

---

УДК 622.692:681.3:519.6

**В. С. Годлевский**, д-р техн. Наук

Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины  
(Украина, 03164, Киев, ул Генерала Наумова, 15,  
тел (044) 4247162, E-mail: disit@svitonline.com)

## **Особенности, задачи и методы моделирования стационарных режимов сетевых магистральных газотранспортных систем**

Рассмотрены свойства сетевых магистральных газотранспортных систем, которые определяют задачи и требования к средствам моделирования их стационарных режимов. Сформулированы задачи идентификации параметров оборудования, систем и режимов, планирования и оптимизации режимов в виде общих задач нелинейного программирования. Предложены способы, обеспечивающие уменьшение трудоемкости решения этих задач и увеличение надежности расчетов режимов сетевых систем.

Розглянуто властивості сіткових магістральних газотранспортних систем, які визначають задачі і вимоги до засобів моделювання їхніх стаціонарних режимів. Сформульовано задачі ідентифікації параметрів устаткування, систем і режимів, планування і оптимізації режимів у вигляді загальних задач нелінійного програмування. Запропоновано способи, що забезпечують зменшення трудомісткості розв'язання цих задач і збільшення надійності розрахунків режимів сіткових систем.

*К л ю ч е в ы е с л о в а : оптимизация, идентификация, режимные параметры, компрессорные станции, расход газа.*

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 обуславливают специальные требования к методам и средствам решения задач моделирования и расчетам режимов систем. Наряду со свойствами и особенностями МГТС, описанными в литературе (например, [1—4]), рассмотрим дополнительные свойства, с учетом которых формулируются расчетные задачи и конструируются методы их решения.

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

1) протеканием постоянных во времени и непредсказуемых по интенсивности «старения» технологических объектов МГТС, что приводит к случайным отклонениям их параметров от паспортных данных (например, старение нагнетателей приводит к понижению таких 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 к существенным изменениям их характеристик);

2) 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 объектов из рабочих схем и режимов МГТС;

3) недостаточной оснащенностью объектов МГТС расходомерами, что обусловлено их высокой стоимостью и необходимостью 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).

**Области существования режимов МГТС и ее объектов.** Области существования режимов оборудования компрессорных станций (КС) и газотранспортных систем (ГТС) 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. Основные из них следующие: нестабильность расходов газа потребителями; нестабильность погодных условий при существенной зависимости технологических ограничений оборудования КС от температуры атмосферы; практически постоянно протекающие плановые и аварийные работы на объектах МГТС, требующие изменения режимов всех объектов МГТС.

**Энергоемкость процессов транспорта газа.** Транспорт газа по магистральным газопроводам является достаточно энергоемким процессом вследствие больших расходов его на компримирование на КС. Это негативно влияет на технологические и экономические показатели всей системы газоснабжения, а также на экологическое состояние окружающей среды. В связи с этим возникает необходимость выполнения оптимизационных расчетов режимов МГТС с целью минимизации суммарного расхода технологического газа в МГТС при создании (планировании) их новых режимов, а также обязательного включения в программный комплекс вычислительных блоков, обеспечивающих эти расчеты.

**Взаимозависимость режимов технологических объектов.** Для МГТС характерна взаимозависимость режимов отдельных объектов. Эта зависимость не только не уменьшается, а даже увеличивается с увеличением размерности МГТС. Например, режим КС, расположенной на входе ПО «Мострансгаз» на газопроводе «Уренгой—Ужгород», достаточно существенно зависит от режима и загрузки станций этого газопровода на западной границе Украины. Высокая степень зависимости режимов объектов МГТС от числа КС на трассе обусловлена следующими особенностями МГТС.

Первая особенность обусловлена наличием эффекта увеличения коэффициентов влияния расхода газа потребителем, расположенным в выходном узле МГТС, на величины перекачиваемого газа на КС по мере их удаления от потребителя и приближения к поставщику (к входному узлу). Этот эффект обусловлен влиянием и суммированием расходов технологического газа на каждой КС (на компримирование и собственные нужды) вдоль МГТС. Увеличение коэффициента влияния нелинейно зависит от числа КС и примерно определяется суммой возрастающей геометрической прогрессии, число членов 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, наблюдается нелинейное увеличение вклада каждого потребителя газа в общий расход газа вдоль МГТС по направлению к входному узлу, т. е. чем протяженней МГТС, тем существенней увеличение расхода технологического газа от выхода к входу МГТС. Следовательно, чем протяженней МГТС (протяженность примерно пропорциональна числу КС), тем больше влияние погрешностей информации о расходах газа потребителями на точность результатов расчетов.

