

УДК 621.165.62-5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПУТЁМ ОРГАНИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОТБОРОВ ПАРА ОТ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В.Б. Новосёлов^{1, 2}, Ю.М. Бродов¹, Е.В. Литвинов^{1, 2},
В.В. Лебедев², А.Г. Михайлов²

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

²УРАЛЭНЕРГОРЕМОНТ (УЭР), г. Екатеринбург, Россия
nowoselov@mail.ru

Резюме: Рассмотрены вопросы организации дополнительных отборов пара в станционные коллекторы электростанций из проточной части паровых турбин для замещения редукционно-охладительных установок. Представлены результаты реализации дополнительных отборов пара на основе поворотных клапанов с электромеханическим и пружинным приводами. Разработана методика определения диапазона режимов работы турбины с дополнительным отбором пара. Представлен анализ экономичности использования дополнительных отборов пара вместо редукционно-охладительных установок.

Ключевые слова: паровая турбина, дополнительный отбор, электромеханический привод клапана, экономическая эффективность дополнительного отбора.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -90-99

INCREASE EFFICIENCY OF ELECTRIC POWER STATIONS BY WAY OF ORGANIZATION OF ADDITIONAL CHOICE OF STEAM FROM STEAM TURBINES

V.B. Novoselov^{1, 2}, Yu.M. Brodov¹, E.V. Litvinov^{1, 2}, V.V. Lebedev², A.G. Mikhailov²

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU),
Ekaterinburg, Russia

²URALENERGOREMONT (UER), Ekaterinburg, Russia

Abstract. The issues of organization of additional steam extractions in station collectors of the power plant from the flowing part of steam turbines to replace the reduction-cooling unit. The results of the implementation of additional steam extractions based on rotary valves with electromechanical and spring actuators are presented. The technique for determining the range of turbine operation modes with additional steam extraction is developed. The analysis of the economical use of additional steam extractions instead of reduction-cooling units is presented.

Keywords: Steam turbine, additional steam extraction, electromechanical valve drive, economic efficiency of additional steam extraction.

На электростанциях, в частности на ТЭЦ, имеются общестанционные технологические коллекторы пара с давлением 0,78–1,57 МПа (8–16 кгс/см²). Основная часть пара подаётся в указанные коллекторы из производственных отборов турбин типа

ПТ (как правило, ПТ-60-130, ПТ-80/100-130/13, ПТ-50/60-130, ПТ-135/165-130/15 и др.) или с выхлопа турбин с противодавлением (типа Р) [1]. Как резервный источник используется пар из котла, подаваемый через РОУ в случае необходимости.

По тем или иным причинам потребность в паре указанных параметров может возрасти, либо одна или несколько турбин, поставляющих пар в коллектор, оказываются в ремонте, что требует частого включения в работу РОУ. Очевидно, использование РОУ в этом случае крайне неэкономично, поскольку свежий пар из котла дросселируется в нем без совершения работы в паровой турбине и, кроме того, требуется значительное охлаждение пара перед его подачей в коллектор.

В то же время на электростанциях установлены в массовом количестве конденсационные (типа К) и теплофикационные (типа Т) турбины. Если пар в перепускных трубах ЦВД-ЦСД этих турбин имеет максимальное давление в пределах 3,0–3,3 МПа (30–33 кгс/см²), то использование этого пара для подачи его в стационарный коллектор собственных нужд взамен пара РОУ (вытеснение пара РОУ) **очевидно** даёт большой экономический эффект [2–4]. Для этого необходимо выполнить паропроводы отбора пара из перепускных труб ЦВД-ЦСД в стационарный коллектор и установить на них защитно-регулирующие и обратные клапаны, управляемые из системы регулирования и защиты турбины, также охлаждающее устройство и необходимую арматуру, контрольно-измерительные приборы и датчики.

Такая работа была выполнена на 6 турбинах типа Т-110/120-130 силами УЭР¹. Исследование по расчетному обоснованию величины дополнительного отбора в зависимости от параметров стационарного коллектора и экономической эффективности его внедрения было выполнено в УЭР и УрФУ.

