

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ТЭС-ЭКСПЕРТ»: ОПЫТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

ЖУКОВ В.П., д-р техн. наук, БАРОЧКИН Е.В., ПОСПЕЛОВ А.А., кандидаты техн. наук,  
АНДРЕЕВ А.А., ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В., аспиранты, БОРИСОВ А.А., инж.

Представлен сравнительный анализ программных комплексов по оптимизации режимов работы ТЭС. Приведено описание основных модулей программного комплекса «ТЭС-Эксперт», предложены примеры решения ряда конкретных эксплуатационных задач.

*Ключевые слова:* программный комплекс, целевая функция оптимизации, удельный расход топлива, тепловая нагрузка.

## «HPS-EXPERT» PROGRAM SYSTEM: HPP EQUIPMENT OPERATING REGIMES OPTIMIZATION EXPERIENCE

BAROCHKIN E.V., Ph.D., POSPELOV A.A., Ph.D., ZHUKOV V.P., Ph.D., ANDREEV A.A., postgraduate,  
LEDUKHOVSKIY G.V., postgraduate, BORISSOV A.A., engineer

This paper is devoted to the comparative analysis of program systems for HPS (heating and power station) operating regime optimization. There is the description of main modules of «HPS-Expert» program system and some examples of a number of particular operating problem solutions.

*Key words:* program system, optimization objective function, fuel rate, heat load.

Сложившиеся в последние годы условия функционирования большинства ТЭС России характеризуются снижением присоединенных тепловых нагрузок и, как следствие, значительным отклонением от проектных режимов работы. В связи с этим актуальной становится задача режимной оптимизации основного и вспомогательного оборудования электростанций в широком диапазоне нагрузок.

Большинство описанных [1, 2] методов расчета оптимальной загрузки оборудования ТЭС связаны с решением систем нелинейных уравнений большой размерности и, как правило, приводят к значительным вычислительным трудностям.

Применение основных принципов распределения тепловых и электрических нагрузок между теплофикационными турбоагрегатами согласно руководящим документам [3] вызывает значительные затруднения при решении практических задач ввиду отсутствия адаптированных к конкретному составу оборудования ТЭС автоматизированных расчетных программ.

В настоящее время на рынке услуг появилось большое количество программных комплексов по оптимизации загрузки оборудования ТЭС. Анализ показывает, что в большинстве случаев эти программные пакеты имеют ряд общих недостатков:

- отсутствует четкая постановка задач (оперативное ведение или перспективное планирование режима работы ТЭС, расчет технико-экономических показателей работы станции и др.) и, как следствие, недостаточен или избыточен набор исходных данных и рассчитываемых показателей;

- оптимизация режима работы основного оборудования ТЭС проводится без учета ха-

рактеристик вспомогательного оборудования и величин собственных нужд электростанции в тепловой и электрической энергии;

- собственные нужды ТЭС в тепловой энергии принимаются без учета энергетических характеристик оборудования и без сведения материального и теплового балансов;

- состав работающего основного и вспомогательного оборудования в большинстве случаев задается жестко, что снижает эффективность использования программного комплекса при оперативном ведении режима и перспективном планировании;

- не всегда обоснован выбор целевой функции оптимизации, отсутствует возможность варьирования вида целевых функций;

- выбранные программные средства зачастую не соответствуют требуемому быстродействию вычислений, а алгоритмы и методы оптимизации не адаптированы к решаемым задачам; в большинстве случаев отсутствует возможность интеграции оптимизационных программ в пакеты прикладных программ технологических расчетов;

- используемые обозначения и применяемые термины часто не соответствуют требованиям руководящих документов.

С учетом перечисленных недостатков известных программных средств разработан программный комплекс (ПК) «ТЭС-Эксперт», предназначенный для решения следующих задач на тепловых электростанциях:

- оперативного ведения оптимального режима работы электростанции;

- перспективного планирования технико-экономических показателей;

– автоматизированного расчета показателей, входящих в утвержденные энергетические характеристики;

– сведения пароводяного и теплового баланса ТЭС;

– определения фактических и номинальных значений показателей, включенных в Макет 15506 [4].

ПК состоит из ряда модулей:

1. «ТЭС-Эксперт. Схема». Включает расчетные тепловые схемы (балансовую схему станции, схемы внутростанционных теплопроводов внешних потребителей пара и воды, потребителей собственных нужд) с указанием необходимых характеристик оборудования и нагрузок потребителей.

2. «ТЭС-Эксперт. ЭХ». Содержит в электронном виде альбом энергетических характеристик основного и вспомогательного оборудования, разработанных в соответствии с нормативно-техническими документами, автоматизированный расчет включенных в энергетические характеристики показателей.

3. «ТЭС-Эксперт. ПВБ». Служит для проведения расчетов по сведению пароводяного баланса электростанции в соответствии с [5].

