

УДК 621.165

*А. И. БАБАЕВ*, аспирант ИПМаш НАНУ, Харьков;

*В. Н. ГОЛОЩАПОВ*, канд. техн. наук, с.н.с.; с.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков

### ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С СОПЛОВЫМ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

В данной статье рассматривается вопрос изменения нагрузки действующих энергоблоков тепловых электростанций, имеющих турбины с сопловым парораспределением, путем применения комбинированной программы регулирования и определение эффективности использования режима скользящего давления в зависимости от различного количества открытых регулирующих клапанов и начальных параметров пара.

**Ключевые слова:** комбинированное регулирование, скользящее давление, парораспределение, регулирование энергоблока, переменный режим.

**Введение.** В настоящее время в регулировании графика энергосистем привлекаются практически все турбоагрегаты тепловых электростанций. Анализ суточных графиков генерирования потребления тепловой и электрической мощности показывает, что на ТЭЦ в ночные часы отопительного периода вынужденная разгрузка может достигать (40–50) % установленной электрической мощности при тепловой нагрузке (80–100) %. Энергоблоки КЭС при прохождении ночных провалов могут разгружаться до (30–40) % установленной мощности. Поэтому поиск оптимальных способов регулирования энергоблоков на частичных нагрузках является достаточно актуальным [1].

В настоящее время широко используется комбинированная программа регулирования (КПР) энергоблоков. При такой программе в области нагрузок близких к номинальной энергоблок работает при постоянном начальном давлении (ПД), а начиная от определенного момента, когда часть регулирующих клапанов (РК) полностью закрыта, переводится на скользящее давление (СД).

**Цель** данной работы состоит в определении оптимального количества открытых регулирующих клапанов (РК) при работе со СД для КПР.

Большинство современных турбоустановок тепловых электростанций большой мощности имеют, как правило, сопловое парораспределение с четырьмя РК, каждый из которых обслуживает отдельный сегмент сопел (см. рис. 1) [2]. Порядок их открытия следующий:

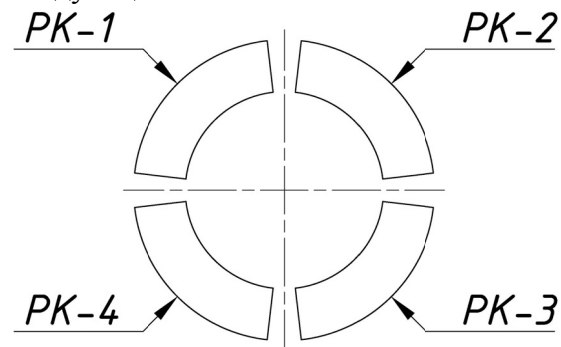


Рис. 1 – Схема подачи пара от РК к сопловым сегментам

– вначале, из условия обеспечения равномерного прогрева ЦВД и повышения вибрационной надежности ротора ВД, параллельно открываются РК-1 и РК-2, обеспечивая около 70 % нагрузки;

– далее открывается РК-3 и при нагрузке близкой к 90 % начинает открываться РК-4.

Исходя из этого, возможны следующие варианты КПР:

1) Разгрузка при СД до минимально возможной при полностью открытых РК.

© А.И. Бабаев, В.Н. Голощاپов, 2015

2) Разгрузка при постоянном давлении с постепенным закрытием РК-4, далее при СД.

3) Разгрузка с постепенным закрытием РК-4 затем РК-3, далее на СД.

При сопоставлении вышеуказанных вариантов необходимо сформулировать основные критерии, характеризующие их эффективность:

– максимальная экономичность энергоблока во всей части эксплуатируемых режимов;

– обеспечение маневренности при резких сбросах и набросах нагрузки;

– обеспечение надежности и долговечности работы турбины вследствие повышения температуры в камере регулирующей ступени (РС) при СД.

– обеспечение возможного диапазона снижения давления в тракте котла.

