

3. XVI Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. докл. Саров, 3–7 октября 2016. С. 46.

4. А.с. № 4412436/24 СССР, МКИ G06 F7/50. Последовательный множитель на константу / Деев Г. Е.; 1989.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

К. И. Дикарев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

На современном этапе развития систем водо- и теплоснабжения и водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий, актуальной является задача обеспечения эффективных режимов их работы с точки зрения затрат электроэнергии, потребляемой насосными станциями на перекачку жидкой среды. Сюда, прежде всего, относятся насосные станции I и II подъема, а также группы насосов теплофикационных установок ТЭЦ.

Ввиду вышесказанного, в настоящее время в практику эксплуатации предприятий водоснабжения и водоотведения постепенно внедряются автоматизированные системы мониторинга и управления водозаборными узлами, позволяющие существенно повысить эффективность их функционирования. Одной из важных функций подобных систем является оперативное расчетное определение режимов работы станционных насосных групп, оптимальных с точки зрения энергозатрат. С целью обеспечения адекватного реагирования системы автоматизированного управления на изменения параметров в управляемых объектах, указанные вычисления должны обладать не только достаточной степенью точности, но и выполняться за короткие промежутки времени. Один из подходов к сокращению времени получения решений сложных задач неизменно связан с привлечением многопроцессорных вычислительных технологий.

В соответствии с требованиями ряда нормативных документов, вновь проектируемые промышленные насосные станции следует укомплектовывать лопастными насосами с регулируемыми приводами [1]. Возможность варьирования рабочих частот вращения для валов лопастных насосов позволяет производить подбор оптимальных и согласованных режимов работы оборудования.

В рамках данной работы алгоритм расчетного определения оптимальных с точки зрения потребляемой мощности гидравлических режимов насосных станций, предложенный в [2, 3], расширен на случай применения многопроцессорной вычислительной среды. Это позволит использовать предлагаемую математическую модель насосной станции в составе автоматизированных систем управления водозаборными узлами, для реализации оптимальных стратегий обеспечения требуемых параметров потока в абонентских водопроводных сетях.

Требование согласования режимных параметров для системы водоснабжения населенного пункта по критерию минимизации суммарных затрат можно сформулировать следующим образом: необходимо при заданных значениях требуемых напоров и расходов у конечных абонентов водопроводной сети определить такие «управления» для насосных агрегатов станции, при которых данные значения будут обеспечены с наименьшими суммарными затратами мощности.

При оптимизации процесса функционирования отдельной насосной станции необходимо учитывать функциональную зависимость, связывающую потребляемую электроприводом каждого насосного агрегата мощность с подачей перекачиваемой жидкой среды при условии, что все прочие параметры, такие как требуемый напор в водопроводах и плотность водной среды, фиксированы.

В настоящей работе, как и в работе [3], указанная нелинейная зависимость аппроксимируется посредством конечного числа кусочно-линейных участков, при этом весь интервал аппроксимации по подаче насосов разбивается на n подинтервалов, с равномерным шагом, и заменой на каждом из данных интервалов исходной зависимости линейной функцией [3]. Будем также считать, что все насосные агрегаты на станции соединены по параллельной схеме.

Множество всех насосных агрегатов разобьем на подмножества, которые будем называть «группами», предполагая, что каждая группа содержит множество насосных агрегатов с близкими характеристиками. Пусть $i = \overline{1, m}$ – номера групп агрегатов насосной станции, $j = \overline{1, n}$ – номера подинтервалов, на которые дискретизированы возможные значения подачи воды для всех групп насосных агрегатов. Обозначим через: m_i^- и m_i^+ , соответственно, минимально возможное и максимально допустимое число насосных агрегатов i -й группы, которые могут быть задействованы, $i = \overline{1, m}$; Q_{ij}^- и Q_{ij}^+ , соответственно, минимально возможный и максимально допустимый объемы подачи воды, которые могут быть обеспечены i -м насосным агрегатом, если его производительность будет соответствовать j -му интервалу, $0 \leq Q_{ij}^- \leq Q_{ij}^+$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$; a_{ij} и b_{ij} – коэффициенты линейной функции, определяющей зависимость потребляемой мощности насосного агрегата i от его подачи при функционировании в рамках подинтервала j допустимых объемов подач, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$; $Q^{\text{вых}}$ – плановый объемный расход воды, которую должна обеспечить насосная станция.

