

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ Т-160-7 ПРИ РАБОТЕ ЕЕ В МОТОРНОМ РЕЖИМЕ¹

Аракелян Э.К., Мезин С.В., Косой А.А., Богданова М.П.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, г. Москва ул. Красноказарменная, д.17

edik_arakelyan@inbox.ru

Пашенко Ф.Ф.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65

Pif-70@yandex.ru

Аннотация: Рассматриваются преимущества перевода паровой турбины Т-160-7 теплофикационного энергоблока ПГУ-450Т в моторный режим (МР) при работе ПГУ в режиме ГТУ-ТЭЦ. Для контроля и управления температурным состоянием проточной части турбины предлагается регулировать температуры пара по групповому принципу. Предложена методика составления цифровой модели отсеков паровой турбины. Приведено описание системы управления температурным состоянием первого отсека паровой турбины с использованием разработанной цифровой модели.

Ключевые слова: цифровая модель, регулирование, температурное состояние, проточная часть, паровая турбина, моторный режим.

Введение

Проблемой расширения регулировочного диапазона ПГУ при работе ее в теплофикационном режиме в последние годы занимаются многие организации. Обусловлено это тем, что отечественная энергетика за последние годы развивается преимущественным вводом ПГУ, обладающими явными преимуществами по экономичности и маневренности. Но при эксплуатации современных ПГУ большой мощности в режимах регулирования мощности и на частичных нагрузках был выявлен ряд факторов, ограничивающих их регулировочный диапазон и маневренные характеристики [1-3]. Одна из таких проблем заключается в значительном отличии показателей маневренности газовых и паровых турбин между собой в режимах пуска из различных тепловых состояний. Так, после останова на 8-10 часов, газовая турбина пускается за 15-20 мин., тогда как для пуска паровой турбины требуется 45-50 мин. Это приводит к тому, что при останове ПГУ с целью резервирования мощности или при вынужденных и аварийных ее остановах общая длительность последующего пуска определяется, в основном, длительностью пусковых операций паровой турбины, т.е. 45-50 мин.

Аналогичная проблема возникает на теплофикационных ПГУ, например ПГУ-450, при работе их в режиме ГТУ-ТЭЦ, когда весь выработанный пар высокого и низкого давлений в котлах утилизаторах сбрасывается в сетевые подогреватели, минуя паровую турбину, а она на период работы ПГУ в указанном режиме останавливается. При этом регулировочный диапазон ПГУ увеличивается на величину мощности паровой турбины в момент перевода ПГУ в указанный режим. Недостаток такого режима состоит в том, что при обратном переводе ПГУ в штатный режим работы длительность перехода определяется длительностью пусковых операций паровой турбины, возникают проблемы малоцикловой надежности паровой турбины, связанные со значительными колебаниями температуры металла паровпускных частей цилиндра высокого давления (ЦВД). Кроме того, пусковые процессы паровой турбины связаны с потерями топлива.

1 Перевод паровой турбины в моторный режим

Альтернативным вариантом останова паровой турбины является перевод ее в моторный режим, что позволяет решить указанную проблему, так как из моторного режима паровая турбина, в силу особенностей ее работы в этом режиме, пускается тоже за 15-20 минут, и, таким образом, длительность пусковых операций ПГУ после ночного останова и нагружения ее до номинальной нагрузки сокращается на 30-35 минут [3, 4].

¹ Исследование выполнено с финансовой поддержкой Российского научного фонда по гранту №19-19-00601.

Технологию перевода паровой турбины в моторный режим рассмотрим применительно к паровой турбине Т-160-7 энергоблока ПГУ-450Т при работе его в режиме ГТУ-ТЭЦ. Упрощенная схема работы паровой турбины в моторном режиме приведена на рис.1.