Подобный анализ был проведен ранее для турбины К-800-240 ЛМЗ [3]. Основные результаты расчета, в которых приведен относительный выигрыш по удельному расходу тепла представлен на рис. 2.

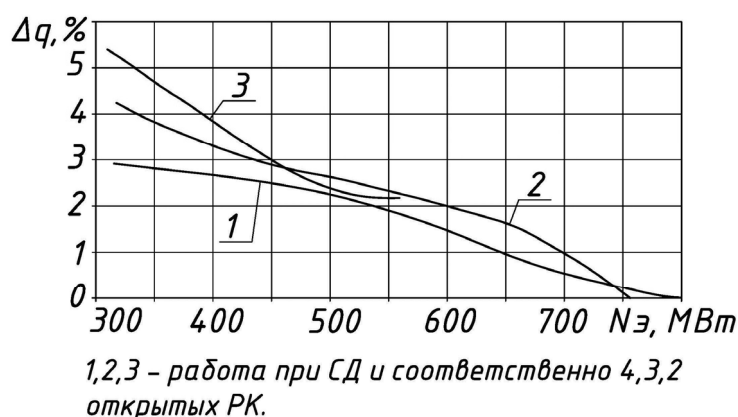


Рис. 2 – Зависимость относительного изменения удельного расхода теплоты при переходе на СД от электрической мощности турбины К-800-240

Из рисунка 2 видно, что все рассматриваемые варианты обеспечивают повышение экономичности в своём интервале работы при СД.

Вариант 1 КПП не имеет запаса по открытию РК, что значительно ухудшает маневренные свойства энергоблока, дает наименьший выигрыш в экономичности и сужает диапазон работы из-за глубокого снижения давления в пароводяном тракте котла. Кроме того, при этом варианте

наблюдается наибольшее повышение температуры в камере РС при работе на СД.

При работе энергоблока с двумя полностью открытыми РК и СД (вариант 3) диапазон более выгодной работы энергоблока начинается с мощности ~530 МВт. При этом, вариант 3 более эффективен, чем варианта 2 начиная с ~460 МВт.

В итоге, наиболее приемлемым для турбины К-800-240 является вариант 2. При скольжении на трех открытых РК обеспечивается относительный выигрыш на большей части эксплуатируемых режимов. Во всем диапазоне работы СД сохраняется возможность перехода к быстрому набору нагрузки при ее сбросе благодаря открытию РК-4 и сохранению допустимой скорости повышения температуры пара в РС.

Для переноса этих результатов на другие турбоустановки необходимо учесть опыт проведения расчетных и экспериментальных исследований, в том числе и работы при СД на сверхкритических параметрах пара с турбиной К-300-240. Расчетные исследования, выполненные в МЭИ для турбины, показали, что применение СД при полностью открытых клапанах и учетом работы питательного насоса в диапазоне режимов выше 200 МВт дает некоторый перерасход тепла, наибольшая величина которого не превышает 0,3 % [4].

Следует отметить, что конструкция паровпуска ЦВД рассматриваемой модификации турбины К-300-240 ОАО «Турбоатом» предполагала 6 РК

обслуживающих 6 сегментов сопел (см. рис. 3). Открытие 4-х РК обеспечивало ~77 % нагрузки, а РК-6 являлся перегрузочным [5].

Экспериментальные исследования турбоагрегата К-300-240 ОАО «Турбоатом» на Трипольской ТЭС с двухкорпусным котлом ТПП-210А при переводе блока в режим СД при полностью открытых 4-х клапанах (переход на СД при ~250 МВт) для двух групп режимов с двумя и одним корпусом котла показали, что снижение удельного расхода условного топлива составляет 2,6 % при нагрузках 150 МВт (двухкорпусной режим работы котла) и 2,3 % при нагрузке 90 МВт (однокорпусной режим работы котла) [6].

