

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качан А. Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС. – Минск: Высшая школа, 1985. – 176 с., ил.
2. Шишея П.Н. Исследование теплофикационных паротурбинных установок и разработка методов внутростанционной оптимизации режимов их работы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск: Белорусский политехнический институт, 1980.
3. Шахвердян С.В., Бабаян Д.М. Приложение трехмерного динамического программирования к оптимизации режима ТЭЦ с применением ЦВМ // Теплоэнергетика. – 1969. – № 2. – С. 63–66.
4. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Приложение динамического программирования к оптимизации режимов ТЭЦ на основе декомпозиции исходной структуры станции // Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Матер. докладов X Всеросс. научно-техн. конф. – Томск, 8–10 дек. 2004. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 189–191.
5. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1968. – 458 с.

Поступила 26.09.2008 г.

УДК 621.311.22.002.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ТЭЦ С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

Л.А. Беляев, О.Ю. Ромашова, В.М. Лебедев*

Томский политехнический университет

*Омский государственный университет путей сообщения

E-mail: bel@tpu.ru

На основе теории гидравлических цепей создана математическая модель распределения потока питательной воды по системе подогревателей высокого давления ТЭЦ с поперечными связями. Разработан алгоритм расчета потокораспределения с учетом напорной характеристики параллельно работающих питательных насосов. Предложенная методика пригодна для использования в инженерных расчетах энергетических характеристик турбоагрегатов, а также для выбора состава работающих питательных насосов.

Ключевые слова:

Гидравлическая цепь, напор, питательный насос, потокораспределение, система подогревателей высокого давления, питательная вода, ТЭС с поперечными связями, расход пара.

Анализ и оптимизация режимов работы ТЭЦ, а также расчет прогнозируемых нормативных удельных расходов топлива на период выполняется на базе нормативных энергетических характеристик основного оборудования с учетом поправок на отклонение основных параметров от нормативных.

Для ТЭЦ с поперечными связями значительное искажение конечного результата возможно из-за неучета отклонения расхода питательной воды $G_{ПВД}$ через подогреватели высокого давления (ПВД) отдельных турбоустановок от расхода острого пара D_0 на них [1]. Причины несоответствия $G_{ПВД}$ и D_0 на таких станциях объясняются спецификой их технологического процесса:

- 1) расход питательной воды через группы ПВД отдельных турбин не соответствует расходу острого пара на них и определяется гидравлической характеристикой питательного тракта;
- 2) работающие или находящиеся в горячем резерве редуционно-охладительные установки (РОУ) требуют дополнительного количества питательной воды котлов, распределяющейся по группам ПВД;
- 3) при отпуске тепла потребителю от РОУ острого пара суммарный расход пара на турбоустановки меньше суммарного расхода питательной воды;

- 4) на станциях с несколькими ступенями давления суммарный расход острого пара на турбины нижней ступени может превышать суммарный расход питательной воды через ПВД этих турбин.

Для расчета фактического распределения питательной воды по группам ПВД в конкретных режимах требуется математическое моделирование питательного тракта (ПТ) ТЭЦ. Математическая модель гидравлической схемы ПТ может быть включена в расчет энергетических характеристик турбин и котлов при их компьютерном моделировании либо использоваться при расчете поправок к ним.

Математическое описание питательного тракта

Питательный тракт (ПТ) ТЭЦ, включающий питательные насосы, группы ПВД отдельных турбоагрегатов, котлоагрегаты, обводные линии и регулирующую арматуру, представляет собой сложную гидравлическую систему [2]. Как в любой гидравлической цепи (ГЦ), в ПТ различают три основные составляющие (подсистемы): 1) *источники* давления (питательные насосы) и расхода (уравнивательный коллектор за деаэраторами питательной воды), обеспечивающие притоки транспортируемой среды и привносящие энергию в систему;

2) гидравлическую *сеть* в виде совокупности взаимосвязанных трубопроводов, трубной системы ПВД, поверхностей нагрева паровых котлов, коллекторов питательной воды; 3) *потребители* рабочего тела – паровые котлы. Схема ПТ ТЭЦ с поперечными связями в общем виде приведена на рис. 1, соответствующая ей расчетная гидравлическая схема – на рис. 2, где участки сети, включающие арматуру и другие местные сопротивления, изображены в виде ветвей, места расположения источников расхода (притоков) и потребителей (стоков), а также соединений ветвей – в виде узлов (вершин); источники напора также относятся к ветвям. Обозначим число ветвей равным n , число вершин – m , а количество контуров – c . Схема на рис. 2 имеет $n=18$, $m=13$, $c=6$.