Вторая особенность состоит в том, что каждая КС в МГТС представляет собой регулятор давления на ее выходе. Температура газа на выходе КС обычно не поддерживается с высокой точностью (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 вдоль трассы в результате влияния дроссель-эффекта и теплообмена с грунтом. В зависимости от конкретных условий вдоль МГТС также может наблюдаться волна увеличения коэффициента влияния неточного задания температуры на входах КС при расчетах режимов.

Третья особенность заключается 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 резервов для демпфирования изменений своих входных давлений), т. е. вся МГТС входит в аварийный режим.

**Основные задачи моделирования стационарных режимов больших сетевых МГТС.** Описанные выше свойства и особенности режимов и объектов МГТС формируют комплекс задач моделирования этих режимов и требования к вычислительным методам и средствам их решения.

**Идентификация параметров оборудования и режимных параметров.** Неопределенность исходной информации о параметрах рассчитываемых МГТС можно существенно уменьшить, применяя методы статистической обработки измерений штатных датчиков расходов, давлений, температур, оборотов на технологическом оборудовании объектов МГТС и методов математической идентификации неизмеряемых параметров. 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 для нейтрализации влияния нестационарных процессов следует обновлять содержание оперативно-технологической базы данных с периодом, равным приблизительно 0,5 ч (что обусловлено значениями скоростей протекания переходных процессов в магистральных МГТС с типовыми длинами линейных участков). Следует заметить 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 можно использовать следующие: коэффициенты эффективности и теплопередачи линейных участков (ЛУ); изменение запасов газа на ЛУ (например, путем идентификации расходов газа виртуальных потребителей-поставщиков газа на ЛУ, определяющих изменения запаса газа в ЛУ согласно известному квазистационарному методу); коэффициенты понижения приведенных характеристик нагнетателей; коэффициенты характеристик аппаратов воздушного охлаждения (АВО), массовые расходы газа потребителями, у которых отсутствуют расходомеры.

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 выполнять все технологические ограничения на режимные параметры. В качестве режимных параметров обычно принимаются узловые давления и температуры, массовые и объемные расходы и температуры газа по ЛУ и по

нагнетателям КС, обороты приводов и развиваемые мощности нагнетателей, технологические расходы газа на КС и др.

С учетом изложенного представим задачу идентификации в математическом виде:

$$F(X, R, R_0) = 0, \quad (1)$$

$$\Phi_0 \leq \Phi(X, R, R_0) \leq \Phi_1, \quad (2)$$

$$\min_R \sum_{i=1}^n \alpha_i [x_i(R, R_0) - x_{i0}(R, R_0)]^2, \quad (3)$$

где  $F(X, R, R_0) = [f_1(\dots), \dots, f_n(\dots)]^T$  — векторная функция системы режимных уравнений для МГТС (уравнений ЛУ, КС, 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;  $\Phi_0, \Phi_1$  — векторы значений допусков;  $x_i(R, R_0)$  и  $x_{i0}(R, R_0)$  — расчетные и измеренные значения зависимых режимных параметров ГТС;  $\alpha_j$  — весовые положительные коэффициенты, причем  $\alpha_j = 0$ , если зависимый режимный параметр  $x_j(R, R_0)$  не является измеряемым.

В (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 (1) являются значения давления и температуры газа во всех узлах схемы, кроме входных узлов, обороты приводов нагнетателей, массовые расходы по нагнетателям и ЛУ, температуры газа на выходах ЛУ. По этим искомым переменным определяются расходы газа на его компримирование в каждом нагнетателе КС, а также все функциональные параметры оборудования КС, которые входят в технологические ограничения (2).

