

УДК 621.165

Влияние типа парораспределения паровых турбин ПГУ на эффективность их эксплуатации

Каранкевич В.В.

Научный руководитель – ст. преподаватель ПАНТЕЛЕЙ Н.В.

Основными особенностями паровых турбин ПГУ являются наличие одной, двух или трёх систем впуска пара, отсутствие системы регенеративного подогрева конденсата и питательной воды и связанный с этим увеличенный расход пара в конденсатор [1]. Изначально ПГУ проектировались для несения базовой нагрузки, однако фактически режимы их эксплуатации оказались отличными от базовых. Залаженные в проекты требования к манёвренности в переменных режимах ПГУ и их паровых турбин скорее соответствуют аналогичным показателям паросиловых энергоблоков, предназначенных для эксплуатации с частыми пусками и остановами.

Одними из наиболее важных характеристик маневренности парогазовых установок являются регулировочный диапазон нагрузок ПГУ, их технологический и технический минимумы нагрузки. Если минимальные нагрузки газовых турбин практически не ограничиваются технологическими условиями (минимальная допускаемая мощность ГТУ составляет 5–8% номинальной), то минимальные нагрузки ПТ ограничены следующими параметрами:

- относительным расширением ротора турбины;
- разностью температур верхней и нижней образующей корпуса ЦВД в зоне паровпуска;
- возможностью работы с подводом пара контура низкого давления;
- влажностью пара за последней ступенью турбины и температурой выхлопа.

Паровым турбинам ПГУ с трехконтурными котлами-утилизаторами и промежуточным перегревом пара свойственно также ограничение по минимальному перепаду давления пара до и после цилиндра высокого давления (ЦВД), когда появляется опасность разогрева последних ступеней ЦВД.

Эффективность эксплуатации паровых турбин ПГУ при нагрузках в пределах регулировочного диапазона зависит от используемого в них типа парораспределения: соплового или дроссельного.

При сопловом парораспределении впуск пара в турбину управляется несколькими регулируемыми клапанами. От каждого клапана пар направляется к самостоятельному сопловому сегменту. Схема подвода пара в регулирующей ступени при сопловом парораспределении показана на рисунке 1. Открытие клапанов производится последовательно. Таким образом, при сопловом парораспределении потери от дросселирования пара при уменьшенном пропуске через турбину относятся не ко всему количеству пара, а только к той его части, которая протекает через частично открытый клапан. Поэтому экономичность турбины с сопловым парораспределением при изменении пропуски пара сохраняется более устойчиво, чем турбины с дроссельным парораспределением.

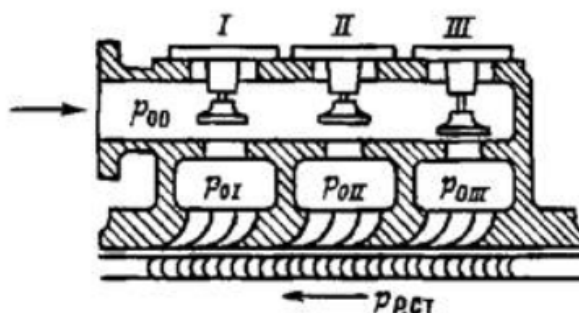


Рисунок 1 – Схема подвода пара к регулирующей ступени при сопловом парораспределении

При дроссельном парораспределении пар в турбину подводится одновременно по всей окружности через один или несколько одновременно открывающихся регулирующих клапанов. Клапан открывается почти полностью только при номинальной нагрузке турбины. В этом случае дросселирование пара в нем практически не происходит и свежий пар поступает к соплам почти с полным давлением. При частичных же нагрузках дроссельный клапан открывается не полностью, вследствие чего пар в нем дросселируется. Чем меньше нагрузка турбины и, следовательно, расход пара через нее, тем больше теряется давление в дроссельном клапане. Однако, дроссельное парораспределение упрощает конструкцию турбины в зоне высоких температур сравнительно с сопловым парораспределением.