При реализации дополнительного отбора УЭР применил поворотные клапаны с электромеханическим приводом (ЭМП) [5]. Клапан управляется электроприводом МЭО, механически соединённым со штоком клапана посредством электромагнитной муфты (ЭММ), в работе постоянно находящейся под напряжением. Непосредственно на валу клапана установлен пружинный привод (ПрП), который в процессе работы клапана находится в сжатом состоянии. Время перемещения клапана на рабочий ход от МЭО составляет 25–30 с, что обеспечивает качественное дистанционное ручное и автоматическое регулирование. При возникновении аварийной ситуации (сброс нагрузки, аварийный останов) напряжение с электромагнитной муфты снимается, связь вала клапана с МЭО разрывается и пружина быстро (за 0,15–0,2 с) закрывает клапан, препятствуя обратному потоку пара из коллектора в турбину.

Поворотный клапан дополнительного отбора пара (ПКДО) с ЭМП конструкции УЭР показан на рис. 2. Для обеспечения безопасности в соответствии со сложившимися правилами проектирования такого рода отборов на паропроводе устанавливаются последовательно два ПКДО, один из которых соединяется с системой регулирования турбины и кроме защитных функций реализует функции регулятора (давления в коллекторе, расхода в коллектор и др.). Второй ПКДО работает как защитный от системы защиты турбины, для повышения надёжности на нём устанавливается дополнительно обратный клапан. Оба ПКДО физически и функционально взаимозаменяемы.

На паропроводе отбора пара устанавливается также охлаждающее устройство (УО), снижающее температуру пара до требуемой величины. Паропровод снабжается запорной арматурой, обеспечивающей возможность его отключения для обслуживания и ремонта его элементов.

На рис. 1 показана структурная схема организации такого дополнительного отбора пара из перепускных труб ЦВД-ЦСД турбины Т-110/120-130 ЗАО «Уральский турбинный завод» (УТЗ).