Расчет распределения расхода питательной воды по группам ПВД отдельных турбоустановок относится к задачам потокораспределения [3], которые используют теорию ГЦ. Движение рабочего тела в питательном тракте в установившемся режиме происходит в соответствии с двумя известными в теории ГЦ законами Кирхгофа. Параметрами, характеризующими режим, являются давления в узлах p_i и расходы (потoki) g_i на участках системы.

Математической моделью ПТ являются системы смешанных (линейных и нелинейных) уравнений, которые в матричной форме имеют следующий вид

$$A \cdot G = Q; \tag{1}$$

$$B \cdot Y = 0; \tag{2}$$

$$Y + H = S \cdot G_m \cdot G \tag{3}$$

относительно неизвестных векторов $G=(g_1, g_2, \dots, g_n)$ и $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$, где A – матрица ($n \times n$) соединений ветвей в узлах; G – вектор размера n расходов на участках цепи; Q – вектор размера ($m-1$) притоков (оттоков) среды в узлах; B – матрица ($c \times n$) контуров; Y – вектор размера n потерь давления на ветвях; H – вектор размера n напоров питательных насосов; S – диагональная матрица ($n \times n$) сопротивлений ветвей; G_m – диагональная матрица ($n \times n$) модулей расходов рабочего тела. Компонентами вектора Q являются суммарный расход питательной воды $\Sigma D_{ПВ}$ и расходы острого пара на выходе из котлов $D_{КА}$.

В качестве исходных данных задаются значения векторов Q , H , матрицы S и давление в одном из узлов расчетной схемы P_m .

Первая подсистема (1) математической модели отражает первый закон Кирхгофа, в соответствии с которым для каждого узла сети сумма входящих в него потоков равна сумме выходящих. Вторая подсистема (2) соответствует второму закону Кирхгофа, согласно которому сумма перепадов давлений для всех линейно независимых контуров цепи равна нулю. Выражение (3) представляет замыкающее соотношение для величин, относительно которых сформулированы законы Кирхгофа, и математиче-

ски отражает тот факт, что движение на каждом участке сопровождается потерей энергии

$$y_i = p_i - p_{i+1} = s_i \cdot g_i^2 - H_i.$$

Система уравнений (1)–(3) в теории гидравлических цепей называется контурной системой уравнений. Исходными данными для ее решения являются расход питательной воды $\Sigma D_{ПВ}$, значения расхода острого пара на выходе из котлов $D_{КА}$, матрица сопротивлений S , вектор напоров питательных насосов H .

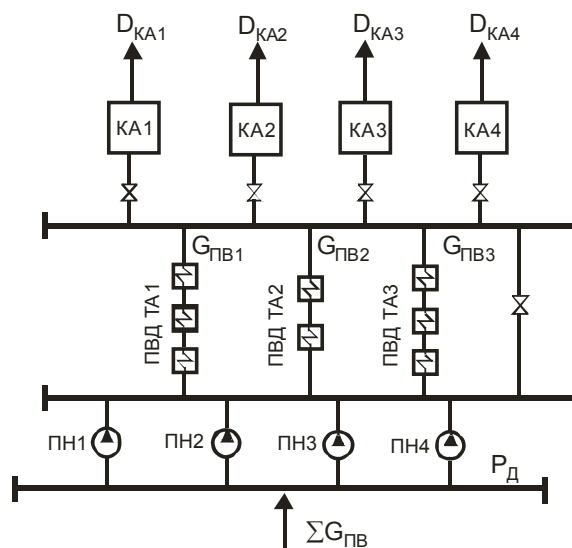
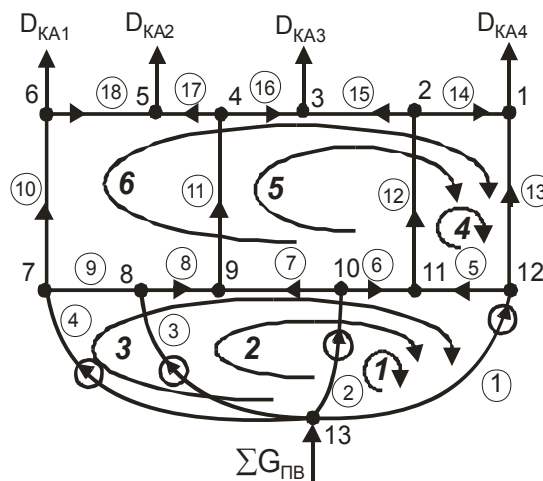


Рис. 1. Принципиальная схема питательного тракта ТЭЦ



① - номер ветви i ; 1 - номер узла j ; ⑥ - номер контура $г$ и направление его обхода

Рис. 2. Расчетная схема гидравлической цепи

Анализ гидравлических схем питательного тракта ТЭС с поперечными связями и их математического описания показывает, что исходная структура распадается, согласно теории графов, на «дерево» и «хорды», что позволяет использовать для описывающей ее системы нелинейных уравнений методы контурных расходов и их «увязочные» варианты.