Следует отметить, что тип парораспределения паровой турбины оказывает влияние на её надёжность как при стационарных, так и при пусковых режимах. При сопловом парораспределении из-за парциального подвода пара в турбину появляется окружная неравномерность распределения температур корпуса в зоне паровпуска, сохраняющаяся вплоть до взятия паровой турбиной начальной нагрузки [2]. Эта проблема решается использованием двухбайпасных пусковых схем, в которых начальные этапы пусков осуществляются с подачей пара в цилиндр среднего давления (ЦСД) с дроссельным парораспределением, а ЦВД подключается по пару уже после набора начальной мощности генератором ПТ.

Применительно к парогазовым установкам, у которых доля активной мощности, вырабатываемой паровой турбиной, не превышает 30%, снижение экономичности ПГУ при работе на пониженных нагрузках даже при дроссельном парораспределении будет существенно меньшим, чем в паросиловых энергоблоках.

Рассмотрим работу паровой турбины при постоянном начальном давлении в зависимости от вида парораспределения. Поскольку при дросселировании энтальпия пара остается постоянной, то расход пара на турбину определяется давлением за открытыми регулируемыми клапанами.

При снижении расхода давление пара перед ступенями изменяется пропорционально его расходу. Таким образом, при работе с пониженными расходами и при постоянном давлении пара перед турбиной снижается располагаемый теплоперепад проточной части турбины и соответственно её относительный внутренний КПД.

При сопловом парораспределении дросселирование происходит только в частично прикрытых регулирующих клапанах, что приводит к меньшим потерям экономичности.

Недостатком паровой турбины с дроссельным парораспределением при разгрузках с постоянным давлением пара перед ней является снижение температуры пара в проточной части из-за дросселирования в частично прикрытых регулирующих клапанах высокого давления. Вследствие этого наиболее нагруженные толстостенные детали оборудования энергоблока (в особенности ротор ЦВД и пароперепускные трубы от клапанов к турбине) при последующем нагружении испытывают воздействие от изменяющихся температур пара.

Сопловое парораспределение, при использовании постоянного давления пара перед турбиной, имеет некоторое преимущество по сравнению с дроссельным из-за парциального подвода пара и наличия в паровой турбине регулирующей ступени, располагаемый теплоперепад которой, при снижении нагрузки при постоянном давлении пара перед турбиной, увеличивается. Одновременно снижается КПД регулирующей ступени. Таким образом, при разгрузках паровой турбины с сопловым парораспределением её относительный внутренний КПД ($\eta_{oi}^{сопл}$) оказывается несколько большим, чем КПД турбины с дроссельным парораспределением ($\eta_{oi}^{др}$):

$$\frac{\eta_{oi}^{сопл}}{\eta_{oi}^{др}} = \frac{\zeta_{парц}}{\zeta_{др}},$$

где $\zeta_{др}$ – коэффициент дросселирования, зависящий от степени прикрытия регулирующих клапанов;

$\zeta_{парц}$ – потери из-за парциального подвода пара [3].

Регулировочный диапазон нагрузок при поддержании постоянного высокого давления пара перед паровой турбиной ограничен влажностью за последней ступенью турбины.

Рассмотрим работу паровой турбины на скользящем начальном давлении. В этом случае регулирующие клапаны турбины все время полностью открыты, пар не дросселируется и его расход изменяется вследствие изменения давления в котле: чем ниже нагрузка турбины тем меньше должно быть давление пара в котле, а его температура при этом остается постоянной. Работа на скользящих параметрах позволяет уменьшить потери от дросселирования пара в регулирующих клапанах и снизить затраты энергии на привод питательного насоса, так как в этом случае он должен развивать давление, значительно меньшее номинального.

Наиболее эффективными режимами работы паровой турбины ПГУ в пределах регулировочного диапазона являются режимы скользящего или комбинированного давления пара в контурах.

Изменение мощности паровой турбины $\Delta N_{ПТ}$ при разгрузках и скользящем давлении пара высокого и низкого давления можно в первом приближении оценить по соотношению:

$$\Delta N_{ПТ} = \eta_{oi}(G_0\Delta h_0 + G_n\Delta h_n)$$

где G_0 и G_n – расходы пара высокого и низкого давлений;

Δh_0 и Δh_n – располагаемые теплоперепады ЦВД и ЦНД;

η_{oi} – относительный внутренний КПД турбины.