4. «ТЭС-Эксперт. ТБ». Обеспечивает сведение теплового баланса ТЭС в соответствии с [4].

5. «ТЭС-Эксперт. Режим» – основной модуль, выполняющий оптимизацию режима работы оборудования ТЭС. В зависимости от решаемой задачи исходными данными для расчета являются: суммарные тепловые нагрузки ТЭС в паре и горячей воде; суммарная электрическая мощность; состав и ограничения по работе основного и вспомогательного оборудования; показатели режима работы общестанционных схем; исходное оперативное состояние оборудования; стоимостные и энергетические характеристики используемых ресурсов.

Целью первого этапа расчета является поиск вариантов состава работающего основного и вспомогательного оборудования, возможных при конкретных диапазонах изменения режимных параметров. Рассчитываются ориентировочные расходы энергии на собственные нужды электростанции.

Целью второго этапа расчета является определение оптимального из найденных состава работающего оборудования и значений показателей режима его работы. Основным критерием оптимизации выбирается минимум суммарного расхода топлива при обеспечении заданного режима работы ТЭС. В качестве альтернативных могут быть использованы такие критерии оптимизации, как максимум выработки электроэнергии на тепловом потреблении, минимум удельных расходов топлива на отпуск тепловой или электрической энергии, минимум электрической мощности, вырабатываемой по

конденсационному циклу, минимальный состав работающего основного оборудования.

При оптимизации учитывается также исходное оперативное состояние оборудования и затраты энергоносителей, связанные с его переводом из одного оперативного состояния в другое.

На заключительном этапе расчета определяются удельные расходы условного топлива на выработку и отпуск тепловой и электрической энергии с уточнением величин собственных нужд.

6. «ТЭС-Эксперт. Макет». Выполняет расчет технико-экономических показателей в соответствии с утвержденным на ТЭС Макетом 15506 [4].

Все перечисленные модули ПК могут работать как автономно, так и в комплексе. Предусмотрена возможность обмена и корректировки данных в ходе расчета.

Модуль ПК «ТЭС-Эксперт. Режим» использовался на ряде ТЭЦ и ГРЭС России для решения следующих конкретных задач:

– определения минимальной электрической мощности ТЭЦ при заданном уровне тепловых нагрузок;

– оптимизации режимов работы основного оборудования при заданных электрической и тепловой мощностях;

– корректировки графиков ремонтов основного оборудования при перспективном планировании работы станции.

Применение ПК позволило снизить удельные расходы условного топлива на отпуск тепловой и электрической энергии для различных ТЭС, соответственно, на 5–40 г у.т./кВт·ч и 2–9 кг у.т./Гкал.

Опыт использования ПК позволил обобщить сведения о режимах работы теплофикационных турбин. Для ряда ТЭЦ определены диапазоны эффективного использования теплофикационных и конденсационных режимов работы турбоустановок, составлены диаграммы оптимальной загрузки станционного оборудования.

Ниже приведены примеры использования ПК «ТЭС-Эксперт».

*А. Разработка диаграммы оптимальной загрузки оборудования, участвующего в отпуске тепловой энергии.* Диаграмма оптимальной загрузки оборудования, участвующего в отпуске тепловой энергии с горячей водой, была разработана для ТЭЦ-27 ОАО «Мосэнерго». На ТЭЦ установлены два турбоагрегата ПТ-80/100-130/13, пять пиковых водогрейных котлов КВГМ-180-150. Отпуск тепловой энергии с горячей водой осуществляется от теплофикационных установок турбин, пиковых бойлеров, а также от пиковых водогрейных котлов. Отпуск тепловой энергии с паром не производится.

Оптимизация в данном случае проводится по критерию максимума выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Целевая функция

представляет собой отношение суммарной вырабатываемой электрической мощности к тепловой мощности потока острого пара.

Проведенные расчеты позволили определить диапазоны оптимального использования теплофикационных и конденсационных режимов работы турбоагрегатов. Были получены зависимости целевой функции оптимизации  $F_{ц}$  от тепловой нагрузки ТЭЦ в горячей воде (рис. 1).