Постановка задачи идентификации в виде (1) — (3) при определении идентифицируемых параметров дает возможность:

обеспечить строгое выполнение всех уравнений МГТС (в том числе и узловых балансных уравнений);

выполнить все технологические ограничения для объектов МГТС;

вести в множество варьируемых параметров измеряемые давления и температуры во входных узлах МГТС, на выходах КС, измеряемые расходы газа у потребителей путем ввода в систему (2) ограничений для областей допустимых значений, которые формируются с учетом среднеквадратических погрешностей измерений;

принимать весовые коэффициенты в (3), как и в модифицированном методе наименьших квадратов, обратно пропорциональными дисперсиям погрешностей измерений.

Отсюда следует, что постановка задачи идентификации в виде (1) — (3) является более строгой, чем известная [1], в которой учитываются только (3) и отдельные блоки системы (1) для ЛУ МГТС.

**Планирование и оптимизация режимов.** Проанализировав особенности режимов МГТС, приходим к выводу о том, что для обеспечения поиска технологически допустимых режимов расчетный комплекс моделирования режимов МГТС должен содержать в качестве необходимой составной части программный блок параметрической и структурной оптимизации этих режимов. Под структурной оптимизацией понимаем выбор рабочих схем включения оборудования: схем нагнетателей в цехах, схем самих цехов КС, аппаратов воздушного охлаждения, схем включения трубопроводов на ЛУ, кранов, межсистемных перемычек и др.

Блок параметрической и структурной оптимизации необходим прежде всего при планировании новых технологически допустимых режимов МГТС в случае проведения аварийных и штатных плановых ремонтных работ, при создании новых режимов с учетом планируемых изменений расходов газа потребителями, при изменении параметров поставщиков газа (давлений, суммарных расходов газа) с учетом прогнозируемых изменений температуры атмосферы по МГТС. Применение данного блока необходимо также при решении задачи минимизации суммарного по всей МГТС расхода газа на его компримирование. Блок оптимизации должен обеспечивать возможность поиска оптимальных решений как в автоматическом, так и в интерактивном диалоговых режимах. Отсутствие этого блока в программном моделирующем комплексе значительно уменьшает его эффективность, поскольку ручной поиск диспетчером новых планируемых режимов на основе его интуиции даже с помощью быстродействующего программного комплекса 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 следующем виде:

$$F_S(X, R_1, R_{01}, V) = 0, \quad (4)$$

$$\Phi_{OTS} \leq \Phi_{TS}(X, R_1, R_{01}, V) \leq \Phi_{ITS}, \quad (5)$$

$$\min_{V, S} W_T(X, R_1, R_{01}, V, S), \quad (6)$$

где  $S$  — множество параметров, определяющих схемы включения оборудования МГТС;  $\Phi_{TS}(X, R_1, R_{01}, V)$  — вектор режимных и параметрических ограничений для текущего набора значений температур атмосферы на



КС и схемы включения оборудования;  $W_T(X, R_1, R_{01}, V, S)$  — целевая функция, учитывающая множества наборов значений температуры атмосферы на КС и схем включения оборудования;  $V$  — вектор варьируемых параметров (давлений на выходах КС, 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  $V$ .

Система (4), так же, как (1), зависит от текущей схемы включения оборудования. Функция  $S$  описывает множество допустимых рабочих схем включения оборудования МГТС (схем включения нагнетателей и АВО в КС; схем включения цехов и их групп: общий вход — общий выход, общий вход — отдельный выход, отдельный вход — отдельный выход; схем включения линейного оборудования — линейных кранов, межсистемных перемычек и др.).

В состав вектора ограничений (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. Следует заметить, что в ограничения (5) необходимо также вводить неравенства, определяющие запас общей загрузки МГТС, поскольку 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 небольшое увеличение расхода газа, например на выходе лучевой МГТС, и уменьшение давления на выходе КС в начале МГТС вследствие 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, определяющих запас общей загрузки МГТС, можно использовать, например, коэффициенты загрузки МГТС по расходу газа, которые для  $j$ -го выходного граничного узла представим в виде

$$K_{zj} = \frac{Q_j}{\max Q_j}, \quad (7)$$

где  $Q_j$  — текущее расчетное значение массового расхода;  $\max Q_j$  — максимально возможное значение массового расхода, которое определяется решением задачи (5), (6) при использовании в качестве целевой функции расхода газа на  $j$ -м выходном граничном узле МГТС.