Испытаниями паровых турбин Т-125/150-7,4 энергоблоков ПГУ-450 с дроссельным парораспределением показало, что их мощность при работе на «скользящем» давлении пара высокого давления вблизи нижней границы регулировочного диапазона нагрузок оказывается больше мощности газотурбинных установок на 10–12 МВт при общей мощности энергоблока 300 МВт. Таким образом, если при номинальной нагрузке ПГУ мощность паровой турбины, отнесённая к суммарной мощности энергоблока составляет 31–33%, то при нагрузке энергоблока 300 МВт она составляет 36–42%, что связано с полным открытием регулирующих клапанов ВД при пониженных нагрузках ПТ.

Ограничения минимального давления пара в контурах пара котла-утилизатора связаны с теплогидравлическими разверками в испарителях высокого и низкого давлений, вызывающими ухудшение циркуляции в теплообменных трубах. Использование скользящего давления повышает надежность толстостенных элементов пароводяного тракта котла и ПТ благодаря снижению в них напряжений при изменении нагрузки энергоблока в широких диапазонах. В этом случае, как сопловое, так и дроссельное парораспределение паровой турбины позволяет обеспечить достаточно высокие экономические показатели во всём диапазоне изменения нагрузки паровой турбины и энергоблока в целом.

Известен комбинированный способ регулирования пара в тракте высокого давления, когда при работе энергоблока при нагрузках, близких к номинальным, поддерживается номинальное, а при более низких нагрузках – скользящее давление пара. Такой способ поддержания давления применяется на практике при разгрузках ПТ с сопловым парораспределением [4].

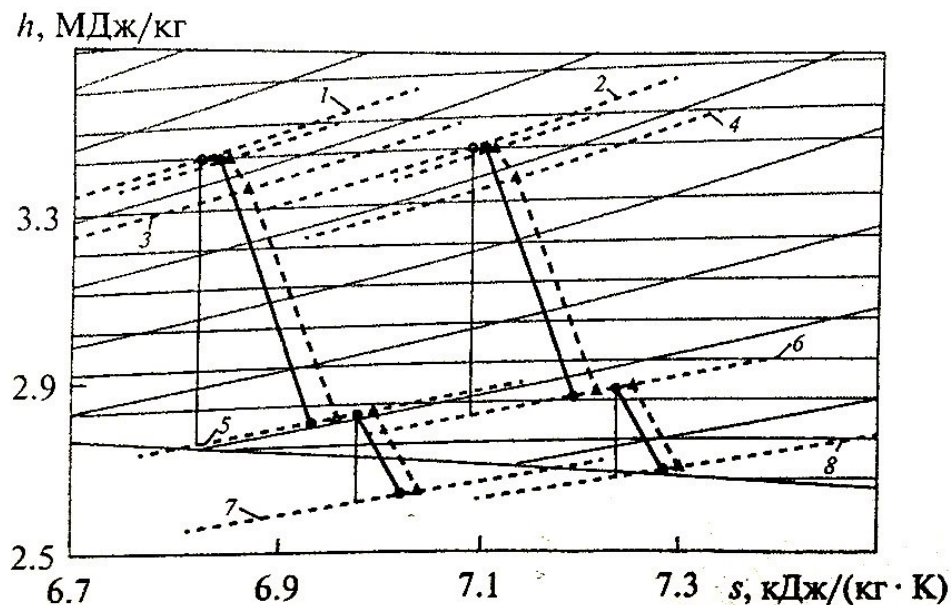
Надёжность оборудования ПГУ при разгрузках зависит от изменения температуры газов за ГТУ и соответственно температуры пара за котлом-утилизатором. Так, при разгрузке ПГУ-450 в широком диапазоне мощностей (до мощности обеих ГТЭ-160 до 85 МВт) температура газов поддерживается постоянной, а при разгрузках энергоблока ПГУ-230 с ГТУ GT13E2 фирмы Alstom температура газов и температура пара ВД повышаются и затем поддерживаются максимальными вплоть до 60%-й мощности ГТУ. Затем эти температуры начинают снижаться вместе с уменьшением мощности.