Обозначим через x_i – количество насосных агрегатов i -й группы, которые будут работать на насосной станции в планируемом периоде, $i = \overline{1, m}$; y_i – объем подачи воды, который будет обеспечен насосным агрегатом i -й группы, $i = \overline{1, m}$; $z_{ij} = 1$, если насосный агрегат i -й группы будет работать в j -м интервале допустимых объемов подач, и $z_{ij} = 0$, в противном случае, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Тогда математическая модель насосной станции включает соотношения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m x_i y_i &= Q^{\text{вых}}; \quad m_i^- \leq x_i \leq m_i^+, \quad i = \overline{1, m}; \quad \sum_{j=1}^n z_{ij} Q_{ij}^- \leq y_i \leq \sum_{j=1}^n z_{ij} Q_{ij}^+, \quad i = \overline{1, m}; \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} &= 1, \quad i = \overline{1, m}; \quad x_i - \text{целые}, \quad i = \overline{1, m}; \quad z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ограничения модели включают в себя условия обеспечения требуемого расхода воды на выходе станции согласно графику, ограничения по возможному количеству используемых насосных агрегатов, а также по возможной подаче воды каждым из них, условие существования только одного «рабочего» интервала производительности по объему подачи воды для каждого насоса, естественные условия на переменные.

Критерием оптимизации для рассматриваемой задачи минимизации затрат на функционирование участка системы отопления является функционал:

$$F(\bar{x}, \bar{y}, Z) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a_{ij} y_i + b_{ij}) z_{ij} x_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

то есть суммарная мощность, потребляемая при работе всех насосных агрегатов станции второго подъема должна иметь минимальное значение. Решение поставленной задачи определяет, какие насосные агрегаты и с какими объемами подачи воды должны работать в рамках насосной станции.

Задача является задачей частично-целочисленного математического программирования и относится к классу NP-трудных задач.

Для решения поставленной выше задачи (1)–(2) не существует точных алгоритмов, в общем случае отличных от полного перебора. Можно предложить различные эвристические методы, поз-

воляющие находить их приближенные решения. Показано [2, 3], что для решения подобных задач можно находить точные планы, используя предлагаемую ниже переборную схему решения.

Для нахождения решения, необходимо рассмотреть $n^m \prod_{i=1}^m (m_i^+ - m_i^- + 1)$ задач линейного программирования с номерами $s = 1, 2, \dots, n^m \prod_{i=1}^m (m_i^+ - m_i^- + 1)$, вида:

$$\sum_{i=1}^m k_i y_i = Q^{\text{БЫХ}}, \quad Q_{ij}^- \leq y_i \leq Q_{ij}^+, \quad i = \overline{1, m}. \quad F(\bar{y}) = \left(\sum_{i=1}^m a_{ij_s} y_i + b_{ij_s} \right) k_i \rightarrow \min.$$

Для решения каждой такой задачи достаточно рассмотреть 2^m точек, «подозрительных» на допустимость, для каждой точки проверить ее допустимость (подставив значения координат точки в уравнение неразрывности $\sum_{i=1}^m k_i y_i = Q^{\text{БЫХ}}$), и далее среди допустимых точек найти точку с минимальным значением критерия. Здесь k_1, k_2, \dots, k_m – произвольный допустимый набор, в котором k_i – количество насосных агрегатов i -й группы, которые будут использованы в рассматриваемом периоде функционирования, $i = \overline{1, m}$.

Рассмотрим конкретный пример, параметры которого соответствуют гипотетической проектируемой насосной станции второго подъема, предназначенной для подачи воды в распределительную сеть. С учетом графика суточного водопотребления станция должна обеспечивать в напорном водоводе максимальный расчетный расход воды $1700 \text{ м}^3/\text{ч}$, при расчетном напоре потока $41,6 \text{ м}$. Для функционирования в машинном зале станции предусмотрено 5 насосных агрегатов, при этом три насоса имеют тип Д 500-36, а остальные два насоса – тип Д 320-50 (число типов $m = 2$). Требуется найти такие режимы работы насосов станции, при которых указанные параметры расчетной производительности и напора на выходе станции обеспечивались бы с минимальными затратами мощности.

Для поставленной задачи с применением вышеописанного алгоритма может быть получено следующее оптимальное решение:

- количество работающих насосов типа Д 500-36 равно 3; количество работающих насосов типа Д 320-50 равно 1;
- подача каждого насоса типа Д 500-36 равна $475,54 \text{ м}^3/\text{ч}$; подача каждого насоса типа Д 320-50 составляет $273,39 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- частота вращения рабочих колес насосов Д 500-36 составляет $1008,20 \text{ об/мин.}$, а частота вращения рабочих колес насосов Д 320-50 составляет $1311,30 \text{ об/мин.}$;
- суммарная мощность, потребляемая насосами станции водоснабжения равна $232,23 \text{ кВт}$.

