

УДК 621.165+621.438

Маневренные характеристики парогазовых установок утилизационного типа

Барановский И.Н., аспирант

Научный руководитель: Качан С.А., к. т. н., доцент

Применение парогазовых установок (ПГУ) позволяет не только повысить экономичность работы ТЭС Белорусской энергосистемы, но и улучшить ее маневренные характеристики, что является актуальным в связи с существующей неравномерностью графиков электрических нагрузок, а также предстоящим вводом в Беларуси АЭС.

Основными показателями маневренности оборудования являются:

- регулировочный диапазон – диапазон нагрузок, в пределах которого оборудование работает вполне надежно, а разгрузка или нагрузка энергоблока происходит без изменения состава работающего оборудования;
- приемистость – способность к быстрому изменению нагрузки и участию в первичном и вторичном регулировании частоты в системе;
- экономичность оборудования при частичных нагрузках;
- пусковые характеристики.

Хорошо известны высокие маневренные характеристики современных энергетических газотурбинных установок (ГТУ) простого цикла. Время их пуска составляет всего несколько десятков минут, а, например, испытания новой ГТУ фирмы General Electric LMS100 показали возможность набора ею 50% номинальной мощности (которая составляет 98,3 МВт при рекордном КПД простого цикла 45%) менее чем за 1 мин и выхода установки на номинальный режим спустя 10 мин [1].

Добавление в схему котла-утилизатора и паровой турбины существенно изменяет маневренные характеристики парогазовой установки (ПГУ) в целом.

При **пуске** утилизационной ПГУ в соответствии с особенностями применяемой газотурбинной установки (зависимостью температуры газов после газовой турбины от мощности ГТУ и температуры наружного воздуха) выбирается начальная нагрузка ГТУ, которая необходима для прогрева котла-утилизатора и паропроводов, повышения параметров генерируемого пара, подачи этого пара на турбину и увеличения частоты ее вращения до соответствующей моменту включения электрогенератора в сеть.

Анализ графика-задания пуска из холодного состояния энергоблока ПГУ-450 МВт Северо-Западной ТЭЦ (Санкт-Петербург) в составе двух ГТУ V94.2 (ГТЭ-160, Siemens—ЛМЗ) с двухконтурными котлами-утилизаторами, пар высокого и низкого давления от которых подается на общую паровую турбину Т-150-7,7, показывает следующее [2].

Хотя набор ГТУ 1/3 номинальной мощности производится примерно на 15-й минуте от начала пусковых операций, синхронизация паровой турбины начинается только через час после начала пуска ГТУ. Вторая ГТУ в составе дубль-блока начинает вырабатывать мощность спустя почти полтора часа, выход обеих ГТУ на 60% нагрузки происходит спустя два часа, а набор паровой турбиной 30% мощности – спустя 2,5 часа после начала пусковых операций на блоке. Выход дубль-блока в целом на номинальную мощность происходит спустя 3,5 часа, а номинальное давление свежего пара устанавливается спустя более трех часов после начала пуска, который производится при скользящем начальном давлении.

Номинальные значения параметров пара на выходе из контуров высокого/низкого давления ПГУ-450 составляют соответственно 7,85/0,6 МПа и 510/226°С.

Лимитирующими скорость пуска являются допустимые условия прогрева барабанов (скорость нарастания давления в них), выходных коллекторов пароперегревателей, паропроводов и корпусов стопорных клапанов. Поэтому время пуска ПГУ меньшей мощности и спроектированной на более низкие параметры пара сокращается, но все же существенно превышает время пуска ГТУ в автономном режиме.

Из анализа графика-задания пуска энергоблока ПГУ-39 МВт Сочинской ТЭЦ, с моноблоками в составе одной ГТУ GT10C (Siemens, ранее Alstom) номинальной мощностью около 29 МВт с двухконтурным котлом-утилизатором, подающим пар двух давлений на паровую турбину Т-10/11-5,2, видно следующее [2].

Набор ГТУ 25% мощности происходит примерно через 15 минут после начала пусковых операций, но генератор паровой турбины начинает вырабатывать электроэнергию только спустя более 1,5 часов и выходит на номинальную мощность через 2,3 часа после начала пуска ПГУ. Номинальное давление свежего пара в ПГУ, выполненной по моноблочной схеме, устанавливается примерно через полчаса после начала пусковых операций.

Номинальные значения параметров пара на выходе из контуров высокого/низкого давления ПГУ-39 составляют соответственно 5,5/0,62 МПа и 487/212°C.