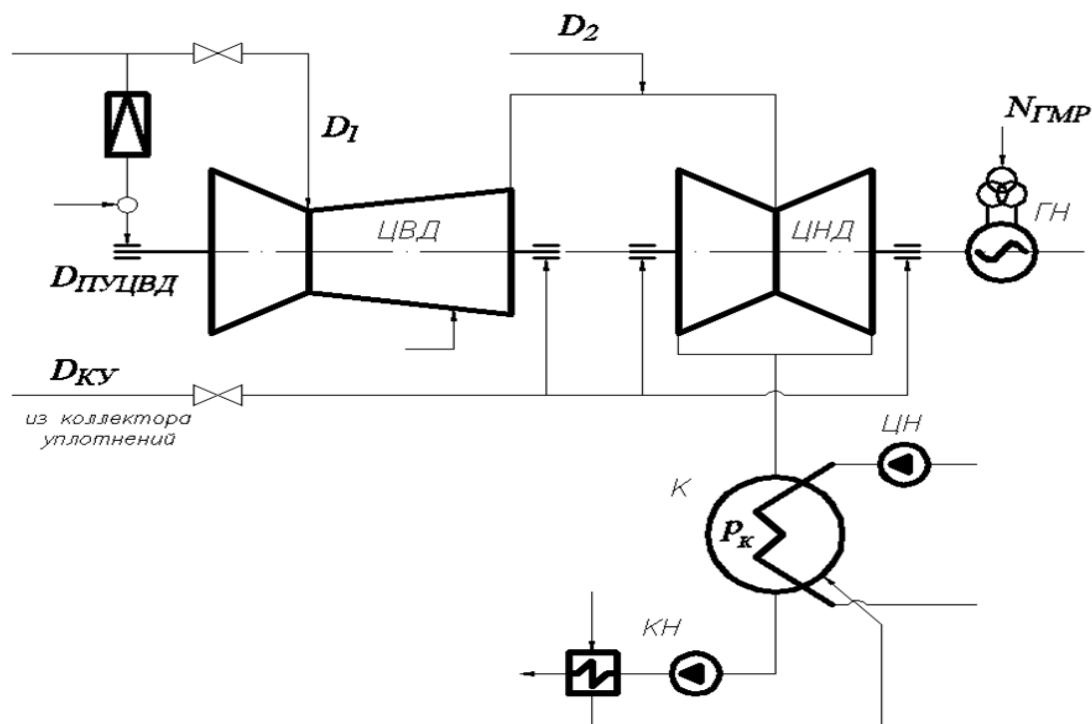


Рис. 1. Упрощенная схема работа паровой турбины Т-160-7 в моторном режиме (ЦВД, (ЦНД) цилиндр высокого (низкого) давления; ГН – генератор, Ц(К)Н – циркуляционный (конденсатный) насос, К – конденсатор;) (Остальные обозначения в тексте)

- 1) ПГУ разгружается в соответствии с эксплуатационной инструкцией до нагрузки, при которой обеспечивается требуемый по тепловому графику отпуск тепла.
- 2) Прекращается подача пара высокого и низкого давлений в паровую турбину без отключения генератора паровой турбины от сети;
- 3) Вследствие синхронной работы генератора с сетью, он переходит в режим двигателя (мотора), потребляя некоторую мощность (примерно 1,0-1,5 % от номинальной мощности) из сети, необходимой на холостое вращение роторов паровой турбины и генератора и покрытия потерь мощности на трение и вентиляцию в паровой турбине, а также потерь на механические и электрические потери;
- 4) В конденсаторе турбины поддерживается определенный вакуум в пределах допустимых границ;
- 5) Необходимое количество пара подается на передние концевые уплотнения ЦВД (Dпгуцвд) (с температурой 380 °С и давлением 0,115 МПа) и свежий пар на впуск ЦВД (D1) (давление 0,11 МПа, температура 450 °С, расход 0,1- 0,30 кг/с);
- 6) На задние концевые уплотнения ЦВД и на концевые уплотнения ЦНД подается пар из коллектора пара уплотнений (Dку)(температура 160-180 °С);
- 7) На впуск ЦНД подается охлаждающий пар (D2)от линии подачи пара на ПСГ-2 соседней турбины (давление 0,1 МПа, температура 100 °С, расход от 0,3 до 3,33 кг/с в зависимости от давления в конденсаторе);
- 8) При необходимости для стабилизации температурного состояния последних ступеней ЦНД (при давлении в конденсаторе выше 0,011 МПа) включается штатная система впрыска конденсата.