¹ По согласованию с УТЗ

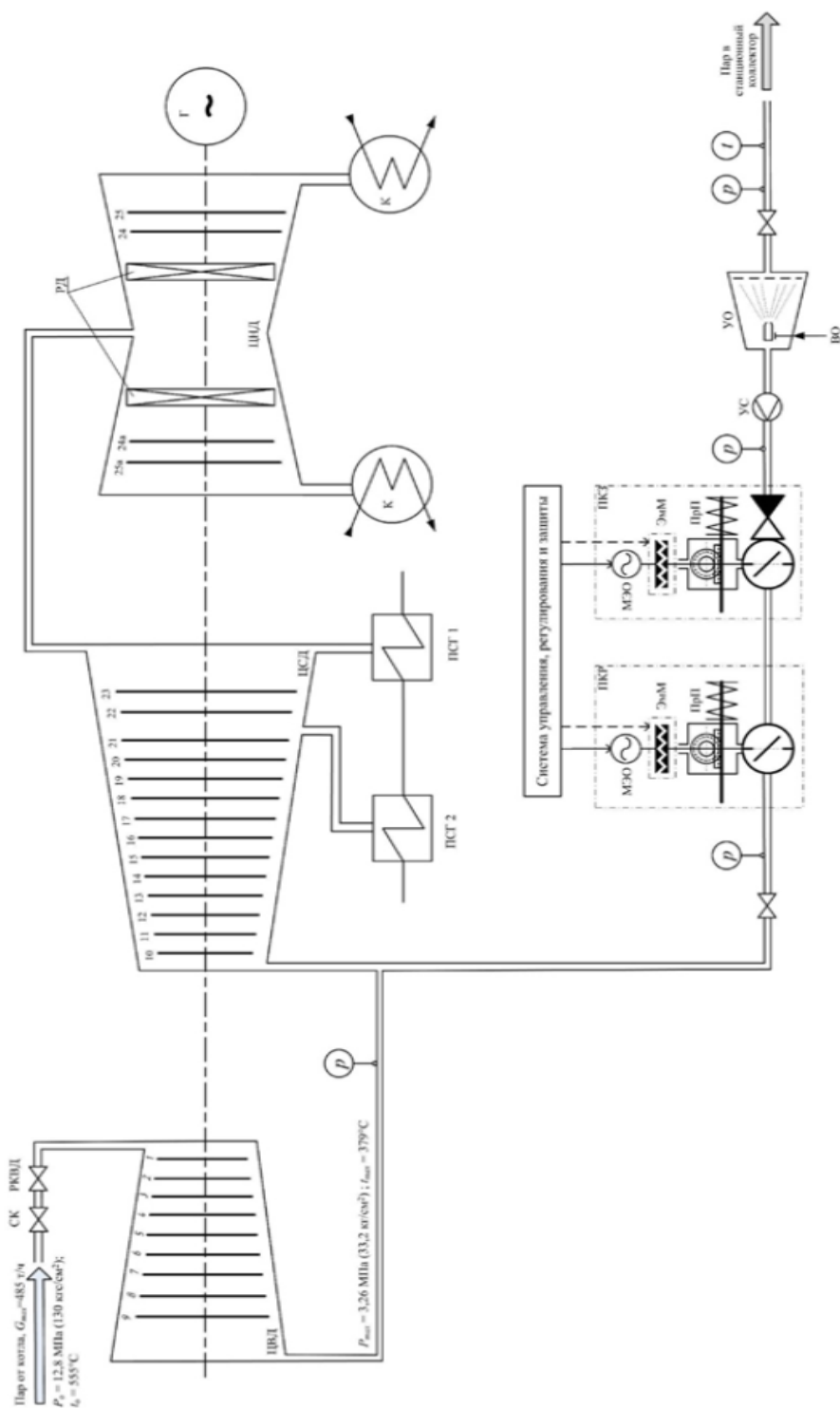


Рис. 1. Организация дополнительного отбора пара в стационарный коллектор из перепускных труб ЦВД-ЦСД турбины Т-110/120-130 УТЗ.

СК – стопорный клапан, РКВД – регулирующие клапаны высокого давления, РД – регулирующие диафрагмы, Г – генератор, К – конденсатор, ПСГ1, ПСГ2 – сетевые подогреватели, ПКР – поворотный клапан регулирующий, ПКС – поворотный клапан стопорный с обратным клапаном, МЭО – механизм электрический однооборотный, ЭММ – электромагнитная муфта, ПрП – пружинный привод, УС – устройство суживающее, УО – устройство охлаждающее, ВО – вода охлаждающая

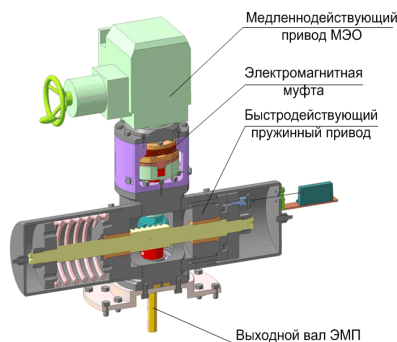


Рис. 2. Поворотный клапан дополнительного отбора пара с ЭМП (с сечением по электромагнитной муфте и пружинному приводу)

В серийных конструкциях УТЗ для организации дополнительного отбора пара использовался громоздкий блок защитно-регулирующего клапана с гидравлическими приводами [6]. Применение ПКДО с ЭМП позволило в 3–4 раза снизить вес клапанов, устанавливать их непосредственно на паропроводе отбора без дополнительных опор, что чрезвычайно важно в условиях тесной компоновки теплофикационной турбоустановки.

Применение электропривода в ПКДО – один из примеров реализации «безмасляной» системы регулирования, существенно повышающей пожаробезопасность работы турбины.

Обоснование величины дополнительного отбора пара

На рис. 3 показана расчётная схема турбины типа Т-110/120-130 применительно к поставленной задаче.