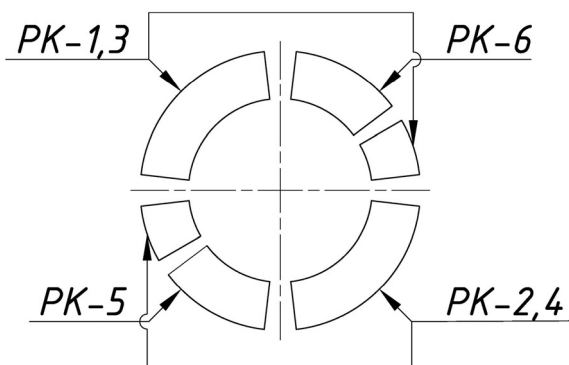


Рис. 3 – Схема подачи пара ЦВД турбины К-300-240 ОАО «Турбоатом»

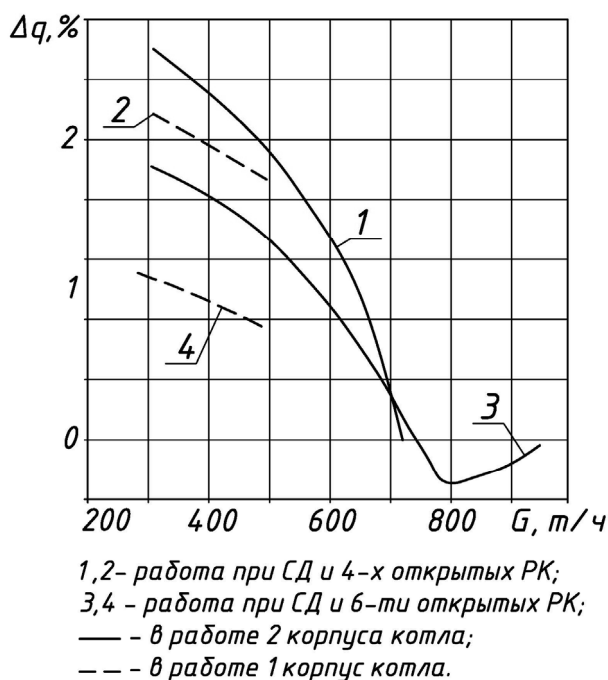


Рис. 4 – Изменение удельного расхода тепла блока 300 МВт при работе на СД с открытыми 4-мя и 6-ю РК

Данные результаты были подтверждены исследованиями ОРГРЭС совместно с ОАО «Турбоатом» для станций Трипольской и Змиевской ТЭС.

В качестве исходных при расчете принимались режимы с расходом свежего пара 960 т/ч (6 полностью открытых РК) и 740 т/ч (4 открытых РК, РК-5 полностью закрыт). Сравнительный анализ работы установки на СД показал (см. рис. 4), что экономически более целесообразно работать с полностью открытыми 4-мя РК. Во всем диапазоне нагрузок ниже 740 т/ч работа на СД выгоднее, чем при ПД, причем выигрыш в экономичности возрастает по мере снижения нагрузки. Так, при расходе свежего пара 670 т/ч, снижение удельного расхода тепла составляет 0,8 % при работе с 4-мя РК и 0,67 % при работе с 6-ю РК. При работе на одном корпусе котла относительное повышение экономичности существенно ниже. При расходе 480 т/ч оно составляет 1,7 % при 4-х открытых РК и 0,8 % при 6-ти открытых РК. На двухкорпусном режиме эти цифры составляют 2,05 % и 1,4 % соответственно. В диапазоне режимов, соответствующих расходу пара 750–960 т/ч наблюдается некоторый перерасход тепла (0,2–0,4) % [7].

Аналогичные исследования были проведены для турбин докритических параметров пара. Исследование экономичности турбины К-160-130 с барабанным котлом ТГМ-94 в режиме

СД с полностью открытыми РК показало уменьшение экономичности в диапазоне режимов 160–90 МВт (по расходу тепла брутто). Начиная с мощности 90 МВт, когда в работе остаются только два РК, применение СД целесообразно [8].