Такая организация подачи охлаждающего пара в турбину при ее работе в МР, обеспечивает отклонение температуры металла ступеней турбины не более чем на 35-45 °С по отношению к температуре номинального режима (рис. 2). При этом длительность стабилизации температурного

состояния лопаток паровой турбины составляет 10-15 мин. для лопаток ЦВД и ЦСД, и 30-45 мин. для лопаток ЦНД, после чего она может работать в таком режиме длительное время.

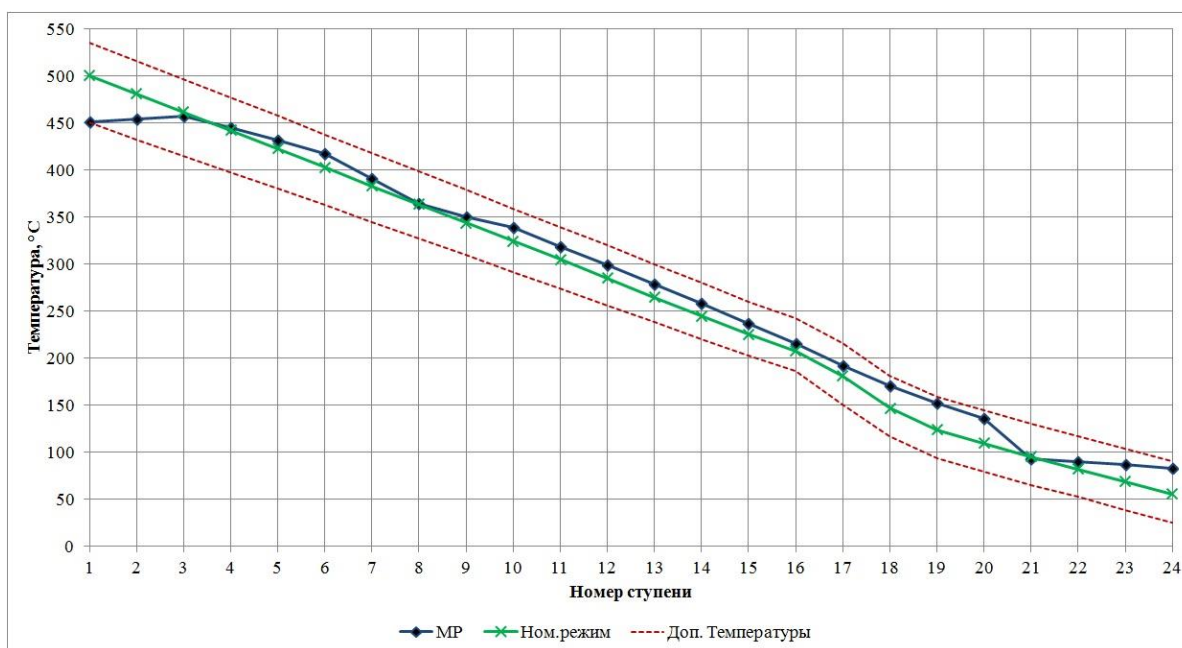


Рис. 2. Графики распределения температуры пара по ступеням паровой турбины (МР-моторный режим; Ном. режим-номинальный режим; Доп. Температуры-допустимые температуры)

Проведенные ранее исследования показали, что изменение температуры пара в ступенях паровой турбины носит линейный характер [3,4], поэтому принимаем, что для контроля и управления температурным состоянием достаточно регулировать температуры пара по групповому принципу. Для этого проточную часть турбины с учетом ее конструктивных особенностей можно разбивать на следующие три отсека:

1. с 1-й по 8-я ступень (ЦВД);
2. с 9-й по 20-ю ступени (ЦВД);
3. с 21-й по 24-я ступени (выхлоп ЦНД).

Участок с 16-й по 20-ю ступень служит для промежуточного контроля в случаях, если потребуется подача охлаждающего пара за 16-ю ступень по паропроводу подачи пара низкого давления.

Методику составления цифровой модели отсеков паровой турбины рассмотрим на примере 1-го отсека.

2 Разработка цифровой модели 1-го отсека (с1-й по 8-ю ступени)

Анализ вышеприведенных данных показывает, что температура пара за 8-й ступенью ЦВД зависит от следующих факторов:

- температуры пара на передние концевые уплотнения ЦВД (при постоянном его давлении и расходе);
- температуры и расхода охлаждающего пара на вход в паровую турбину (при постоянном давлении).