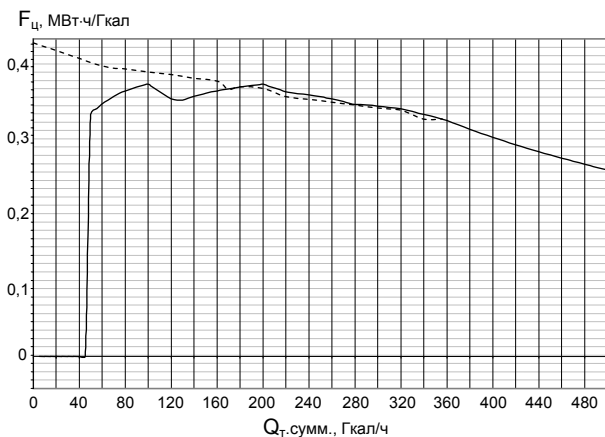


Рис. 1. Зависимость целевой функции оптимизации от тепловой нагрузки ТЭЦ в горячей воде:  $F_{ц}$  – значение целевой функции оптимизации, МВт·ч/Гкал;  $Q_{т.сумм.}$  – тепловая нагрузка ТЭЦ в горячей воде, Гкал/ч; — — — — — максимальные значения  $F_{ц}$  при загрузке турбоагрегатов путем увеличения пропуска пара в конденсаторы; — — — — — то же, при вентиляционном пропуске пара в конденсаторы

Анализ режимов работы с вентиляционным пропуском пара в конденсатор показал следующее:

- отпуск теплоты от отборов турбин при тепловой нагрузке ТЭЦ менее 50 Гкал/ч нецелесообразен;
- нагрузка до 125 Гкал/ч может быть обеспечена одной турбиной;
- регулирование отпуска теплоты от отборов турбин осуществляется при тепловой нагрузке ТЭЦ от 50 до 340 Гкал/ч;
- тепловая нагрузка свыше 340 Гкал/ч обеспечивается при неизменном отпуске теплоты от отборов турбин (нагрузка «П»-отборов турбин – по 90 Гкал/ч, нагрузка «Т»-отборов – по 88 Гкал/ч) с регулированием отпуска с помощью пиковых водогрейных котлов;
- максимальные значения производительности «П»-отборов турбин составляют по 90 Гкал/ч для каждой турбины, «Т»-отборов – по 100 Гкал/ч;
- предельное значение электрической мощности каждого из турбоагрегатов имеет место при тепловой нагрузке ТЭЦ, равной 340 Гкал/ч и более, и составляет 87 МВт;
- максимальное значение целевой функции оптимизации 0,3573 МВт·ч/Гкал имеет место при тепловых нагрузках ТЭЦ 100 и 200 Гкал/ч, при этом выработка электроэнергии на тепловом потреблении от регулируемых отборов турбин составляет 637 кВт·ч/Гкал.

Расчет режимов работы с загрузкой ТЭЦ по электрической мощности путем увеличения пропуска пара в конденсаторы турбин показал, что такой режим работы целесообразен для нагрузок ниже 170 Гкал/ч. При больших нагрузках турбины должны быть загружены по теплофикационному графику.

Диаграмма оптимальной загрузки оборудования, участвующего в отпуске тепловой энергии с горячей водой, в зоне теплофикационных режимов с вентиляционным пропуском пара в конденсаторы турбин (рис. 2) – наиболее интересный случай – отражает оптимальные сочетания значений тепловой мощности «Т»- и «П»-отборов турбин, а также пиковых водогрейных котлов для каждого значения тепловой нагрузки ТЭЦ в горячей воде с учетом нагрузки потребителей собственных нужд электростанции. Расчет выполнен при номинальных значениях давлений пара в камерах регулируемых отборов турбин, поэтому распределение тепловых нагрузок между турбоагрегатами и пиковой водогрейной котельной в каждом случае требует внесения поправок, рассчитываемых по текущим показателям режима работы тепловой сети и ТЭЦ в целом.

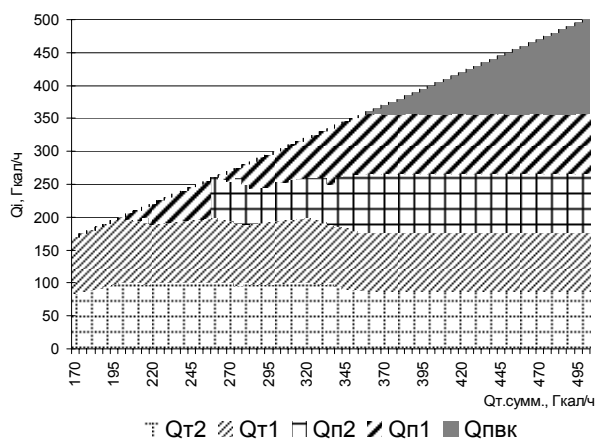


Рис. 2. Диаграмма оптимальной загрузки оборудования, участвующего в отпуске тепловой энергии с горячей водой (зона теплофикационных режимов с вентиляционным пропуском пара в конденсаторы турбин):  $Q_{т1}$ ,  $Q_{т2}$  – тепловые нагрузки «Т»-отборов турбин № 1 и 2, соответственно;  $Q_{п1}$ ,  $Q_{п2}$  – тепловые нагрузки «П»-отборов турбин № 1 и 2, соответственно;  $Q_{пвк}$  – тепловая мощность пиковой водогрейной котельной

Отметим также, что диаграмма не отражает переходного режима, вызванного включением в работу пикового водогрейного котла на минимальную нагрузку.