**Методические особенности расчета
потокораспределения питательной воды**

На базе теории гидравлических цепей составлены и реализованы в виде компьютерных программ матричные модели (1)–(3) ПТ ТЭЦ с начальным давлением p_0 8,8 и 12,8 МПа, соответствующие реальным тепловым схемам действующих электростанций. Технические характеристики ПВД и питательных насосов приняты в соответствии с нормативно-технической документацией станций, гидравлические сопротивления отдельных веток питательного тракта рассчитываются с учетом геометрических характеристик трубопроводов [4] и уточняются в итерационном процессе расчета потокораспределения. Напоры питательных насосов определяются по суммарной характеристике группы параллельно работающих агрегатов с учетом числа включенных в работу машин, при этом гидравлические сопротивления веток, содержащих насосы, принимаются постоянными.

При таком подходе к моделированию адекватность модели в значительной степени зависит от сопротивления напорного коллектора, которое, в свою очередь, определяется режимом работы ТЭЦ. Напорный коллектор является связующим звеном для двух относительно независимых схем ПВД и группы параллельно работающих питательных электронасосов (ПЭН). В режимах полной загрузки к нему переток воды и соответствующее падение давления на большинстве участков коллектора – незначительное. Однако в летних и переходных режимах работы гидравлическое сопротивление отдельных коллекторных звеньев может достигать значений одного порядка с сопротивлением ПВД.

Значение гидравлического сопротивления коллектора незначительно влияет на распределение воды по группам ПВД, но существенно сказывается на расчете давления p_j по тракту.

Для снижения погрешности модели требуется учет изменения напоров питательных насосов от подачи.

С учетом выше отмеченного предлагается методический подход к моделированию гидравлической схемы ПТ ТЭЦ [5]. Для приближенного расчета расходов по группам ПВД можно воспользоваться моделью с сосредоточенными параметрами. В противном случае в расчетной схеме выделяется два контура (контур ПВД и контур ПЭН). Если сопротивлением напорного коллектора $S_k = \sum s_{ki} \cdot g_{ki}^2$ можно пренебречь, контуры рассчитываются последовательно независимо друг от друга, в более общем случае их итерационный расчет увязывается через напорный коллектор.

Этапы моделирования представлены на рис. 3–5, последовательность расчета выглядит следующим образом.

1. Принимается суммарное сопротивление напорного коллектора равным нулю. Для заданного режима работы станции определяется состав

работающих насосов и напор $H_{нар}$ этой группы с учетом их параллельной работы.