Расчетные исследования для турбин К-200-130 проведенные в МЭИ при работе турбины с полностью открытыми 3-мя РК показали перерасход тепла, который не превышает 0,8 %, во всем сравниваемом диапазоне. При применении гидромурфт ПЭН работа на СД оказывается более экономичной при мощности 90 МВт [4].

Данные расчеты были подтверждены опытами, проведенными на Луганской ТЭС № 8. Было показано, что работа на СД при 3-х открытых РК ведет к ухудшению экономичности в диапазоне нагрузок (50–100) % от 0,4 до 0,9 %. Работа с 4 клапанами дает дополнительный проигрыш [9].

Анализируя результаты исследований можно отметить, что вариант КПр энергоблока, при котором осуществляется переход на СД с полностью открытыми двумя РК, имеет преимущество по сравнению с работой при ПД и сопловом парораспределении для всех рассматриваемых турбоустановок сверх и докритических параметров. Это можно объяснить тем, что современные модификации этих турбин имеют два клапана, открывающихся параллельно, осуществляя по существу дроссельное парораспределение, которое приводит к падению термического КПД цикла при резком уменьшении КПД РС.

Эффективность перехода на работу со СД при полностью открытых трех регулирующих клапанах является не столь очевидной, но более предпочтительной с точки зрения следующих факторов:

- повышение КПД РС;
- уменьшение располагаемого перепада на РС и повышение КПД ЦВД;
- повышение надежности ротора ВД за счет увеличения степени парциальности;
- увеличение диапазона режимов, на которых реализуется выигрыш от применения СД.

Основные факторы, определяющие выбор КПр при оптимальном количестве РК:

1) Начальные параметры пара. Согласно [10] с повышением начальных параметров пара относительный выигрыш от применения СД возрастает.

2) Диапазон режимов при работе двух и трех РК. Чем больше диапазон работы двух первых РК, тем более предпочтительна КПр с двумя открытыми РК.

3) Выбор оптимального  $U/C_0$  РС. Смещение оптимального значения  $U/C_0$  РС в зону номинальных режимов при расширении диапазона работы РК-3 делает предпочтительным КПр при трех полностью открытых РК.

Сравнение диапазонов работы, обеспечиваемых турбоустановками при различном количестве работающих клапанов (см. табл. 1) показывает, что характеристика системы парораспределения турбин К-325-240 и К-800-240 схожи:

Таблица 1.

Относительный расход пара, обеспечиваемый при работе двух и трех РК

Турбина	Относительный расход пара, %	
	2 клапана	3 клапана
К-800-240 ЛМЗ	64	86
К-325-240 ТА	68	88
К-200-130 мод. ТА	78	91
К-160-130 ТА	63	86

С большой вероятностью можно предположить, что РС данных турбин проектировались одинаково по принципу обеспечения максимальной экономичности в

режиме близькому к 0,8. Исходя из этого, на них можно распространить результаты исследований турбины К-800-240.

Модернизации систем парораспределения турбин К-160-130 и К-200-130 несущественно изменили характеристики парораспределения турбин. Результат от применения комбинированной программы регулирования с переходом на СД при 3-х полностью открытых РК будет аналогичен ранее проведенным исследованиям.

Одним из способов повышения экономичности от применения КПП с полностью открытыми тремя РК для турбин до- и сверхкритических параметров пара может быть достигнуто путем проектирования РС с максимальной экономичностью на режиме близкому к номинальному. При этом эффект от применения КПД РС может превысить снижение термического КПД цикла [10]. Изменение внутреннего КПД РС будет иметь следующий вид, представленный на рис. 5.