При разгрузках ПГУ и скользящем давлении в контуре ВД котла напряжения в толстостенных элементах пароводяного тракта снижаются благодаря уменьшению давления пара при его постоянной температуре, а затем после полного прикрытия входного направляющего аппарата – благодаря снижению температуры пара.

Минимальная нагрузка ПГУ зависит от того, какое давление пара поддерживается в контуре низкого давления: при использовании в нём скользящего давления минимальная

достигаемая нагрузка паровой турбины будет ниже, чем при скользящем давлении только в контуре ВД, что связано с полным открытием регулирующих клапанов НД при низких нагрузках паровой турбины.

Преимуществом использования скользящего давления является сохранение приемлемых технико-экономических показателей паровой турбины и энергоблока. Действительно, изменение давления пара перед турбиной из-за снижения расхода топлива в ГТУ при полном открытии регулирующих клапанов не вызывает заметных изменений теплоперепадов ступеней паровой турбины, а располагаемый теплоперепад ПТ также несколько возрастает благодаря увеличению энтальпии на выходе пара ВД в турбину (рис. 2).



Номинальное давление: 1 – пара высокого давления; 3 – в камере регулирующей ступени;

5 – пара низкого давления ; 7 – на выхлопе ЦВД; при нагрузке 50%

номинальной: 2 – пара высокого давления ; 4 – в камере регулирующей ступени;

6 – пара низкого давления; 8 – на выхлопе ЦВД

Рисунок 2 – Процесс расширения пара в паровой турбине Т-125/150-7,4 при её работе на скользящем давлении в зависимости от типа парораспределения

Из этого рисунка видно, что выигрыш от использования того или иного типа парораспределения при работе паровой турбины ПГУ на сниженных нагрузках и скользящем давлении в контуре ВД определяется потерями в регулирующих клапанах и первой ступени, что делает предпочтительной организацию дроссельного парораспределения.

Современные паровые турбины для ПГУ оснащаются, как правило, не более чем четырьмя регулируемыми клапанами ВД (например, у паровой турбины Т-150-7,7 – два таких клапана, у ПТ фирмы Siemens SST-400, SST-600 – три, у SST-900 – один), что при работе турбины в режимах скользящего давления сближает их по экономичности с аналогичными паровыми турбинами с дроссельным парораспределением. Причем организация дроссельного парораспределения действующих паровых турбин (ротора высокого давления с регулирующей ступенью) и снимает проблему перегрузки рабочих лопаток при работе ПТ с одним регулирующим клапаном (например, паровой турбины типа SST-900 RH).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Эксплуатация паровых турбин ПГУ в пределах регулировочного диапазона нагрузок может осуществляться с поддержанием постоянного, скользящего или комбинированного давления пара в контурах котла-утилизатора. При этом минимальная мощность ПГУ достигается при использовании скользящего давления.

2. При разгрузках ПГУ с поддержанием постоянного давления пара ВД минимальная достижимая нагрузка ПТ с сопловым парораспределением меньше, чем с дроссельным.
3. При разгрузках ПГУ со скользящим давлением пара технико-экономическая достижимая нагрузка ПТ с сопловым парораспределением мало отличается от таковой с дроссельным парораспределением.
4. Недостатком соплового парораспределения является неравномерность температур в зоне паровпуска на начальных этапах пусковых режимов из-за частичного открытия регулирующих клапанов.

Литература

1. Радин Ю.А., Симою Л.Л. Особенности создания и эксплуатации паровых турбин для парогазовых установок // Теплоэнергетика. 2010. №9. С. 7–11
2. Радин Ю.А. Освоение первых отечественных бинарных парогазовых установок // Теплоэнергетика. 2006. №7. С.4–13
3. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные режимы в паровых турбинах. М.: Энергоатомиздат, 1982.
4. Паровые турбины сверхкритических параметров ЛМЗ / В.И. Волчков, Л.П. Сафронов, А.Г. Вольфовский, И.А. Ковалёв. М. Энергоатомиздат, 1991.
5. СО-ЦДУ ЕЭС 001-2005. Нормы участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты. 2005.
6. Паровые и газовые турбины для электростанций : учебник для вузов/А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний ; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.