Расчет показал, что требуемая целесообразная производительность пиковых бойлеров значительно меньше установленной тепловой мощности производственных отборов турбин. Это позволило рекомендовать к установке не два дополнительных подогревателя ПСВ-500-14-23, как предполагалось ранее, а один. Выявлена возможность увеличения максимальной электрической мощности каждого из турбоагрегатов путем перераспределения нагрузки регулируемых отбо-

ров в режиме с вентиляционным пропуском пара в конденсатор до 87 МВт.

**Б. Диапазон изменения удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при заданном уровне тепловых нагрузок ТЭЦ.** Для КТЦ-1 ОАО «Киришская ГРЭС» (турбоагрегаты: два ПТ-50-130/7, два ПТ-60-130/13, Р-40(50)-130/19 и Р-40(50)-130/7) проведены расчеты вариантов распределения тепловой и электрической нагрузки между турбоагрегатами при разных уровнях тепловых нагрузок и получены зависимости удельных расходов топлива от электрической нагрузки при различных значениях тепловых нагрузок (рис. 3). Анализ зависимостей для максимальных и минимальных значений удельного расхода топлива брутто на выработку электроэнергии, соответствующих худшему и лучшему вариантам распределения, показывает, что увеличение суммарной нагрузки производственных и отопительных отборов турбин, во-первых, сужает диапазон возможного изменения электрической мощности электростанции, во-вторых, уменьшает разницу между лучшим и худшим вариантами распределения. При номинальных тепловых нагрузках ТЭЦ выигрыш от оптимизации режима работы турбоагрегатов значительно снижается.

Проведенные расчеты показывают целесообразность использования на электростанции оптимизационных программных комплексов. Следует отметить, что «летние» режимы работы большинства ТЭЦ характеризуются малыми тепловыми нагрузками и, следовательно, высокими резервами по снижению удельных расходов топлива за счет оптимизации.

Барочкин Евгений Витальевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электростанций,  
телефон (4932) 26-99-13,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры тепловых электростанций,  
телефон (4932) 26-99-13,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Жуков Владимир Павлович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45,  
e-mail: mizonov@home.ivanovo.ru

Андреев Андрей Александрович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры тепловых электростанций,  
телефон (4932) 26-99-13,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

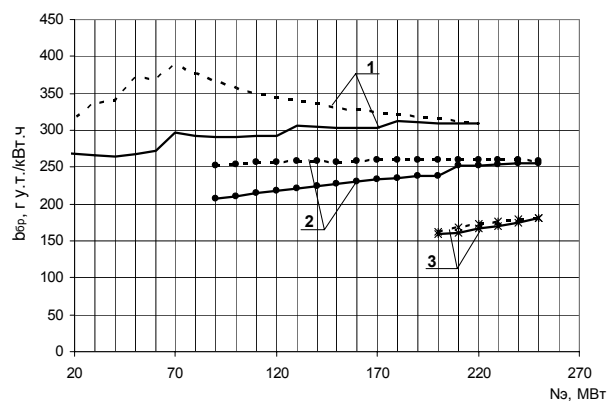


Рис. 3. Зависимость максимального и минимального удельного расхода условного топлива брутто на выработку электроэнергии от электрической мощности при различных тепловых нагрузках:  $Q_{п}$  и  $Q_{т}$  — суммарная нагрузка станции в паре «П»- и «Т»-отборов, Гкал/ч; — и - - - — соответственно минимальное и максимальное значение удельного расхода брутто условного топлива, г у.т./кВт·ч; 1 —  $Q_{п} = 0$ ,  $Q_{т} = 0$ ; 2 —  $Q_{п} = 50$ ,  $Q_{т} = 100$ ; 3 —  $Q_{п} = 150$ ,  $Q_{т} = 250$

#### Список литературы

1. Андрющенко А.И., Аминов Р.З. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. — М.: Высш. шк., 1983.
2. Лапко А.В. Имитационные модели неопределенных систем. — Новосибирск: Наука, 1993.
3. Методические указания по прогнозированию удельных расходов топлива: РД 153-34.0-09.115-98. — М.: АО «Фирма ОРГРЭС», Департамент электрических станций РАО «ЕЭС России», 1999.
4. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: РД 34.08.552-95. — М.: СПО ОРГРЭС, 1995.
5. Руководящими указаниями по сведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: РД.34.09.110. — М.: Госэнергоиздат, 1962.

Поспелов Анатолий Алексеевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электростанций,  
телефон (4932) 26-99-13,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Борисов Антон Александрович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры прикладной математики,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 208,  
телефон (4932) 26-97-45.