По условиям работы ступеней ЦВД температура пара за 8-й ступенью, куда проникает пар от передних уплотнений ЦВД, температура пара на передние уплотнения могут варьироваться $\pm 30-35$ °C по отношению к температуре пара за 8-й ступенью в номинальном режиме - 354°С, т.е. в интервале 320-380°С.

Температура свежего пара на вход в ЦВД из паропровода пара высокого давления соседнего блока может меняться в диапазоне от максимального номинального значения после дросселирования до требуемого по условиям работы паровпуска ЦВД значения при обратном переводе паровой турбины в активный режим. Пар, отбираемый от соседнего блока, предварительно дросселируется в дроссель-клапане Др2 до указанного выше значения (при дросселировании пара с давления 7,13 МПа до

0,11МПа температура пара снижается до значения 473°С) и, при необходимости, охлаждается до требуемых значений впрыском конденсата (рис. 3).

Рассмотрим основные аналитические выражения применительно к стабилизированному режиму работы ступеней ЦВД в моторном режиме, как первый шаг к составлению цифровой модели первого отсека паровой турбины в этом режиме.

Требуемая температура пара на входе в турбину регулируется регулятором Р1 изменением количества впрыскиваемого конденсата (деаэратора) в соответствии со следующими балансовыми уравнениями:

$$D_{01ВД}h_0 + D_K h_K = D_1 h_1, \quad (1)$$

$$D_{01ВД} + D_K = D_1, \quad (2)$$

откуда получим требуемый расход охлаждающего конденсата (из конденсатора):

$$D_K = D_1 \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_K}. \quad (3)$$

Так, при расходе охлаждающего пара на вход в ЦВД в количестве 1,0 т/ч с давлением 0,115 МПа и температурой 450 °С с энтальпией 3381 кДж/кг, соответствующих параметрах свежего пара 0,11МПа, 473 °С, 3435кДж/кг и энтальпии конденсата 660 кДж/кг требуемый расход конденсата из деаэратора составит около 20кг/ч.

Для определения температуры пара за восьмой ступенью (T_8'') при известной температуре пара на входе в 1-ю ступень (T_1') воспользуемся выражением, полученным на основании вышеприведенной математической модели работы ступеней турбины в моторном режиме в стационарном стабилизированном режиме их работы при условии равенства между собой температуры металла ступени и температуры пара на выходе из ступени с учетом конструктивной особенности ЦВД паровой турбины Т-160 (ЦВД паровой турбины выполнен двухпоточным, двухкорпусным с петлевой схемой течения пара).

$$T_8'' = T_1' + \frac{\sum_1^8 N_{ТВ} - \Delta Q_{ГП}}{C_p G} = T_1' + \frac{\sum_1^8 N_{ТВ} - k_1 F_{1-8} \Delta T_{1CP}}{C_p G}, \quad (4)$$

где $\sum_1^8 N_{ТВ}$ - суммарные потери мощности на трение и вентиляцию в ступенях 1-8, (кДж/с); C_p - удельная теплоемкость пара, (кДж/(кг·°С)); $\Delta Q_{ГП}$ - количество тепла, передаваемого от пара, протекающего через 1-8 ступени через внутренний кожух поверхностью (F_{1-8}) внешнему потоку пара к 9-й ступени путем теплопередачи с коэффициентом теплопередачи (k , кДж/(м²·°С)); G -расход пара через 1-8 ступени, (кг/с); ΔT_{1CP} - разность температур указанных потоков пара по среднему сечению внутреннего кожуха и, учитывая линейную зависимость температуры пара по ступеням, рассчитывается как:

$$\Delta T_{1CP} = \frac{T_1' + T_8''}{2} - \frac{T_8''' + T_9'}{2}, \quad (5)$$

где T_9' - температура пара на входе в 9-ю ступень, °С; T_8''' -температура пара за восьмой ступенью после смешения его с паром, поступающим через передние уплотнения ЦВД. Рассчитывается по выражению:

$$T_8''' = \frac{D_1 T_8'' + D'_{ПЦВД} T_{УПЦВД}}{D_1 + D'_{ПЦВД}}, \quad (6)$$

здесь $D'_{ПЦВД}$ - расход пара, проникающего в проточную часть через передние уплотнения ЦВД с температурой $T_{УПЦВД}$.

