ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 11 1973 № 5

УДК 621.313.12:538.4

ТЕПЛОВОЙ ЦИКЛ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАНЕВРЕННОГО ЭНЕРГОБЛОКА С МГДГ И ТГ

В. А. Кириллин, А. Е. Шейндлин, Е. М. Шелков, Е. В. Шишков, С. А. Пашков, В. М. Латышев

Разработана схема МГДГ с возможностью форсированного режима, позволяющая работать в широком диапазоне нагрузок. Для предложенного энергоблока рассчитана зависимость к.п.д. в диапазоне нагрузок 25÷130% $N_{ном}$.

Оптимизация энергетической системы по ее технико-экономическим характеристикам приводит к тому, что основную часть базовой зоны графика нагрузок занимают ТЭЦ и АЭС. МГДЭС, по-видимому, будут вынуждены работать в переменной зоне графика, в значительных пределах регулируя свою мощность. В настоящее время полупиковую зону занимают КЭС, не обладающие достаточной маневренностью. Если условно выделить полупиковую зону, ограничив ее снизу суммарной мощностью ТЭЦ и АЭС, а сверху мощностью чисто пиковых установок, окажется, что отношение минимума и максимума нагрузки этой зоны составит в 2000 году для большинства энергосистем примерно $\bar{N}^{с}_{мин}$=0,20÷0,35. Предполагается, что паротурбинные блоки к тому же времени смогут снижать нагрузку до 0,3—0,4 $N_{ном}$, т. е. $\bar{N}^{бл}_{мин}\geqslant$0,3 [1].

Очевидно, что при $\bar{N}^{с}_{мин}<\bar{N}^{бл}_{мин}$ часть блоков должна останавливаться при прохождении минимума нагрузки. А поскольку паротурбинные блоки требуют значительного времени и соответственно расхода топлива на последующий пуск, то растут полные затраты по системе.

В этой связи представляется перспективным создание маневренного блока, способного проходить минимум суточной нагрузки без останова и имеющего на таких режимах удовлетворительные экономические показатели. Таким блоком, работающим в широком диапазоне нагрузок, мог бы быть энергоблок с МГДГ и турбогенератором, рассчитанный на работу в переменном режиме. При этом МГДГ работает в диапазоне от максимальной мощности до холостого хода (или вообще выключается), а турбогенератор — от номинальной до минимальной.

Маневренность схемы основана на наличии в ней двух «последовательно» включенных генераторов, один из которых (МГД) может быть отключен при снижении нагрузки. Таким образом, технический минимум блока в целом в процентном выражении снижается более чем вдвое при неизменных технических характеристиках паротурбинной части. В этом заключается одно из преимуществ комбинированных МГДЭС, дающее им возможность избежать расходов топлива на пуск.

В известных схемах [2, 3] и патенте [4] рассматривали работу энергоблока с МГДГ и ТГ только для базового режима работы. Для маневренной МГДЭС, предназначенной для работы в широком диапазоне изменения нагрузки, предлагается схема, представленная на рис. 1.

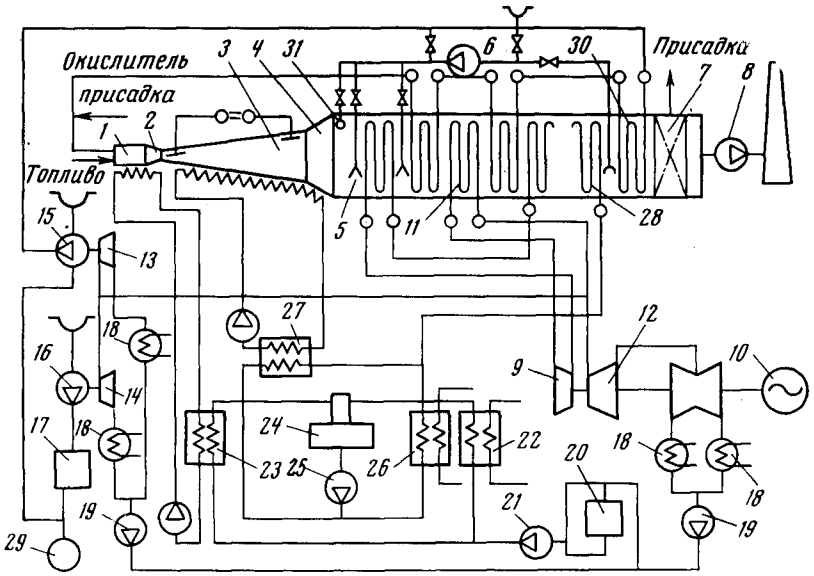

Рис. 1. Схема маневренного энергоблока с МГДГ и ТГ:

1—камера сгорания; *2*—сопло; *3*—канал МГДГ; *4*—диффузор; *5*—парогенератор; *6*—дымосос рециркуляции; *7*—система вывода присадки; *8*—основные дымососы; *9*—ЦВД турбины К-500-240; *10*—турбогенератор; *11*—промежуточный пароперегреватель; *12*—ЦСД турбины К-500-240; *13*—приводная турбина компрессора окислителя; *14*—приводная турбина компрессора блока разделения воздуха; *15*—компрессор окислителя; *16*—компрессор блока разделения воздуха; *17*—блок разделения воздуха; *18*—конденсатор турбины К-500-240; *19*—конденсационные насосы первой ступени; *20*—обессоливающая установка; *21*—конденсационные насосы второй ступени; *22*—регенеративные подогреватели низкого давления; *23*—система теплообменников контура охлаждения камеры сгорания; *24*—деаэратор; *25*—питательные насосы; *26*—регенеративные подогреватели высокого давления; *27* — система теплообменников контура охлаждения канала; *28*—экономайзер; *29*—газгольдер; *30*—рекуперативные подогреватели окислителя; *31*—автономные горелки

Топливом служит природный газ, окислителем в номинальном режиме — обогащенный воздух с содержанием 50% кислорода по весу. Кислород вырабатывается входящей в состав станции воздухоразделительной установкой *17* и может запасаться в газгольдере *29* в часы пониженной нагрузки. С ростом нагрузки запасенный кислород расходуется для повышения обогащения окислителя до 70%.

Канал МГДГ в номинальном режиме работает при перепаде полных температур 3140—2538° К и давлений 13,0—1,31 *ата*. Снимаемая при этом электрическая мощность — 700 *Мвт*, МГДГ рассчитывался на индукцию 5 *тл*. Как показали проведенные расчеты, в пределах точности общепринятых методик расчета МГДГ до- и сверхзвуковые течения вблизи М-1 дают практически совпадающие мощностные характеристики. Поэтому в дальнейшем приводятся данные для дозвукового течения, поскольку его методика расчета разработана лучше и основана на меньшем по сравнению со сверхзвуковой числе допущений.

Требование маневренности электростанции обусловило новый подход к оптимизации течения в канале. Оптимизируется не номинальный режим, а путем анализа работы МГДГ в предполагаемом диапазоне режимов выбирается его конфигурация, в наибольшей степени удовлетворяющая всему этому диапазону. Так, с точки зрения номинального режима оптимальным оказался режим течения с u=850 *м/сек*=idem при соотношении входного и выходного сечений 0,577/4,84 $м^2$. Однако при такой конфигурации увеличение обогащения окислителя до 70% на форсированном режиме требует снижения расхода для того, чтобы избежать запирания канала. Результирующий прирост мощности оказывается равным 4%. Как показал анализ, при увеличении раскрытия последних двух метров канала до отношения сечений 0,577/5,52 $м^2$ мощность генератора в форсиро-

ванном режиме увеличивается на 35%. Мощность же на номинальном режиме снижается при этом только на 2%.

Тепло продуктов сгорания за МГДГ утилизируется прямоточным парогенератором сверхкритических параметров и рекуперативным подогревателем окислителя с подогревом последнего в номинальном режиме до 850° С.

Пар сверхкритических параметров поступает в ЦВД энергетической турбины, идет после него на промперегрев и затем подается на параллельно включенные по пару приводные турбины *13* и *14* компрессоров в системе разделения воздуха и подачи окислителя и на ЦСД и ЦНД энергетической турбины.

Такое соединение турбин по пару представляется более целесообразным, чем наличие в схеме отдельного парового контура низкого давления для приводных турбин или установка их на одном валу с энергетической турбиной. В первом случае понижается энергетическое использование тепла продуктов сгорания и возникает опасность пережога котельных поверхностей при снижении мощности компрессоров в часы снижения мощности МГДГ, во втором — схема получается слишком «жесткой», без возможности регулирования каждого агрегата в отдельности.

Подобное включение со срабатыванием всего острого пара в ЦВД энергетической турбины определяет необычную с точки зрения паротурбинной энергетики компоновку цилиндров турбины. При общей номинальной мощности турбины в 500 *Мвт* ее ЦВД в связи с повышенным расходом пара соответствует ЦВД турбины К-800, а остальные цилиндры — турбине К-300. Близкая по схеме компоновка турбины использовалась в двухвальном варианте К-800-240.

Питательная вода подогревалась в двух параллельных контурах, один из которых представляет собой фактически обычную схему регенерации турбины, а другой использует тепло охлаждения высокотемпературных элементов МГДГ. Частичное вытеснение регенерации повышает к.п.д. паротурбинной части станции, так как при том же расходе тепла возрастает энергетическое использование пара. Обе параллельные ветви, кроме начала и конца подогрева, имеют еще одну общую точку — деаэратор. Такое выполнение системы подогрева позволит четко регулировать температуру питательной воды при изменении степени регенерации турбины, что особенно важно при работе на переменных режимах.