Отметим, что на Сочинской ТЭЦ отсутствует сторонний источник пара (пусковая котельная) вследствие чего начальные этапы пусковых режимов этой ПГУ несколько затягиваются.

При определении **регулируемого диапазона нагрузок** ПГУ помимо прочих отличительных особенностей этих установок необходимо учитывать существенную зависимость показателей работы ГТУ (ее мощности, расхода и температуры газов за газовой турбиной) от температуры наружного воздуха. Номинальная мощность газотурбинных установок соответствует температуре наружного воздуха $t_{нв} = +15^{\circ}\text{C}$. Мощность ГТУ растет с понижением $t_{нв}$ и снижается с ее увеличением. Указанное приводит к соответствующим изменениям паропроизводительности котла-утилизатора и нагрузки паровой турбины.

На располагаемую мощность энергоблока также оказывают влияние включение в работу при $t_{нв} = -5 \dots +5^{\circ}\text{C}$ антиобледенительного устройства ГТУ и отвод пара на собственные нужды энергоблока и электростанции (например, на испарительную установку и на отопление зданий и сооружений) через редуциционно-охладительную установку собственных нужд (РОУ СН). Первое может привести к снижению мощности на 2...2,5%, а второе – 1...1,5% (для ПГУ-450, в тепловой схеме которой для восполнения потерь пара и конденсата в цикле предусмотрена испарительная установка, а из коллектора собственных нужд производится также отбор пара на подогрев сетевой воды в бойлерах для отопления электростанции в зимний период) [2].

Снижение нагрузки ГТУ осуществляется уменьшением расхода топливного газа.

Для повышения эффективности их использования современные одновальные ГТУ (как V94.2 и ГТУ GT13T2 фирмы Alstom, установленная на Минской ТЭЦ-3) имеют поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора и, часто, нескольких первых его ступеней. Частичное прикрытие ВНА позволяет уменьшать расход воздуха в камеру сгорания ГТУ и поддерживать неизменной температуру газов за газовой турбиной в некотором диапазоне частичных нагрузок.

После полного закрытия ВНА, предусмотренного системой автоматического регулирования ГТУ, дальнейшее снижение нагрузки осуществляется с уменьшением температуры газов на выходе из нее и, соответственно, на входе в котел-утилизатор.

Нагрузка ГТУ GT10C (аналог ГТУ SGT-600, входящей в состав ПГУ Минской ТЭЦ-2), выполненной с выделенной силовой турбиной и работающей при переменной частоте вращения компрессора, регулируется только расходом топлива. При этом

температура газов на выходе из установки уменьшается, но не столь быстро, как у одновальной ГТУ с постоянным положением ВНА.

Снижение надежности работы оборудования ПГУ в пределах регулировочного диапазона нагрузок обусловлено тем, что уменьшение температуры пара контура высокого давления приводит к увеличению конечной влажности в зоне последних ступеней цилиндра низкого давления паровой турбины, и, как следствие, — к повышенному эрозионному износу рабочих лопаток. Для исключения этого явления предусмотрена технологическая защита турбины от недопустимого снижения температуры свежего пара.

С учетом температурного напора на выходе пароперегревателя допустимый уровень температуры газов на входе в котел-утилизатор соответствует нагрузке примерно 60% для газотурбинной установки V94.2 (то есть полному прикрытию ВНА ее компрессора) и немногим более 50% — для GT10С.

Таким образом, суммарная нагрузка энергоблока ПГУ-450 на нижней границе регулировочного диапазона по условию поддержания необходимой температуры пара высокого давления должна составлять не менее 63% при работе с полным составом оборудования (2ГТУ + 2КУ + ПТ) и 32% — с неполным (ГТУ + КУ + ПТ) [2].

Примерно такие же значения соответствуют условию поддержания минимальной концентрации вредных выбросов (оксидов азота) в уходящих газах: 61...63% и 30...32% соответственно [2].

Для энергоблока ПГУ-39 аналогичный минимум нагрузки равен 55...60% (мощность ГТУ немногим более 50%). Если ограничить нагрузку гарантированным выбросом CO (менее 100 ppm), то минимальное значение нагрузки ПГУ-39 возрастет до 70% (мощность ГТУ около 63%) [2].

Нижний предел регулировочного диапазона нагрузок ПГУ-450, который может быть надежно обеспечен при различных температурах наружного воздуха (в летний и зимний периоды) с полным составом работающего оборудования, равен 64 % номинальной мощности. Такая минимальная нагрузка позволит устойчиво эксплуатировать энергоблок ПГУ-450 неограниченное время при соблюдении требований к надежности, экологической чистоте окружающей среды и сохранении высокой экономичности ПГУ-450 [2].