На этапе планирования режимов МГТС целевую функцию (6) для упрощения задачи можно не учитывать, при этом планируется (конструи-

руется) с учетом (4) и (5) новый режим, для которого все технологические ограничения должны быть выполнены. На этапе оптимизации режима решается задача (3) — (5). В качестве целевой функции могут быть приняты, в зависимости от технологических, экономических, политических ситуаций, различные функции, например суммарные потери газа на технологические нужды, мера отклонений расчетных давлений в выходных узлах МГТС от заданных значений и др.

**Учет схем приграничных МГТС.** Анализ особенностей свойств МГТС показывает, что для обеспечения необходимой достоверности расчетных данных, их адекватности целесообразно формировать расчетную схему МГТС, включая в нее по возможности кроме рассматриваемой МГТС (например, ГТС производственного объединения) и все граничащие с ней ГТС (производственные объединения). Так, при расчете всей МГТС Украины целесообразно в единую расчетную схему включать кроме МГТС Украины и МГТС приграничных производственных объединений МГТС России и Беларуси, которые являются поставщиками газа для МГТС Украины и МГТС западных стран.

Такой подход к моделированию режимов МГТС наиболее предпочтителен по степени соответствия получаемых результатов реальным и прогнозируемым режимам по сравнению с распространенным подходом, который сводится к применению простейших эквивалентов приграничных МГТС в виде потребителей газа с постоянным расходом и идеальных поставщиков газа. При этом МГТС-поставщики представляются как идеальные источники газа с постоянным давлением и постоянной температурой, значения которых не зависят от величин выходных расходов газа. Однако значения выходных давлений и температур 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) необходимо проводить переключения схем работы оборудования КС, создавать новые режимы в рамках ограничений, которые, в свою очередь, неразрывно связаны с режимами моделируемых МГТС и создание которых требует временных затрат.

При проведении 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.

**Автоматический анализ и результаты расчетов.** Важным показателем эффективности программного комплекса для моделирования, идентификации и планирования режимов больших сетевых МГТС является наличие в комплексе блока автоматического анализа как текущих реальных (базовых) режимов, так и новых режимов, полученных в результате расчетов. В случае отсутствия такого блока ручной анализ диспетчером полученных комплексом расчетных режимов или анализ текущих базовых



режимов является весьма трудоемким, неформализованным и приводит к субъективным результатам. Для автоматической формализованной оценки свойств режимов целесообразно использовать следующие интегральные и локальные показатели режима и отдельных объектов МГТС:

коэффициенты загрузки МГТС по расходам газа для каждого выходного граничного узла (каждого внешнего потребителя) и для внутренних крупных потребителей при заданных схемах работы оборудования КС;

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

коэффициенты загрузки КС, характеризующие их резервы для возможных изменений объемов перекачиваемого газа и уровней давлений (эти коэффициенты можно использовать для ранжирования всех КС с целью выявления «узких мест» рассматриваемых МГТС в базовом или в новом расчетном режиме);

показатели ранжирования КС по коэффициентам понижения приведенных характеристик нагнетателей (по их техническим состояниям);

показатели ранжирования ЛУ МГТС по их коэффициентам эффективности.

В качестве коэффициента загрузки КС по расходам перекачиваемого газа примем согласно (7)  $K_{з.кс j} = \frac{Q_{kj}}{\max Q_{kj}}$ , где  $Q_{kj}$  — текущее расчетное

значение выходного массового расхода  $j$ -й 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 виде таблиц с возможностью просмотра режимных параметров всех технологических объектов расчетной схемы и ее фрагментов.

**Обеспечение скорости, надежности и точности 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 следующими факторами:

задачи идентификации, оптимизации и анализа точности являются многовариантными, требующими многочисленных расчетов систем трансцендентных уравнений, вычисления частных производных, преобразования самих уравнений (поскольку при решении задачи оптимизации режимов, которая формулируется в виде общей задачи нелинейного программирования с непрерывными и дискретными аргументами, приходится изменять состав оборудования и схемы его включения);

размерности полной системы 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 ЛУ с различными длинами отдельных элементарных участков трубопроводов являются причиной плохой обусловленности полной системы уравнений для ГТС и следовательно, причиной плохой сходимости, а в ряде случаев полным отсутствием сходимости при применении метода Ньютона.