Предлагаемый алгоритм решения задачи сводится к перебору вариантов решений по сокращенной схеме. Вместе с тем, для поставленной выше задачи оптимизации насосной станции с насосами 2-х типов для обеспечения достаточной точности решения (число подинтервалов разбиения зависимости мощности насосных установок от расхода принималось $n = 4700$) требуется перебор $1,06 \cdot 10^9$ вариантов. Для ускорения решения целесообразно прибегнуть к применению параллельной вычислительной среды.

Алгоритм был реализован в виде консольного приложения на языке C++ в среде Visual Studio. Для реализации параллельных вычислений были использованы стандартные функции библиотеки MPI. Блок-схема программного алгоритма для случая двух типов насосов на станции приведена на рис. 1. Ввод исходных данных и характеристик насосов осуществляется в однопроцессорном режиме. Перебор произвольных допустимых наборов насосов и рабочих интервалов зависимостей «Объем подачи насоса – Потребляемая мощность» с выбором оптимального решения осуществляется в многопроцессорном режиме, с равномерным распределением переборных вариантов между процессами. Преимуществом указанного варианта декомпозиции является отсутствие

потребности обменов между процессами во время параллельных вычислений. Обмен с использованием функций `MPI_Send()` и `MPI_Recv()` осуществляется только на последней стадии, при передаче процессу с нулевым рангом оптимальных значений суммарных мощностей, вычисленных по результатам перебора вариантов другими процессами. Процесс с нулевым рангом находит минимальное значение суммарной мощности из конечного множества передаваемых в него значений.