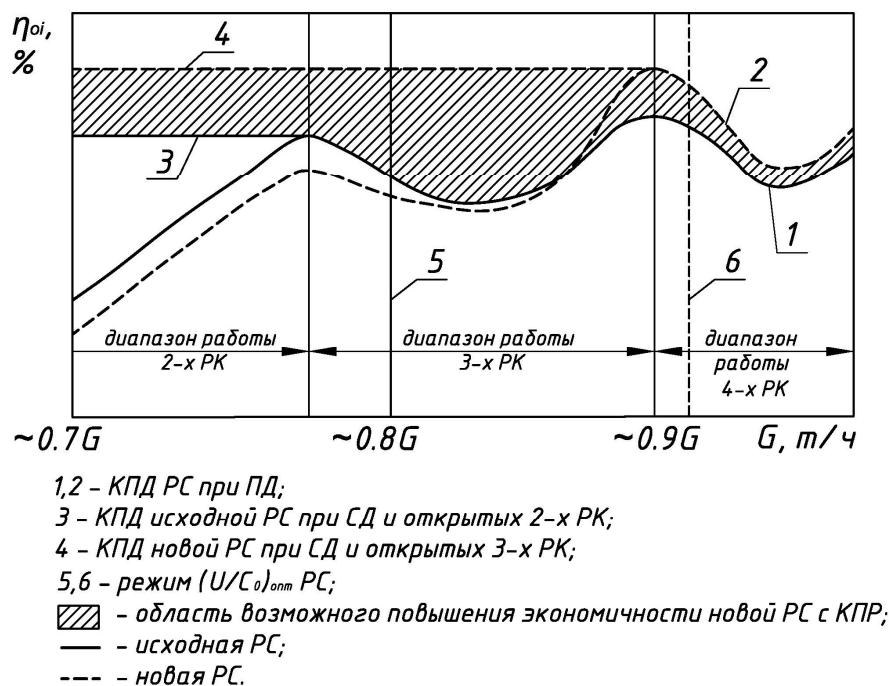


Рис. 5 – Возможное изменение экономичности РС до и после модернизации с переходом на КПП при открытых 3-х РК

Из рис. 5 видно, что экономичность турбоустановки будет иметь большее значение в диапазоне работы четвертого (перегрузочного) клапана, а также во всем рабочем диапазоне, вследствие исключения режимов работы с двумя открытыми РК.

Дополнительными мероприятиями, дающими возможность повысить эффективность КПП с новой РС и переходом на СД при открытых 3-х РК, могут быть:

- открытие РК-3 в диапазоне 0,8–0,85 для обеспечения меньшего падения давления в тракте парового котла;
- при открытии РК-4 дросселирование в трех предыдущих РК должно иметь минимально возможное значение, что обеспечивает более высокий термический КПД цикла во всем последующем диапазоне работы;
- необходимо стремиться к выбору меньшего диаметра РК-4 для более интенсивного увеличения перепада на 4 сегмент при его открытии.

### Выводы

1) Для турбин сверхкритических параметров, имеющих в конструкции парораспределения четыре РК, каждый из которых обслуживает свою группу сопел, наиболее предпочтительным будет КПП с переводом энергоблока в режиме СД при полностью открытых трех клапанах.

2) Для действующих турбин К-200-130 и К-160-130 наиболее эффективна КПП при полностью открытых двух клапанах.

3) Одним из перспективных способов повышения эффективной работы турбоустановки с КПП может быть модернизация РС с реализацией ее наибольшей экономичности в режиме близком к номинальному.