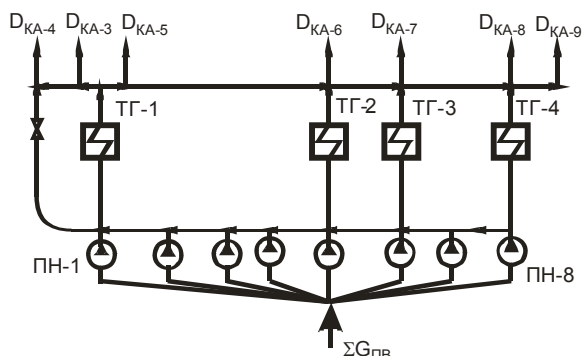


Рис. 3. Принципиальная схема питательного тракта ТЭЦ с поперечными связями

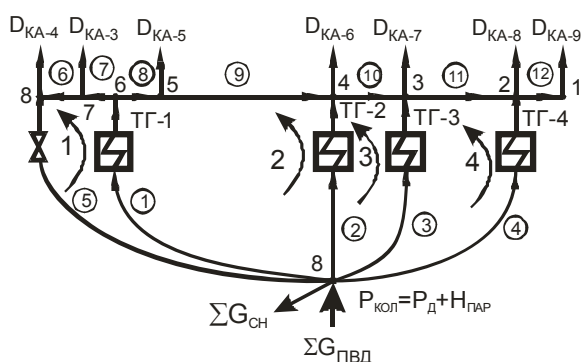


Рис. 4. Расчетная гидравлическая схема упрощенного контура ПВД

2. Составляется матричная модель «упрощенного» контура ПВД (напорный коллектор сосредоточен в одном узле) и для него решается задача потокораспределения. Давление p_m на входе в ПВД в первом приближении оценивается $p_m = p_d + H_{нар}$. Вектор притоков (оттоков) среды Q в узлах этой схемы формируется с учетом заданных значений расхода воды на котлоагрегаты $D_{КАi}$ (оттоки) и суммарного расхода $\Sigma G_{ПВД}$ через группы ПВД $\Sigma G_{ПВД} = G_{ПВ} - G_{СНЭ}$, где $G_{СНЭ} = \Sigma g_i^{СН}$ – суммарный расход питательной воды на собственные нужды, обеспечивающий непрерывную продувку котлов и впрыск в РОУ. Таким образом определяются расходы питательной воды по всем ветвям контура, включая ветви с ПВД $g_j^{ПВД}$.
3. Составляется модель группы параллельно работающих насосов. Она описывает суммарную характеристику и решает задачу приведения характеристик отдельных агрегатов группы к некоторому (произвольно выбранному) узлу напорного коллектора. Оттоки воды из коллектора определяются с учетом найденных выше значений $g_j^{ПВД}$ и известных $g_j^{СН}$. На этом этапе определяются значения давления во всех узлах коллектора, а также подачи и напоры всех работающих насосов.
4. Выполняется расчет потокораспределения для контура ПВД, включающего напорный коллектор. Т. к. число ветвей, узлов и контуров схемы

отличается от этих значений для «упрощенной» схемы, для нее составляется своя математическая модель. За p_m принимается давление в одном из узлов коллектора. Вектор Q учитывает отток служебных потоков с учетом схемы станции. В результате расчета уточняются значения $g_j^{пвд}$.

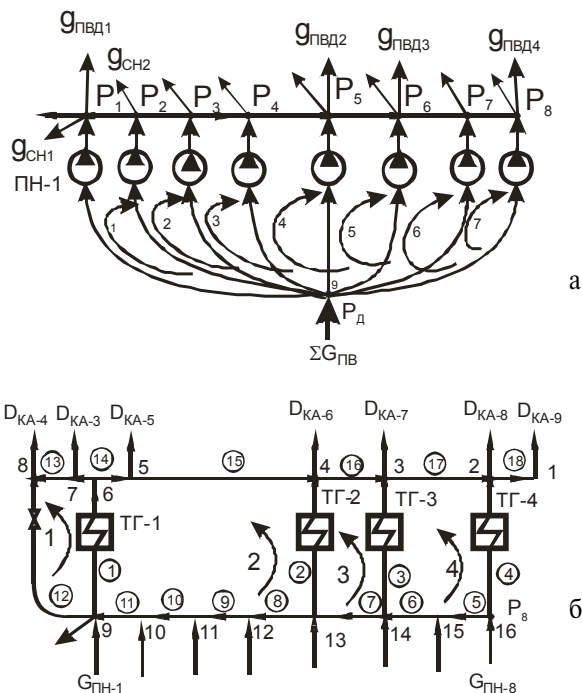


Рис. 5. Расчетная гидравлическая схема контура: а) ПЭН; б) ПВД

5. Расчетный цикл повторяется, начиная с п. 3 с уточненными значениями расхода питательной воды через группы ПВД.

Практические расчеты показывают сходимость итерационного процесса. Погрешность определения расходов и напоров не превышает 2...3 %.

Численное моделирование характеристики параллельно работающих насосов

Учет фактических характеристик насосов требует выделить вопрос моделирования группы параллельно работающих питательных насосов в отдельную самостоятельную задачу в составе общей задачи потокораспределения питательной воды на ТЭЦ.

Группа параллельно работающих насосов и напорный коллектор образуют сложный контур. Движение рабочего тела в таком контуре в установившемся режиме происходит в соответствии с двумя известными в теории ГЦ законами Кирхгофа – система уравнений (1)–(3). Кроме того, работа каждого насоса описывается его напорной характеристикой $h(g)$ и зависимостями мощности и КПД от подачи.

Математическая модель гидравлической схемы насосной установки дополняется зависимостями

$$H = H(G); \tag{4}$$

$$N = N(G). \tag{5}$$

Уравнение (5) решается самостоятельно после нахождения g_i .

Моделирование ГЦ с учетом уравнения (4) требует специальных, более сложных методов. Один из основных подходов в задачах потокораспределения теплоснабжающих систем заключается в том, что цепь с распределенными параметрами многократно рассчитывается как цепь с сосредоточенными параметрами [6, 7]. При этом на каждой итерации напоры уточняются по значениям расходов, полученным при решении задачи потокораспределения. Однако практические расчеты гидравлической схемы питательного тракта показывают, что предлагаемый итерационный процесс расходится. Причина в том, что для мощных ПЭН даже небольшая погрешность в определении расхода воды по веткам, содержащим насосы, приводит к существенному перекосу напоров.

