей свойств МТС показывает, что с целью обеспечения необходимой достоверности расчетных данных, их адекватности целесообразно формировать расчетную схему МГТС, включая в неё по возможности кроме рассматриваемой МГТС (например, ГТС производственного объединения) и все приграничные с ней ГТС (производственные объединения). Так, при расчете всей магистральной газотранспортной системы Украины, целесообразно в единую расчетную схему включать кроме МГТС Украины и МГТС приграничных производственных объединений МГТС России и Беларуси, которые выступают в качестве поставщиков газа для МГТС Украины, а также МГТС западных стран. Такой подход к моделированию режимов МГТС является предпочтительней по степени соответствия получаемых результатов реальным и прогнозируемым режимам по сравнению с распространенным подходом, который заключается в применении эквивалентов для приграничных МГТС, являющимися поставщиками и потребителями газа. При этом МГТС – поставщики представляются в качестве идеального источника газа с постоянным давлением и постоянной температурой, значения которых не зависят от величин выходных расходов газа. Однако, выходные давления и температуры существенно нелинейно зависят от выходных расходов газа. Для поддержания их величин в требуемых допусках при изменении выходных расходов (как при увеличении, так и при уменьшении) обычно

необходимо проводить переключения схем работы оборудования и компрессорных станций, создавать новые режимы в рамках ограничений, которые в свою очередь неразрывно связаны с режимами моделируемых МГТС и создание которых требует временных затрат. При проведении же аварийных работ следует учитывать и использовать все возможные ресурсы как ГТС поставщиков газа, так и ГТС потребителей газа, для чего необходимо осуществлять совместные расчеты общих схем.

Анализ и представление результатов расчетов. Важным показателем эффективности программного комплекса для моделирования, идентификации и планирования режимов больших сетевых магистральных МГТС является наличие в комплексе блока автоматического анализа как текущих реальных (базовых) режимов, так и полученных в результате расчетов новых режимов. В случае отсутствия такого блока «ручной» анализ диспетчером полученных комплексом расчетных режимов или анализ текущих базовых режимов является весьма трудоемким, не формализованным и приводит к субъективным результатам. Для автоматической формализованной оценки свойств режимов целесообразно ввести и использовать интегральные и локальные показатели режима и отдельных объектов МГТС, в качестве которых можно использовать следующие показатели:

- коэффициенты загрузки МГТС по расходам газа для каждого выходного граничного узла (каждого внешнего потребителя) и для внутренних «больших» потребителей при заданных схемах работы оборудования компрессорных станций;

- коэффициенты загрузки МГТС, определенные с учетом всех резервных мощностей (установленных нагнетателей);

- коэффициенты загрузки компрессорных станций по возможным объемам перекачиваемых расходов газа, по уровням давлений, которые компрессорные станции могут обеспечивать, по установленным мощностям;

- обобщенный коэффициент загрузки компрессорных станций, который можно использовать для ранжирования всех компрессорных станций МГТС, то есть для выявления «узких мест» рассматриваемых МГТС в базовом или в новом (предлагаемом в результате расчетов) режиме;

- показатели ранжирования компрессорных станций по коэффициентам проседания приведенных характеристик нагнетателей;

- показатели ранжирования линейных участков МГТС по величинам их коэффициентов эффективности.

В качестве коэффициентов загрузки КС по перекачиваемым расходам газа здесь понимается показатели типа (2.7):

$$K_{загр.кскj} = \frac{Q_{kj}}{\max Q_{kj}},$$

где Q_{kj} - текущее расчетное значение выходного массового расхода j - ой КС;

$\max Q_{kj}$ - максимально возможное значение выходного массового расхода этой КС.

Блок автоматического анализа результатов расчетов должен обеспечивать представление информации по рассчитываемой ГТС как в виде иллюстративной схемы, так и в табличной форме с возможностью просмотра режимных параметров всех технологических объектов расчетной схемы и ее фрагментов.

Оценка и обеспечение точности результатов расчетов. Применение процедур идентификации увеличивает достоверность результатов расчета, их соответствие реальным базовым или прогнозируемым режимным параметрам. Однако, с помощью применения процедур идентификации можно только уменьшить многие погрешности задания исходной информации, но нельзя, в принципе, их исключить, а погрешности задания значений некоторых типов параметров нельзя даже и уменьшить.