Рассмотрим некоторые методы, предназначенные для увеличения скорости и надежности расчетов режимов сетевых ГТС.

***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. Вычисление частных производных по таким параметрам путем численного дифференцирования чрезвычайно трудоемко и практически невыполнимо. Для уменьшения трудоемкости можно использовать численно-аналитический метод вычисления частных производных, значительно более экономичный по сравнению с методом численного дифференцирования и адаптированный для ГТС [5—8].

Суть этого метода заключается в следующем. Поскольку системы уравнений (1), (4), описывающие стационарные режимы ГТС, являются совместными, их можно использовать при решении задачи нелинейного программирования с непрерывными ограничениями не как системы ограничений типа равенств, а как системы неявно заданных функций зависимых параметров режимов ГТС от независимых варьируемых параметров. Это позволяет уменьшить трудоемкость решения задач (1) — (3) и (4) — (6).

Рассмотрим решение задачи (1)—(3). Представим вектор зависимых переменных  $X$  для (1) в виде векторной функции, которая не задана в явном виде и является решением системы (1):

$$X = f(R), \quad (8)$$

где  $f(\dots) = [f_1(R), \dots, f_n(R)]^T$  — векторная функция;  $f_i(R)$  — скалярные функции. Таким образом, задача (1) — (3) сводится к задаче (2), (3), (8), при решении которой (как и при решении (1) — (3)) для уменьшения числа итераций целесообразно использовать методы решения задач нелинейного программирования с применением производных функций в (2), целевой функции (3) и соответственно векторной функции (8) по варьируемым параметрам  $R$ . При этом общая трудоемкость решения задачи (2), (3), (8) практически определяется трудоемкостью вычисления матрицы производных  $\partial X / \partial R$ . К сожалению, определение  $\partial X / \partial R$  матрицы непосредственно из (8) в общем случае не представляется возможным. Однако,

используя метод, описанный в [5, 6], можно представить выражение для  $\partial X / \partial R$  почти в явном виде:

$$\frac{\partial X}{\partial R} = - \left[ \frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial R}, \quad (9)$$

где  $\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial X}$  — матрица Якоби для системы (1);  $\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial R}$  — матрица производных вектора левой части (1) по элементам вектора  $R$ . Зависимость (9) можно получить дифференцированием системы (1) по  $R$ ,

$$\frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial R} + \frac{\partial F(X, R, R_0)}{\partial R} = 0, \quad (10)$$

решив полученную при этом матричную систему 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 (9) можно

вычислить способом аналитического дифференцирования, если это не вызывает затруднений, или методом численного дифференцирования. Следует заметить, что численное дифференцирование функций, заданных в явном виде, характеризуется сравнительно невысокой трудоемкостью. При этом в качестве матрицы Якоби в (10) целесообразно использовать значение матрицы Якоби, полученное на последнем шаге решения системы нелинейных уравнений (1) методом Ньютона, что приводит к дополнительному уменьшению трудоемкости.

Из (10) 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  $\partial F(X, R, R_0) / \partial R$ . Следовательно, для вычисления частных производных от всех зависимых переменных системы уравнений (1) по всем независимым параметрам достаточно провести только одно LU-разложение (прямой ход) для матрицы Якоби системы (1) и затем многократно совершать обратные ходы для вычисления вектора производных  $\partial X / \partial r_i$  по каждому элементу  $r_i$  вектора  $R$ . Такой способ вычисления вектора  $\partial X / \partial R$  наиболее экономичен из всех известных.

На каждом шаге решения задачи нелинейного программирования (2), (3) необходимо знать численные значения вектора (8), для получения которых следует решать систему нелинейных трансцендентных уравнений (1).

Аналогично задача (4) — (6) сводится к решению задачи (5), (6) представлением вектора решения системы уравнений (4) в виде (8),

$$X = f_S(V), \quad (11)$$

и нахождением матрицы производных  $\partial X/\partial V$  для (11) как результата 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» [9]: в блоке идентификации, планирования режимов, оптимизации, может быть использован для определения показателей точности расчетов режимов в рамках линейной теории точности.