Оценка регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-39 при его работе в конденсационном режиме в зависимости от температуры наружного воздуха показала, что нижняя граница составляет 65 % номинальной [2].

При изменении нагрузки ПГУ в пределах регулировочного диапазона мощность паровой турбины (часто имеющей дроссельное парораспределение) меняется в режиме скользящего начального давления пара. Это приводит к увеличению относительного (на 1 кг газов) расхода пара из котла-утилизатора, что способствует понижению температуры уходящих газов. При этом в случае поддержания постоянной температуры газов на входе в котел-утилизатор (и, следовательно, температуры генерируемого пара) **экономичность работы** паровой турбины и ПГУ в целом на частичных нагрузках достаточно стабильна, не смотря на снижение КПД самой ГТУ. По данным [2] в указанном диапазоне изменения нагрузки ПГУ происходит снижение электрического КПД энергоблоков не более чем на 5...7% (относительных), что при номинальном значении КПД 50% соответствует его снижению до 46,5...47,5%.

Анализ **динамических характеристик** ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга, проведенный в [3], показал, что при поддержании постоянной температуры газов на входе в котел-утилизатор, значения температуры пара высокого и низкого давления меняются незначительно (то есть сохраняется стабильное температурное состояние оборудования: паровой турбины, котла-утилизатора и паропроводов), а расход и давление пара верхнего контура существенно снижаются. По

этой причине при одновременном регулировании мощности обеих ГТУ за счет прикрытия ВНА, возможна максимальная скорость разгрузки/нагрузки паровой турбины (по данным [3] она может достигать 9 – 10 МВт/мин).

После полного прикрытия ВНА скорости изменения температуры и давления пара превышают допустимые для паровой турбины, которая и определяет скорость разгрузки ГТУ и ПГУ в целом.

При этом также нужно учесть, что одинаковое и одновременное снижение мощности обеих ГТУ дубль-блока обеспечивает нормальную эксплуатацию котлоутилизаторов. В то же время при достаточно быстром снижении нагрузки одной из ГТУ возможен выброс пара из испарителей в барабаны высокого и низкого давления вследствие резкого снижения суммарного расхода пара на паровую турбину и, соответственно, снижения давления пара за котлами.

Отметим, что постепенное разгружение и последующий останов одной ГТУ без отключения ее котла-утилизатора от паровой турбины и без открытия пуско-сбросных устройств приводит к понижению температуры пара высокого давления перед паровой турбиной на 30°C, хотя температура пара за разгруженным котлом снижается до 350°C, что объясняется малой величиной относительного расхода пара с низкой температурой. При этом условия работы части низкого давления турбины не ухудшаются, поскольку одновременно давление пара снижается до 5,3 МПа, и процесс расширения на h,s -диаграмме сдвигается вправо.

Для обеспечения надежной работы энергосистемы в нормальных и аварийных условиях энергоустановки должны сохранять устойчивость работы при **сбросах нагрузки** путем перехода на холостой ход или на нагрузку собственных нужд.

По данным [2] в то время как для ПГУ-450 при сбросе нагрузки одной ГТУ наблюдаются глубокие изменения параметров газа за ГТУ и пара обоих контуров (давление пара высокого давления снижается более, чем в два раза), при сбросе нагрузки энергоблока ПГУ-39 — картина обратная. После сброса нагрузки ГТУ остается в работе на холостом ходу, а паровая турбина медленно разгружается со скоростью около 0,33 МВт/мин от текущего значения мощности до примерно 2,5% номинальной. При этом параметры пара за котлами-утилизаторами поддерживаются близкими к номинальным.

Рассмотренные маневренные характеристики энергоблоков ПГУ-450 и ПГУ-39 могут рассматриваться как ориентиры при освоении бинарных парогазовых установок утилизационного типа, вводимых в эксплуатацию в энергосистеме Беларуси, и учитываться при решении вопросов оптимизации их тепловых схем и технологии эксплуатации, с целью не только повышения экономичности, но и улучшения маневренных характеристик таких установок.

Литература

1. Лебедев А.С., Костенников С.В. Тенденции повышения эффективности ГТУ // Теплоэнергетика. – 2008. - № 6. – С. 11 – 18.
2. Радин Ю.А. Освоение первых отечественных бинарных парогазовых установок // Теплоэнергетика. – 2006. - № 7. – С. 4 – 13.
3. Динамические характеристики парогазовой установки ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга / Березинец П.А., Крашениников В.Г., Костюк Р.И., Писковацков И.Н. // Электрические станции. – 2001. - № 7. – С. 5 – 11.