Основными источниками погрешности расчетов режимов являются погрешности измерительных датчиков режимных параметров или полное отсутствие этих измерений для многих объектов ГТС, погрешности математического описания функциональных

характеристик технологических объектов типа нагнетателей, аппаратов воздушного охлаждения, погрешности применяемых систем уравнений для описания процессов транспорта газа по сложным линейным участкам (схемам соединения трубопроводов) и др.

Погрешности измерений на входах и выходах компрессорных станций, их цехов и их нагнетателей, в узлах потребителей и поставщиков газа давлений, температур, значений расходов газа, оборотов нагнетателей, температуры атмосферы имеют два механизма влияния на точность результатов расчета. Первый механизм является косвенным и сводится к влиянию этих погрешностей на точность идентификации параметров объектов, которые используются при расчетах, то есть к трансформированию этих погрешностей измерений в погрешности результатов идентификации. Подчеркнем, что погрешности измерений имеют достаточно большое влияние на точность идентификации некоторых параметров объектов. Особенно большое влияние имеют погрешности измерения входных и выходных температур и давлений нагнетателей и их оборотов на точность определения коэффициентов «проседания» приведенных характеристик нагнетателей (функций нагнетания и политропического к.п.д.).

Второй механизм влияния состоит в трансформировании погрешностей задания и прогнозирования величин давлений и температур газа в узлах поставщиков, значений расходов газа у потребителей, погрешностей задания и прогнозирования температуры атмосферы на объектах ГТС на точность прогнозирования и достоверность новых оптимизированных или планируемых (например, на сутки, декаду) новых режимов. Подчеркнем, что особое значение на точность планирования новых режимов имеют точность прогнозирования расходов газа потребителями и точность прогноза температуры атмосферы на объектах ГТС на рассматриваемый период времени. Это значение увеличивается при увеличении протяженности моделируемых ГТС. При этом погрешности задания распределения температур по трассе ГТС при расчетах планируемых режимов являются менее предсказуемыми по сравнению с погрешностями задания остальных параметров, что особенно проявляется на протяженных трассах, объекты которых находятся в разных часовых и климатических поясах.

Еще один источник погрешностей расчетов режимов сложных сетевых ГТС обусловлен погрешностями эквивалентирования многониточных сложных линейных трубопроводов одним однониточным трубопроводом. Как показали проверочные расчеты, относительная погрешность расчетов давлений и абсолютная погрешность расчетов температур, обусловленные эквивалентированием, существенно зависят от соотношений диаметров отдельных трубопроводов на ЛУ и от значения суммарного массового расхода газа по ЛУ. Чем больше отличие диаметров трубопроводов в ЛУ, тем больше погрешности эквивалентирования. По-видимому, в каждом конкретном случае расчетов режимов сложных ГТС с помощью эквивалентных моделей целесообразно проводить проверочные расчеты каждого ЛУ по исходным многониточным моделям для оценки точности эквивалентирования. При больших погрешностях расчетов или давления или температуры из-за эквивалентирования следует включать в общую схему ГТС исходную многониточную схему соответствующего ЛУ. В качестве допустимых величин погрешностей эквивалентирования можно, например, принимать уровни погрешностей измерительных датчиков давлений и температуры.

Здесь отметим, что применение распространенных [1, 2] или рекомендуемых в отраслевых нормативных материалах [5] моделей стационарных режимов однониточных линейных участков для расчетов многониточных линейных участков приводит к неоднозначным результатам, поскольку уравнения импульсов [1, 2], [5] имеют два решения относительно расхода при заданных давлениях. Данное обстоятельство приводит к большим ошибкам расчетов значений потоков газа по отдельным ниткам ЛУ. С целью устранения этих ошибок в [7] выполнена модификация известных уравнений импульса и энергии для однониточных ЛУ, которая направлена на устранение многозначных решений.

3. ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКОРОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАСЧЕТОВ

Приведенные выше основные задачи моделирования стационарных процессов транспорта газа и их особенности предъявляют высокие требования к показателям быстродействия вычислительных методов и средств. Это обусловлено тем, что:

- задачи идентификации, оптимизации и анализа точности являются многовариантными, требующими многочисленных расчетов систем трансцендентных уравнений, вычисления частных производных, переформирования самих уравнений (поскольку при решении задачи оптимизации режимов, которая формулируется в виде общей задачи нелинейного программирования с непрерывными и дискретными аргументами, приходится проводить изменения состава оборудования и схем их включения);

- размерности полной систем уравнений для моделируемых процессов транспорта газа рассматриваемой ГТС с учетом схем приграничных ГТС имеют большой порядок (например, с учетом уравнений для всех ниток трубопроводов, линейных кранов, нагнетателей размерность системы уравнений только для ГТС типа «Укртрансгаз» превышает 4000).

«Сильные» нелинейности уравнений нагнетателей, сочетание разнотипных линейных участков с различными длинами отдельных элементарных участков трубопроводов являются причиной плохой обусловленности полной системы уравнений для ГТС и, соответственно, причиной плохой сходимости и в ряде случаев полным отсутствием сходимости в случае применения метода Ньютона.

В программном комплексе «ДИАМАГ» [8], созданном в ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины совместно с МП «ДИСИТ» НАНУ и предназначенном для решения сформулированных выше задач, применяются специальные методы для обеспечения проведения быстрых и надежных расчетов. Приведем здесь некоторые из этих методов.

Быстрые вычисления частных производных переменных систем уравнений (режимных параметров) по независимым переменным. Число варьируемых независимых параметров при оптимизации и планировании режимов больших ГТС может достигать нескольких сотен только для одного шага оптимизации, число которых может также достигать нескольких сотен. Вычисление частных производных по таким параметрам путем численного дифференцирования требует чрезвычайно большого объема времени и, практически, не выполнимо. Реализованный в комплексе «ДИОМАГ» численно-аналитический метод вычисления частных производных является несравнимо более экономичным по отношению к методу численного дифференцирования и представляет собой адаптированный для ГТС метод [9] - [12], который заключается в следующем.

Учитывая, что поскольку система уравнений (2.1), (2.4) которые описывают стационарные режимы ГТС, являются совместными, то их можно учитывать в задаче нелинейного программирования с непрерывными ограничениями не как системы ограничений типа равенств, а как системы неявно заданных функций режимных зависимых параметров режимов ГТС от независимых варьируемых параметров. Такой способ дает возможность уменьшить трудоемкость решений задач (2.1) - (2.3) и (2.4) - (2.6). Покажем это на примере решения (2.1) - (2.3), для чего представим вектор зависимых переменных X для (2.1) в виде векторной функции

$$X = f(R), \quad (4.1)$$

которая не задана в явном виде и является решением системы (2.1). В (4.1): $f(\dots) = [f_1(R), \dots, f_n(R)]^T$ - векторная функция; $f_i(R)$ - скалярные функции.

Таким образом задача (2.1) – (2.3) сводится к задаче (2.2), (2.3) при (4.1), для решения которой (как и для решения (2.1) - (2.3)) целесообразно с точки зрения уменьшения количества итераций использовать методы решения задач нелинейного программирования с применением производных функций в (2.2), целевой функции (2.3) и, соответственно, векторной функции (4.1) по варьируемым параметрам R . При этом

общая трудоемкость решения задачи (2.2), (2.3) при (4.1) практически определяется трудоемкостью вычисления матрицы производных $\partial X / \partial R$. К сожалению, определение $\partial X / \partial R$ матрицы непосредственно из (4.1) не представляется в общем случае возможным. Однако, используя метод [9, 10], можно представить выражение для $\partial X / \partial R$ почти в явном виде:

$$\frac{\partial X}{\partial R} = - \left[\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial R}, \quad (4.2)$$

где $\frac{\partial F(X, V)}{\partial V}$ - матрица Якоби для системы (4.1); $\frac{\partial F(X, V)}{\partial V}$ - матрица производных вектора левой части (4.1) по элементам вектора V . Зависимость (4.2) можно получить путем дифференцирования системы (2.1) по R

$$\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial R} + \frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial R} = 0 \quad (4.3)$$

и решения полученной при этом матричной системы линейных алгебраических уравнений относительно матрицы $\partial X / \partial R$.