Условие применения данного метода для МГТС заключается в необходимости описания процесса транспорта газа по МГТС в виде единой совместной системы уравнений типа (1) и (4). Сложность выполнения этого условия объясняется специфическими свойствами КС, основное из которых состоит в том, что каждая КС представляет собой локальный регулятор давления. Это связано с тем, что на выходе КС при изменении входных давлений и температур, а также объемов прокачиваемого газа необходимо поддерживать заданное давление, регулируя оборотами нагнетателей перераспределение потоков газа по цехам и по отдельным нагнетателям, которые обычно имеют различные характеристики. (Различие характеристик нагнетателей обусловлено их разнотипностью и различными показателями их текущего технического состояния.)

Синтез систем уравнений для КС, цеха которых имеют нагнетатели с различными характеристиками, можно выполнить, используя принцип статического регулирования. При этом управляемыми параметрами оборудования на КС являются обороты нагнетателей и величины расходов газа по ним. Для параметрической идентификации режимов и оборудования ГТС, планирования новых режимов и их оптимизации целесообразно использовать метод решения общей задачи нелинейного программирования с непрерывными аргументами, применяя производные первого порядка целевой функции и ограничений. Для выбора технологически допустимых и квазиоптимальных схем включения оборудования на КС, т. е. для решения задачи дискретного программирования можно применять общие методы или специальные логические алгоритмы.

**Обеспечение сходимости решения систем трансцендентных уравнений ГТС.** Как следует из изложенного выше, плохая обусловленность системы уравнений вида (1), (4) вызвана не только разнотипными длинами элементарных ЛУ, но и введением в систему уравнений функций с большими коэффициентами усиления для обеспечения перераспределения расходов газа по цехам. Поэтому применение для решения (1), (4) классического многомерного метода Ньютона приводит к осложнениям,

которые заключаются в том, что области сходимости являются достаточно узкими. Некоторые способы увеличения области сходимости метода Ньютона при решении систем типа (1), (4) для ГТС многомерным методом с квадратичной скоростью сходимости изложены в [7, 8].

Способ, описанный в работе [7], является развитием известного метода, состоящего 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, т. е. от этого же коэффициента  $h$ .

Способ, изложенный в [10], заключается в применении блочного метода решения системы уравнений (8) и состоит в следующем. Автоматически происходит разбиение решаемой системы на две (или более) подсистемы ранжированием по величинам невязок уравнений с плохой сходимостью решения и объединением их в отдельную подсистему. Для этой подсистемы многомерным методом сеток находят наиболее близкие к точным приближенные решения, которые в дальнейшем используют при решении подсистемы уравнений методом Ньютона. Квадратичный характер сходимости процесса общего решения систем (1), (4) обеспечивается применением в блочном методе [8] специальных формул для связи подсистем уравнений с помощью их матриц Якоби и матриц связей.

**Оценка и обеспечение точности результатов расчетов.** Применение процедур идентификации увеличивает достоверность результатов расчета, их соответствие реальным базовым или прогнозируемым режимным параметрам. С помощью процедур идентификации можно уменьшить многие погрешности задания исходной информации, но нельзя их исключить.

Основными источниками погрешности расчетов режимов являются погрешности задания исходных данных, которые обусловлены следующими причинами: отсутствием достаточного количества измерений режимных параметров для многих объектов ГТС; погрешностями математического моделирования характеристик технологических объектов типа нагнетателей, аппаратов воздушного охлаждения; погрешностями описания процессов транспорта газа по сложным ЛУ (со сложными схемами соединения трубопроводов) применяемыми системами уравнений; влиянием на точность идентификации параметров ЛУ практически постоянно протекающих переходных процессов в МГТС; погрешностями измерений режимных параметров и прогнозирования.

Погрешности измерений давлений и температур на входах и выходах КС, их цехов и нагнетателей, в узлах потребителей и поставщиков, а также 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, используемых при расчетах, т. е. к трансформированию погрешностей измерений в погрешности результатов идентификации. Следует подчеркнуть, что погрешности измерений оказывают достаточно большое влияние на точность идентификации некоторых параметров объектов. Особенно существенно влияют погрешности измерения входных и выходных температур и давлений нагнетателей и их оборотов на точность определения коэффициентов понижения 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. Особенно существенно на точность планирования новых режимов влияют точность прогнозирования расходов газа потребителями и точность прогноза температуры атмосферы на объектах ГТС на рассматриваемый период времени. Это влияние увеличивается при увеличении протяженности моделируемых ГТС. Погрешности задания распределения температур по трассе ГТС при расчетах планируемых режимов менее предсказуемы по сравнению с погрешностями задания остальных параметров, что особенно проявляется на протяженных трассах, на которых объекты находятся в разных часовых и климатических поясах.