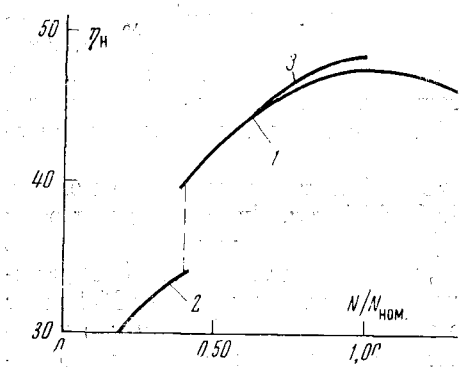

Рис. 2. Зависимость к.п.д. нетто маневренного энергоблока от нагрузки:

1—совместная работа МГДГ и ТГ; *2*—работа ТГ на автономных горелках; *3* — вариант блока с МГДГ и ТГ без форсированного режима

Непосредственно за диффузором МГДГ предусматривается установка автономных горелок, работающих на необогащенном воздухе. Установка горелок связана с тем, что при снижении нагрузки МГДГ до минимальной расход продуктов сгорания через него уменьшается до 0,15 $G_{ном}$. Этого оказывается недостаточно для работы паротурбинной части блока на минимальной нагрузке. При расходе пара через парогенератор в 0,6 $D_{ном}$ расход продуктов сгорания природного газа при сжигании последнего в воздухе должен быть практически равен расходу на номинальном режиме при сжигании в обогащенном окислителе.

Установка автономных горелок делает также менее жесткой связь МГДГ и паротурбинной части, что существенно облегчает регулирование работы последней.

Если считать, что нижний предел мощности паротурбинной части составляет 0,4 номинальной мощности, то весь блок может менять свою мощность от ~20 до 130% своей номинальной мощности.

Продолжительность форсированного режима определяется требованиями системы и накоплением кислорода в газгольдере во время работы станции на минимальных режимах. Вне зависимости от режима работы всей станции воздухоразделительная установка все время работает в номинальном режиме.

Параметры схемы маневренного энергоблока

Параметр	$N = 1{,}3\ N_{ном}$	$N_{ном}$	$N = 0{,}33\ N_{ном}$	$N = 0{,}22\ N_{ном}$
Расход продуктов сгорания, *кг/сек*	440	440	176	320
Концентрация кислорода в окислителе, %	70	50	50	23,15
Температура подогрева окислителя, °С	850	850	850	850
Мощность МГДГ, *Мвт*	915	685 / 696	202	—
Мощность ТГ, *Мвт*	630	500	195	250
Температура в камере сгорания, °К	3235	3140	3000	—
Давление в камере сгорания, *ата*	17,7	12,9 / 13,0	36,46	1,05
Температура за диффузором МГДГ, °К	2640	2400 / 2385	2530	—
Давление за диффузором МГДГ, *ата*	1,05	1,05	1,05	1,05
Мощность компрессора окислителя, *Мвт*	105,6	101,2	32,0	48,0

Примечания: 1. $N = N_{МГДГ} + N_{ТГ}$ 2. В числителе — параметры блока с МГДГ и ТГ с форсированным режимом; в знаменателе — параметры блока с МГДГ и ТГ без форсированного режима.

В таблице представлены основные параметры блока.

Расчеты канала МГДГ выполнены по методике, близкой к [5]: расчеты турбоагрегатов выполнены в конструкторском бюро паровых турбин ЛМЗ; расчеты компрессоров выполнены в соответствии с [6] и рекомендациями [7].

На рис. 2 показано изменение к.п.д. блока в возможном диапазоне изменения его мощности. Верхняя часть кривой соответствует совместной работе МГДГ и паротурбинной части, нижняя — работе только паротурбинной части блока при прохождении минимума нагрузки. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по регулированию МГДГ, изложенными в [8].

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
9 III 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетика, № 12, 1972.
2. С. Вэй. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, № 11, 1971.
3. Мори. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, № 11, 1971.
4. Патент США, № 3. 264.501, класс 310—11.
5. Б. М. Бураханов, С. А. Медин, Б. Я. Шумяцкий. В сб. Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии. «Наука», 1972.
6. К. П. Селезнев, Ю. С. Подобцев, С. А. Анисимов. Теория и расчет турбокомпрессоров. «Машиностроение», Л., 1968.
7. В. Ф. Рис. Энергомашиностроение, № 7, 1971.
8. С. Вей, В. Юнг. Магнитогидродинамическое преобразование энергии. «Мир», 1966.