Анализируя вышеприведенные результаты расчета температурного состояния ступеней ЦВД при различных режимах можно констатировать следующие особенности работы ступеней 1-го отсека турбины:

- потери на трение и вентиляцию небольшие и постоянные для всех рассматриваемых режимов, т.е. они не зависят от расхода и температуры пара через ступени в рассматриваемых границах

их изменения;

- величина потерь мощности (тепла) через внутренний кожух передаваемого от пара, протекающего через 1-8 ступени внешнему потоку пара к 9-й ступени несколько больше, чем суммарные потери на трение и вентиляцию за счет высокого значения коэффициента теплопередачи, что приводит к снижению температуры пара рассматриваемых ступеней.

Для упрощения цифровой модели и системы управления на ее базе принимаются следующие условия, не влияющие на точность модели управления:

- расход, давление и температура пара на передние уплотнения ЦВД принимаются постоянными, не зависящими от температурного состояния лопаток ЦВД (как показано выше, оптимальным является пар с температурой 380 °С и давлением 0,11 МПа. Расход пара рассчитывается по общеизвестной методике, приведенной в [5] и составляет 0,06 т/ч. Это условие обеспечивает надежную работу уплотнений при работе паровой турбины в МР, при этом расход пара, проникающего в проточную часть через передние уплотнения, тоже постоянная величина и оценивается на уровне 0,11 т/ч;
- как показали оценочные расчеты, при указанном расходе пара через передние уплотнения его влияние на температуру пара на выходе из 8-й ступени составляет 0,1-0,2 °С и для упрощения ими в дальнейших расчетах можно пренебречь, тогда уравнение (5) примет вид

$$\Delta T_{1CP} = \frac{T_1' + T_8''}{2} - \frac{T_8'' + T_9'}{2} = \frac{1}{2}(T_1' + T_9'); \quad (7)$$

- средняя удельная теплоемкость пара C_p рассчитывается по усредненным параметрам по выражению

$$C_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{h_1' - h_8''}{T_1' - T_8''} \quad (8)$$

и принимается постоянной в пределах рассматриваемого отсека.

- принимается, что значение коэффициента теплопередачи в (4) в широких пределах изменения расхода пара и его температуры меняется незначительно, в связи с чем выражение (4) принимает вид

$$T_8'' = T_1' + \frac{\sum_1^8 N_{TB} - q_{1TP} \Delta T_{1CP}}{C_p G} = T_1' + \frac{q_{TB} - q_{1TP} \Delta T_{1CP}}{C_p G} \quad (9)$$

где q_{ND} , q_{NG} - постоянные величины.

$q_{1TP} = 0,368 \text{ кДж}/(\text{с} \cdot \text{C}^0)$; $q_{TB} = \sum_1^8 N_{TB} = 12 \text{ кВт}$ (расчет при $k_1 = 0,06347 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $F(1-8) = 5,8 \text{ м}^2$; $C_p = 2,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{C}^0)$).

Для проверки достоверности полученного выражения воспользуемся расчетными данными при температуре пара на входе в 1-ю ступень 449,5 °С расходе пара 0,11 т/ч = 0,031 кг/с, $\Delta T_{1CP} = 49,7 \text{ C}^0$,

получим $T_8'' = 449,5 + \frac{12 - 0,368 \times 49,7}{2,1 \times 0,031} = 449,5 - 96,7 = 352,8 \text{ C}^0$.

Сравнение полученного значения с расчетным (рис. 2) (452,2) показывает, что цифровая модель адекватна аналитической модели объекта.

На основании аналитической модели цифровая модель 1-го отсека турбины включает:

- исходные параметры ступеней ЦВД в номинальном режиме и конструктивные характеристики ступеней 1-8 ЦВД;
- результаты исследований, приведенные на рис.2;
- ограничения, накладываемые на параметры охлаждающего пара и на температуру контрольных ступеней 1-го отсека паровой турбины:
- для 1-й ступени $400 \leq T' \leq 472 \text{ C}^0$
- для 8-й ступени $330 \leq T_8'' \leq 360 \text{ C}^0$.
- оцифрованные аналитические уравнения (3), (7), (8), (9):

$$D_K = D_1 \frac{3435 - h_1(p_1, t_1)}{2775} = D_1 \left(1,7175 - \frac{h_1(p_1, t_1)}{2775} \right); \quad (10)$$

$$\Delta T_{CP} = 0,5 [T_1'(D_1, p_1) + T_9']; \quad (11)$$

$$C_p = \frac{h_1'(p_1, t_1) - h_8''(p_8, t_8'')}{T_1' - T_8''}; \quad (12)$$

$$T_8'' = T_1' + \frac{12,0 - 0,776 \Delta T_{CP}}{C_p D_1}. \quad (13)$$

3 Разработка системы управления температурным состоянием 1-го отсека паровой турбины в моторном режиме

Система управления должна выполнять следующие функции:

1. Поддержание допустимого температурного состояния ступеней 1-го отсека при работе паровой турбины в моторном режиме при заданном давлении в конденсаторе при возникновении внутренних и внешних возмущений;
2. Перевод температурного состояния ступеней в требуемое прогнозируемое температурное состояние при переводе паровой турбины в активный режим.
3. При известной температуре пара на выходе из котлов-утилизаторов регулировать температуру металла в опережающем режиме.

Система управления температурным состоянием 1-го отсека состоит из блока управления БУ1, регулятора Р1, системы мониторинга параметров, датчиков температур и расходомеров и т.д. (рис. 3).