Еще одним источником погрешностей расчетов режимов сложных сетевых ГТС являются погрешности 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 при расчетах 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 давления или температуры в результате эквивалентирования следует включать в общую схему ГТС исходную многониточную схему соответствующего ЛУ. В качестве допустимых величин погрешностей эквивалентирования можно,



например, принимать показатели погрешностей измерительных датчиков давлений и температуры.

Следует заметить, что применение распространенных [1, 2] или рекомендуемых в отраслевых нормативных материалах [11, 12] моделей стационарных режимов однопунктных ЛУ для расчетов многопунктных ЛУ приводит к неоднозначным результатам, поскольку уравнения импульсов [1, 2, 10] имеют два решения для расходов при заданных давлениях. Данное обстоятельство приводит к существенным ошибкам в расчетах значений потоков газа по отдельным ниткам ЛУ. Для устранения этих ошибок в [11] выполнена модификация известных уравнений импульса и энергии для однопунктных ЛУ, направленная на устранение многозначных решений.

Для приближенной оценки показателей точности расчетов стационарных режимов МГТС с учетом влияния ряда перечисленных выше источников погрешностей можно, оставаясь в рамках линейной теории точности анализа сложных схем [6], вычислять дисперсии и математические ожидания расчетных значений режимных параметров. Вычисление этих показателей сводится к расчетам частных производных режимных параметров по независимым переменным (по параметрам исходных данных). Выполнение таких расчетов для больших сетевых МГТС вполне реально по трудоемкости, если использовать при этом метод быстрого вычисления частных производных путем многократного решения системы линейных алгебраических уравнений типа (10) со многими векторами свободных членов.

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

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

Properties of mains gas-transport line systems are considered, which determine problems and requirements for modeling facilities of their stationary regimes. The problems of parameter identification for systems, equipment and regimes, regimes planning and optimization are formulated as general problems of nonlinear programming. The methods are proposed to provide solution laboriousness decrease for these problems and reliability increasing for regime designing of mains systems.

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. и др. Математическое моделирование технологических объектов магистрального транспорта газа. — М. : Недра, 1988. — 192 с.
3. Сарданашивили С. А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). — М. : Нефть и газ, 2005. — 577 с.
4. Кулик М. Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. — К. : Наук. думка, 1987. — 200 с.
5. Годлевский В. С. О вычислении функций чувствительности узловых напряжений безынерционных нелинейных схем // Электроника и моделирование. Вып. 5. — К. : Наук. думка, 1975. — С. 91—94.
6. Годлевский В. С. Анализ погрешностей расчета установившихся режимов нелинейных схем // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1977. — № 6. — С. 61—69.
7. Годлевский В. С. Способ выбора длины шага для метода Ньютона при моделировании существенно нелинейных систем // Электрон. моделирование. — 1995. — 17, № 4. — С. 32—36.
8. Годлевский В. С., Годлевский В. В. Блочный гибридный метод решения систем нелинейных конечных уравнений // Электрон. моделирование. — 2003. — 25, № 6. — С. 99—109.
9. 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. — С. 34—41.
10. Агакин В. М., Борисов С. Н., Кривошеин Б. Л. Справочное руководство по расчетам трубопроводов. — М. : Недра, 1987. — 281 с.
11. Годлевский В. С., Головченко В. П. Уравнение стационарных процессов в многониточных линейных участках газотранспортных линейных систем. // Электрон. моделирование. 2007. — 29, № 3. — С. 55—69.
12. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Ч. 1. Газопроводы. ОНТП 51-1-85. — М. : изд. ВНИИГАЗ, 1985. — 193 с.

Поступила 08.02.07;  
после доработки 03.04.07

*ГОДЛЕВСКИЙ Виталий Станиславович, д-р техн. наук, директор МП «ДИСИТ», Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1966 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — вычислительные методы в теории точности и моделирование технических систем.*