Матрицу Якоби $\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial X}$ и матрицу $\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial R}$ для (4.3) можно вычислять или путем аналитического дифференцирования, если это не вызывает затруднений, или путем численного дифференцирования. Отметим, что численное дифференцирование функций, заданных в явном виде, характеризуется сравнительно невысокой трудоемкостью. При этом в качестве матрицы Якоби в (4.3) целесообразно использовать значение матрицы Якоби с последнего шага решения системы нелинейных уравнений (2.1) методом Ньютона, что приводит к дополнительному уменьшению трудоемкости.

Из (4.3) следует, что вычисление столбцов матрицы $\partial X / \partial R$ можно выполнять путем многократных решений систем линейных уравнений с одной и той же матрицей Якоби и с различными векторами свободных членов – столбцами матрицы $\partial F(X, R, R_0) / \partial R$. Отсюда следует, что для вычисления частных производных от всех зависимых переменных системы уравнений (2.1) МГТС по всем независимым параметрам достаточно провести только одно LU - разложение (прямой ход) для матрицы Якоби системы (2.1) и затем многократно совершать обратные ходы для вычисления вектора производных $\partial X / \partial r_i$ по каждому элементу r_i вектора R . Такой метод вычисления вектора $\partial X / \partial R$ является наиболее экономичным из всех известных способов.

Соответственно, на каждом шаге решения задачи нелинейного программирования (2.2), (2.3) необходимы знания численных значений вектора (4.1), для получения которых следует решать систему нелинейных трансцендентных уравнений (2.1).

Аналогичным образом задача (2.4) – (2.6) сводится к решению задачи (2.5), (2.) путем представления вектора решения системы уравнений (2.4) в виде типа (4.1)

$$X = f_s(V) \quad (4.4)$$

и нахождения матрицы производных $\partial X / \partial V$ для (4.4) путем решения матричной системы линейных уравнений

$$\frac{\partial f_s(X, R_1, R_{01}, V)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial V} + \frac{\partial f_s(X, R_1, R_{01}, V)}{\partial V} = 0$$

Изложенный метод вычисления частных производных применяется во многих блоках программного комплекса «ДИОМАГ» - в блоке идентификации, планирования режимов, оптимизации, может быть использован для расчетов показателей точности расчетов режимов в рамках линейной теории точности.

Отметим, имеется существенное условие обеспечения возможности применения данного метода для МГТС, которое заключается в необходимости описания процесса транспорта газа по МГТС в виде единой совместной системы уравнений типа (2.1) и (2.4). Сложность выполнения этого условия вызвана специфическими свойствами компрессорных станций, основное из которых состоит в том, что каждая компрессорная станция представляет собой локальный регулятор давления. Это следует из того, что на выходе компрессорной станции при изменениях входных давлений и температур, объемов прокачиваемого газа должна поддерживаться заданная «уставка» давления путем регулирования оборотами нагнетателей, перераспределения потоков газа по цехам и по отдельным нагнетателям, которые по своим характеристикам обычно бывают различными. (Отличие характеристик нагнетателей друг от друга обусловлено как разнотипностью нагнетателей, так и различными показателями их текущего технического состояния). Синтез используемых в программном комплексе «ДИОМАГ» систем уравнений для компрессорных станций, цеха которых содержат нагнетатели, имеющие различные характеристики, основан на принципе статического регулирования. Управляемыми параметрами оборудования на компрессорной станции являются обороты нагнетателей и величины расходов газа по нагнетателям.

Для параметрической идентификации режимов и оборудования ГТС, планирования новых режимов и их оптимизации в программном комплексе «ДИОМАГ» используется специально разработанный метод решения общей задачи нелинейного программирования с непрерывными аргументами. В методе используются производные первого порядка целевой функции и ограничений.

Выбор технологически допустимых и «квазиоптимальных» схем включения оборудования на компрессорных станциях в программном комплексе «ДИОМАГ», то есть решения задачи дискретного программирования, осуществляется с помощью набора специальных логических алгоритмов. После каждого изменения схемы включения оборудования проводится решение задачи выбора значений непрерывных аргументов (параметров).