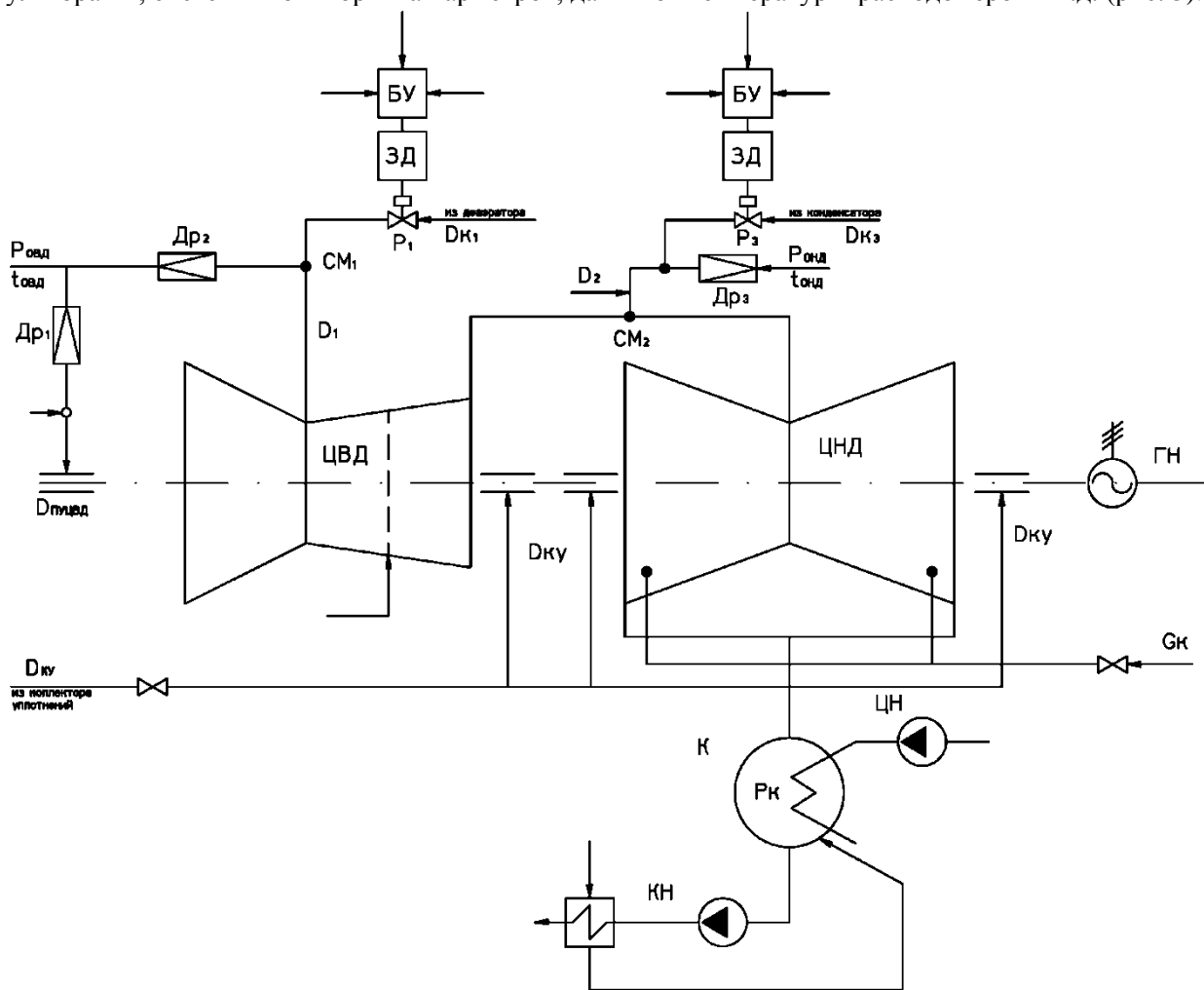


Рис. 3. Упрощенная схема системы управления (БУ – блок управления, ЗД – задатчик, Др – дроссель)
(Остальные обозначения см. рис.1)

Реализовать первый способ применительно к ПГУ-450 при ее работе в режиме ГТУ-ТЭЦ сложно, тем более при этом изменение температуры пара приведет к изменению режимов работы сетевых подогревателей, что не желательно.

Возможность реализации второго способа обусловлена тем, что, как было показано выше, при работе паровой турбины в моторном режиме имеется возможность регулирования температуры пара на входе в паровую турбину.

Система управления при этом будет работать в следующем порядке:

- предварительно, на основании экспериментов, оценивается время, необходимое для перехода первой ступени паровой турбины из одного температурного состояния в другое в зависимости от фактической разности температур между этими режимами (для начала можно на основании таких опытов создать базу данных или найти аналитическую/цифровую зависимость);
- измеренная температура пара (вначале рекомендуется организовать подачу пара только высокого давления) с опережением, рассчитанном в зависимости от реальных условий, поступает в блок управления, где с учетом текущего температурного состояния пара на входе в 1-ю ступень программно формируется сигнал на задатчик регулятора Р1. В процессе регулирования температуры пара на входе в паровую турбину контролируется выполнение всех ограничений как первого отсека, так и последующих отсеков турбины.

После стабилизации температуры пара и металла паровпускных органов в блоке управления формируется сигнал на подачу пара в турбину и на отключение охлаждающих потоков пара в проточную часть турбины.

Заключение

Для контроля и управления температурным состоянием проточной части паровой турбины Т-160-7 при работе ее в моторном режиме предложен принцип группового подхода к расчету температуры пара и разработана методика расчета температуры пара на выходе из группы ступеней турбины.

Предложена методика и приведен пример составления цифровой модели отсека паровой турбины, показана ее адекватность и возможность ее использования при разработке системы контроля и управления температурным состоянием проточной части паровой турбины в режимах стационарного моторного режима и при выходе ПГУ-450Т из режима ГТУ-ТЭЦ.

Литература

1. *Аракелян Э.К., Андрюшин К.А., Безделгин И.Ю.* Исследование температурного состояния проточной части паровой турбины Т-125/150 при работе ее в беспаровом и моторном режимах // *Электрические станции.* 2015. № 6. С. 21-26.
2. *Радин Ю.А.* Исследование и улучшение маневренности парогазовых установок. Дисс....докт. техн. наук. М., 2013.- 40с.
3. *Э.К.Аракелян, А.В.Андрюшин, Ю.Бурцев., К.А. Андрюшин.* Исследование технической и экономической целесообразности перевода паровой турбины Т-125/150 в моторный режим при работе ПГУ-450 в режиме ГТУ-ТЭЦ. // *Теплоэнергетика*, №12, 2018, С. 53-65.
4. *Обуваев А.С.* Разработка и исследование аналитической модели ПГУ-450. Дисс. канд. техн. наук. М., 2011.-20с.
5. *Аракелян Э.К.* Режимы работы и эксплуатация ТЭС /Учебник//Э.К.Аракелян, Е.Т.Ильин, Н.Д. Рогалев.- М.: Издательство МЭИ, 2021, 520с.