**Список литературы:** 1. Аракелян, Э. К. Проблемы автоматизации разгрузки энергоблоков Т-250 в режиме скользящего давления [Текст] / Э. К. Аракелян, М. А. Панько, В. А. Макарян и др. // Теплоэнергетика. – 2005. – № 10. – С. 55–60. 2. Волчков, В. И. Паровые турбины сверхкритических параметров ЛМЗ [Текст] / В. И. Волчков, С. А. Авраам-Гиршевич, И. А. Ковалев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.: ил. 3. Теплицкий, М. Г. Работа турбины 800 МВт на скользящем давлении [Текст] / М. Г. Теплицкий, А. Г. Прокопенко, В. А. Безлукова // Теплоэнергетика. – 1981. – № 9. – С. 22–26. 4. Гиршфельд, В. Я. К вопросу о регулировании мощности блоков скользящим начальным давлением [Текст] / В. Я. Гиршфельд, Е. Г. Скловская // Теплоэнергетика. – 1966. – № 3 – С. 24–29. 5. Косяк, Ю. Ф. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ [Текст] / Ю. Ф. Косяк. – М. : Энергоиздат, 1982. – 272 с., ил. 6. Гольшев, Л. В. Исследование режимов работы котла ТПП-210А при скользящем давлении среды [Текст] / Л. В. Гольшев, В. Г. Лисовой, В. Л. Белоцерковский // Электрические станции. – 1974. – № 5. – С. 19–22. 7. Теплицкий, М. Г. Экономичность блоков 300 МВт с турбоустановками К-300-240 ХТГЗ на скользящем давлении [Текст] / Г. М. Теплицкий, А. Г. Прокопенко, А. Л. Кочишвили и др. // Теплоэнергетика. – 1974. – № 6. – С. 43–47. 8. Чабан, О. Н. Исследование блока 150 МВт при скользящем и постоянном давлении пара [Текст] / О. Н. Чабан, В. Е. Дмитриев, Б. М. Футорский и др. // Теплоэнергетика. – 1964. – № 10. – С. 24–30. 9. Гиршфельд, В. Я. Экспериментальное сравнение тепловой экономичности блока 200 МВт при работе с постоянным и скользящим давлением [Текст] / В. Я. Гиршфельд, А. М. Князев, Е. Г. Скловская // Теплоэнергетика. – 1967. – № 4. – С. 49–53. 10. Кириллов, И. И. Паровые турбины и паротурбинные установки [Текст] / И. И. Кириллов, В. А. Иванов, А. И. Кириллов. – Л. : Машиностроение, 1978. – 276 с., ил.

**Bibliography (transliterated):** 1. Arakeljan, Je. K., et al. "Problemy avtomatizacii razgruzhenija jenergeblokov T-250 v rezhime skol'zjashhego davlenija." *Teplojenergetika* 10 (2005): 55–60. Print. 2. Volchkov, V. I., et al. *Parovye turbiny sverhkriticheskikh parametrov LMZ*. Moscow : Jenergoatomizdat, 1991. Print. 3. Teplickij, M. G., A. G. Prokopenko and V. A. Bezlukova. "Rabota turbiny 800 MW na skol'zjashhem davlenii." *Teplojenergetika* 9 (1981): 22–26. Print. 4. Girshfel'd, V. Ja., and E. G. Sklovskaja. "K voprosu o regulirovanii moshhnosti blokov skol'zjashhim nachal'nym davleniem." *Teplojenergetika* 3 (1966): 24–29. Print. 5. Kosjak, Ju. F. *Parovaja turbina K-300-240 KTGZ*. Moscow : Jenergoizdat, 1982. Print. 6. Golyshev, L. V., V. G. Lisovoj and V. L. Belocerkovskij. "Issledovanie rezhimov raboty kotla TPP-210A pri skol'zjashhem davlenii sredy." *Jelektricheskie stancii* 5 (1974): 19–22. Print. 7. Teplickij, M. G., et al. "Jekonomichnost' blokov 300 MW s turboustankami K-300-240 KTGZ na skol'zjashhem davlenii." *Teplojenergetika* 6 (1974): 43–47. Print. 8. Chaban, O. N., et al. "Issledovanie bloka 150 MW pri skol'zjashhem i postojannom davlenii para." *Teplojenergetika* 10 (1964): 24–30. Print. 9. Girshfel'd, V. Ja., A. M. Knjazev and E. G. Sklovskaja. "Jeksperimental'noe sravnenie teplovoj jekonomichnosti bloka 200 MW pri rabote s postojannym i skol'zjashhem davlenii." *Teplojenergetika* 4 (1967): 49–53. Print. 10. Kirillov, I. I., V. A. Ivanov and A. I. Kirillov. *Parovye turbiny i paroturbinye ustanovki*. Leningrad : Mashinostroenie, 1978. Print.

Поступила (received) 16.02.2015