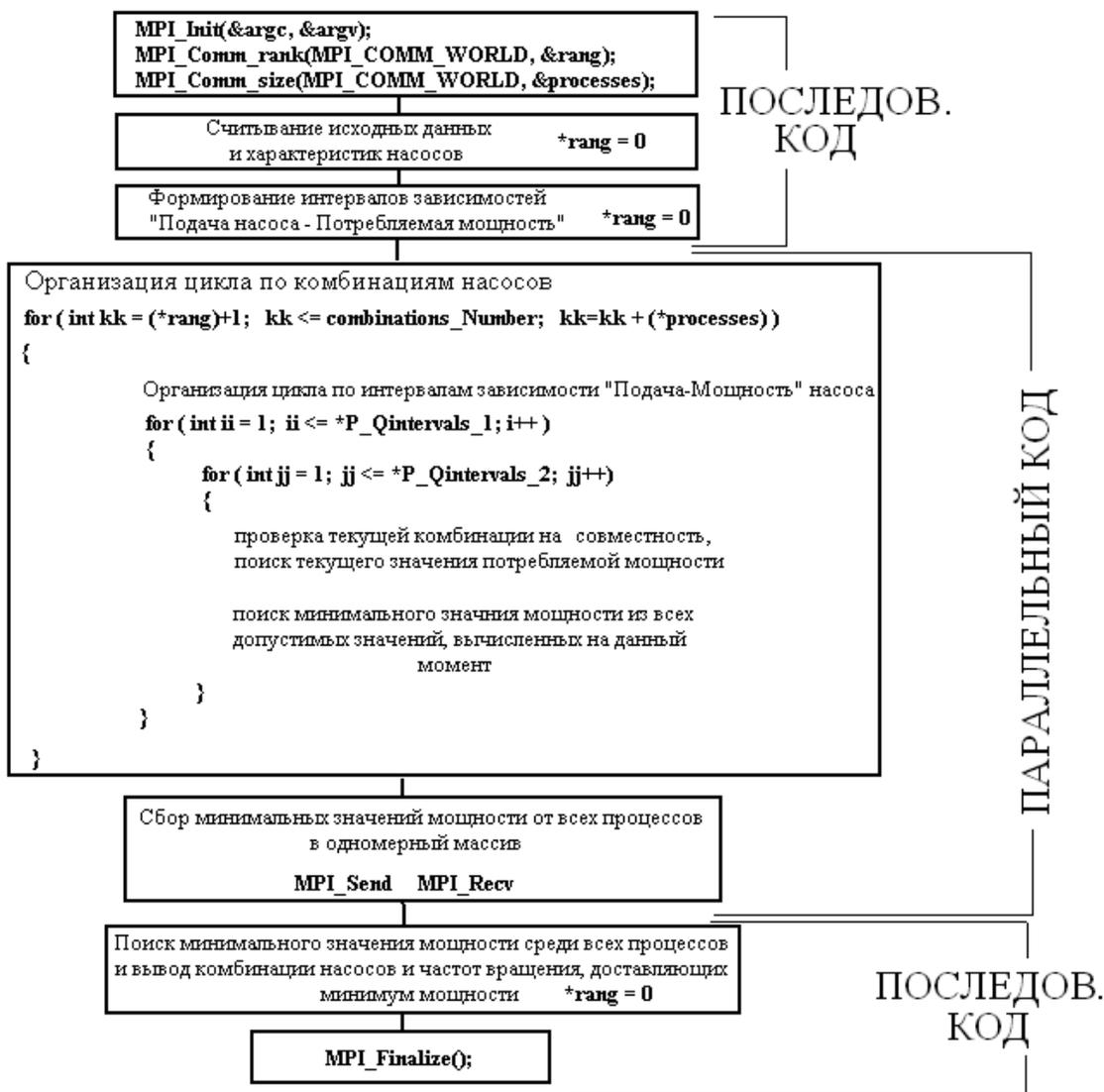


Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска оптимального режима насосной станции

На рис. 2 показана зависимость времени работы алгоритма для решения задачи в приведенной постановке от количества процессов. Апробация, тестирование и оценка производительности выполнялась на ПЭВМ, ОЗУ 8,00 Гб, с 4-ядерным процессором Intel Core(TM) i7-2600K 3,40ГГц. Из указанных результатов видно, что применение параллельного подхода в задачах оптимизации режимов насосных станций существенно увеличивает эффективность вычислений на ЭВМ данного типа. При условиях использования 4-х процессов эффективность алгоритма от использования параллелизма составляет не менее 0,84, а ускорение вычислений достигает показателя 3,4. Полученные результаты согласуются с законом Амдала [4], с учетом того, что доля последовательных вычислений составляет для данной параллельной реализации алгоритма 7–10%. При этом, в соответствии с законом Амдала, для данного алгоритма возможно достижение на кластерных системах ускорения вычислений до 10 раз, без учета межпроцессных обменов.

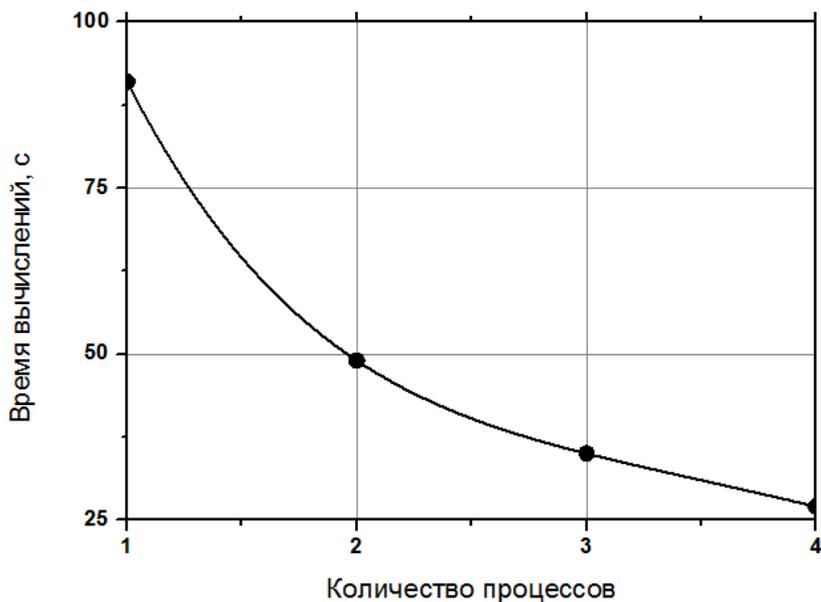


Рис. 2. Зависимость времени поиска оптимального решения от количества процессов

Заключение

В работе описан подход, позволяющий выполнять решение задач поиска оптимальных режимов для насосных станций водоснабжения, на которых функционируют насосные агрегаты, соединенные по параллельной схеме. Предложена параллельная реализация алгоритма решения указанного класса задач с использованием функций библиотеки MPI, и показана эффективность данной реализации.

Литература

1. Методические рекомендации и типовые программы энергетических обследований систем коммунального энергоснабжения. Утв. приказом Госстроя России от 10.06.2003 № 22. Москва, 2005.
2. Прилуцкий М. Х., Дикарев К. И. Распределение ресурсов в иерархических системах с активными элементами // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 5(2). С. 181–189.
3. Костюков В. Е., Прилуцкий М. Х. Распределение ресурсов в иерархических системах. Оптимизационные задачи добычи, транспорта газа и переработки газового конденсата: учеб. пособие. Н. Новгород.: Изд-во Нижегородского университета, 2010.
4. Шпаковский Г. И., Серикова Н. В. Программирование для многопроцессорных систем в стандарте MPI: учеб. пособие. Минск: БГУ, 2002.