Предложен алгоритм моделирования гидравлической цепи, включающей параллельно работающие насосы [8]. Он заключается в итерационном расчете последовательности простых контуров, на которые разбивается исходная схема, для каждого из которых помимо выполнения двух законов Кирхгофа однозначно решается задача соответствия подач и напоров насосов. Простой контур включает две ветки с насосами и участок коллектора между ними. Два соседних простых контура имеют общую ветку с насосом, что позволяет принимать выходные параметры одного контура за входные – соседнего. Гидравлический расчет простого контура выполняется на основе совместного решения уравнений системы (1)–(4). Моделирование внешнего контура увязывает общий заданный расход на насосную группу $\Sigma G_{пв}^0$ с суммой подач всех включенных в работу насосов. Это приводит к двойным циклам итераций. Внутренний цикл предназначается для расчета гидравлики простого контура при любом значении подачи одного из насосов g_i .

В качестве исходных данных принимаются: сопротивление всех участков сети, значения выходных потоков из отдельных узлов контура на группы подогревателей высокого давления $g_j^{пвд}$ и собственные нужды станции $g_j^{сч}$. Целью расчета малого контура является определение подачи второго насоса g_2 и неизвестных напоров H_1 и H_2 . Для этого перебираются значения g_2 с некоторым шагом в допустимом диапазоне, с учетом их определяются значения расходов по всем веткам контура, а затем рассчитываются некоторые функции $x(g_2) = \Sigma s_i \cdot g_i^2$ и $y(g_2) = H_1(g_1) - H_2(g_2)$, равенства которых добиваются методом половинного деления. Значения Q_j для каждого узла в отличие от модели с сосредоточенными параметрами не заданы, а определяются в процессе расчета.

Внешний цикл заключается в последовательном расчете малых контуров при заданном расходе на первый насос. В результате определяются подачи на все работающие насосы и суммарный расход питательной воды $\Sigma G_{ПВ}$ на входе в контур. При отличии суммарного расхода $\Sigma G_{ПВ}$ от заданного $\Sigma G_{ПВ}^0$ итерации повторяются при новом значении g_i . Расчет заканчивается при отличии $\Sigma G_{ПВ}$ от $\Sigma G_{ПВ}^0$ на величину наперед заданной погрешности. В итоге определяют подачи g_i , напоры H_i насосов схемы, а также значения давления p_j во всех узлах напорного коллектора. Практические расчеты показывают сходимость метода.

Выводы

1. Показано, что фактическое распределение питательной воды по группам ПВД на ТЭЦ с поперечными связями требует математического моделирования питательного тракта ТЭЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флос С.Л., Желялетдинова В.К. Методика расчета поправок к характеристикам теплофикационных турбоагрегатов на изменение режима работы ПВД // Электрические станции. – 1986. – № 2. – С. 30–34.
2. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 279 с., ил.
3. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Потокораспределение в тракте питательной воды ТЭЦ с поперечными связями // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – № 2. – С. 187–190.
4. Касилов В. Ф. Справочное пособие по гидрогазодинамике для теплоэнергетиков. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 272 с.
5. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Методические особенности расчета потокораспределения питательной воды на ТЭЦ с поперечными связями // Энергетика: Экология, надежность, безо-

2. Создано математическое описание потокораспределения питательной воды по группам ПВД с использованием теории гидравлических цепей.
3. Отмечены методические особенности моделирования питательного тракта, учитывающие режим работы ТЭЦ и состав работающего оборудования.
4. Предложен алгоритм гидравлической модели параллельно работающих питательных насосов с учетом их фактических напорных характеристик.
5. Приведенные методика и математические модели могут быть использованы для расчета поправок к энергетическим характеристикам основного оборудования, а также для выбора оптимального состава питательных насосов на ТЭЦ с поперечными связями.

- пасность: Матер. докладов IX Всеросс. научно-техн. конф. – Томск, ТПУ, 3-5 дек. 2003. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 160–162.
6. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск: Наука, 1987. – 222 с., ил.
 7. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / Под ред. В.Я. Хасилева и А.П. Меренкова. – М.: Энергия, 1978. – 176 с., ил.
 8. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Численное моделирование характеристики группы питательных насосов ТЭЦ // Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Матер. докладов IX Всеросс. научно-техн. конф. – Томск, ТПУ, 3–5 дек. 2003. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 163–165.

Поступила 26.09.2008 г.