Обеспечение сходимости решения систем трансцендентных уравнений ГТС. Как следует из предыдущего, плохая обусловленность системы уравнений вида (2.1), (2.4) вызвана не только разнотипными длинами элементарных линейных участков, но и введением в систему уравнений функций с большими коэффициентами усиления с целью обеспечения и перераспределения расходов газа по цехам. Поэтому применение для решения (2.1), (2.4) классического многомерного метода Ньютона приводит к осложнениям, которые заключаются в том, что области сходимости являются достаточно узкими. Для обеспечения возможности решения систем типа (2.1), (2.4) для ГТС многомерным методом с квадратичной скоростью сходимости в комплексе «ДИОМАГ» используются несколько способов. Некоторые способы увеличения области сходимости метода Ньютона изложены в [11], [12].

Способ [11] является развитием известного метода, который состоит во введении управляемого по величине коэффициента h , который регулирует величину шага приращений переменных в методе Ньютона. Величина коэффициента h выбирается с учетом свойств зависимости нормы невязок на каждом шаге итерационного процесса от величины приращения, то есть от этого же коэффициента h .

Способ [5] заключается в применении блочного метода решения системы уравнений (4.1), при этом автоматически происходит разбиение решаемой системы на две (или более) подсистемы путем выделения по величинам невязок уравнений с плохой сходимостью их решения и объединения их в отдельную подсистему. Для этой подсистемы уравнений находятся «хорошие» начальные приближения решений (приближенные решения) многомерным методом сеток, начиная с которых происходит дальнейшее уточнение решений уже методом Ньютона. Квадратичный характер сходимости процесса общего решения систем (2.1), (2.4) обеспечивается применением в блочном методе [12]

специальных формул, которые объединяют подсистемы уравнений через их матрицы Якоби и матрицы связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированные задачи моделирования, идентификации, создания новых технологически допустимых режимов и их оптимизации для сетевых ГТС являются практически обоснованными и корректными, что проверено путем решений этих задач для МГТС больших размерностей (типа «Укртрансгаз» с приграничными ГТС РАО «ГАЗПРОМ») с помощью программного комплекса «ДИОМАГ. Несмотря на сложность решаемых задач показатели программного комплекса при их решении были достаточно высокими и приемлемыми для его применения в качестве советчика диспетчеру МГТС.

Приведенные постановки задач для МГТС и методы их решения являются, по нашему мнению, общими и применимыми (в целом) при идентификации параметров и оптимизации режимов электроэнергетических систем, гидравлических систем водо- и нефтеснабжения.

Литература

1. Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И. Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. Л.: Недра, 1988, 245 с.
2. Константинова И.М., Дубинский В.А., Дубровский В.В., Сиперштейн Б.И., Фридман В.Е. Математическое моделирование технологических объектов магистрального транспорта газа. М.: Недра, 1988, 192 с.
3. Сарданашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП «нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005, 577 с.
4. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. К.: Наукова думка, 1987, 200 с.
5. Агапкин В.М., Борисов С.Н., Кривошеин Б.Л. Справочное руководство по расчетам трубопроводов.—М.: Недра, 1987.-281 с.
6. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы, ч. 1 «Газопроводы» ОНТП 51-1-85. М.; изд. ВНИИГАЗ, 1985, - 193 с.
7. Годлевский В.С., Головченко В.П. Математическая модель трубопроводных участков газотранспортных систем. Электронное моделирование, (в печати).
8. Годлевский В.С., Головченко В.П. Компьютерное планирование, оптимизация режимов сетевых газотранспортных систем. Функціонування та розвиток ринків електроенергії та газу. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці, Наукова-практична конференція, К., 2003 р., с. 34-41.
9. Годлевский В.С. О вычислении функций чувствительности узловых напряжений безынерционных нелинейных схем // В кн. : Электроника и моделирование. – К., Наукова думка, 1975.- Вып. 5. -С. 91-94.
10. Годлевский В.С. Анализ погрешностей расчета установившихся режимов нелинейных схем // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1977. - №6. – С. 61-69.
11. Годлевский В.С. Способ выбора длины шага для метода Ньютона при моделировании существенно нелинейных систем // Электронное моделирование. 1995. – 17, №4. – С.32-36.
12. Годлевский В.С., Годлевский В.В. Блочный гибридный метод решения систем нелинейных конечных уравнений // Электронное моделирование. – 2003. - 25, №6. – С. 99-109.

(В расширенном виде статья опубликована в журнале «Электронное моделирование», №1, 2008)