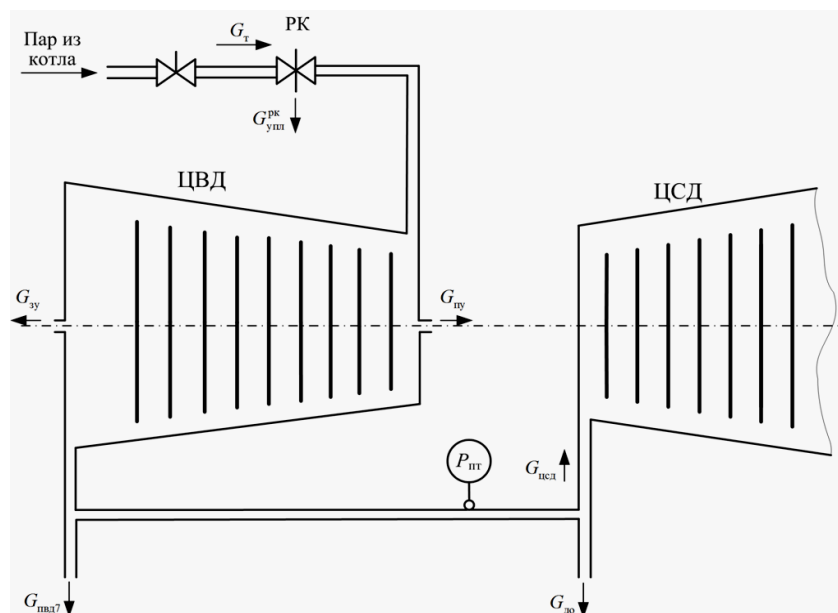


Рис. 3. Расчётная схема

G_T , $G_{\text{ЦСД}}$, $G_{\text{ПВД7}}$, $G_{\text{до}}$ – расход пара в турбину, в ЦСД, в ПВД7 и в дополнительный отбора соответственно; $G_{\text{упл}}^{\text{РК}}$, $G_{\text{пу}}$, $G_{\text{зу}}$ – протечки пара через уплотнения регулирующих клапанов, переднее и заднее уплотнения соответственно

В таблице представлены данные по балансам расхода пара на выходе из ЦВД турбины типа Т-110/120-130, полученные из [6] и материалов УТЗ.

Расход пара в дополнительный отбор может быть определён по формуле

$$G_{до} = G_T - G_{упл}^{рк} - G_{пу} - G_{зу} - G_{пвд7} - G_{цсд} . \quad (1)$$

Известно, что:

$$G_{пвд7} = G_{пвд7}^{\max} \cdot \frac{P_{пт}}{P_{пт}^{\max}} , \quad (2)$$

$$G_{пу} = G_{пу}^{\max} \cdot \frac{G_T}{G_T^{\max}} , \quad (3)$$

$$G_{упл}^{рк} = \text{const} = 2 \text{ т/ч} , \quad (4)$$

$$G_{зу} = G_{зу}^{\max} \cdot \frac{G_T}{G_T^{\max}} , \quad (5)$$

$$G_{цсд} = G_{цсд}^{\max} \cdot \frac{P_{пт}}{P_{пт}^{\max}} . \quad (6)$$

Таблица

Исходные данные для определения диапазонов работы турбины Т-110/120-130 с ДО				
№ п/п	Название	Условное обозначение	Единица измерения	Значение
1	Максимальный расход пара в турбину, при этом:	$G_T^{\max}$	т/ч	480
2	Давление пара в ПВД 7 (перепускных трубах ЦВД-ЦСД)	$P_{пт}^{\max}$	МПа	3,32
3	Расход пара в ПВД 7 после ЦВД	$G_{пвд}^{\max}$	т/ч	17,5
4	Расход пара в ПВД 7 из уплотнений регулирующих клапанов	$G_{упл}^{рк}$	т/ч	2,0
5	Расход пара из переднего уплотнения ЦВД	$G_{пу}^{\max}$	т/ч	4,1
6	Расход пара из заднего уплотнения ЦВД	$G_{зу}^{\max}$	т/ч	2,5

Очевидно, что величина максимального расхода пара в ЦСД будет при нулевом дополнительном отборе пара ($G_{до} = 0$):

$$G_{цсд}^{\max} = G_T^{\max} - G_{упл}^{рк} - G_{пу}^{\max} - G_{зу}^{\max} - G_{пвд}^{\max} . \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (1) – (7) позволяет получить выражение для давления пара в перепускных трубах ЦВД-ЦСД как функции от величины расхода пара в турбину и расхода пара в дополнительный отбор:

$$P_{пт}(G_T, G_{до}) = \frac{G_T \frac{P_{пт}^{\max}}{G_T^{\max}} (G_T^{\max} - G_{пу}^{\max} - G_{зу}^{\max}) - P_{пт}^{\max} (G_{до} + G_{упл}^{рк})}{G_T^{\max} - G_{упл}^{рк} - G_{пу}^{\max} - G_{зу}^{\max}} \quad (8)$$

На рис. 4 показаны зависимости $P_{пт}(G_t, G_{до})$ для нескольких фиксированных значений $G_{до}$.

Исходя из данных рис. 4 можно определить диапазон допустимых режимов работы ДО. Покажем это на примере ДО в стационарный коллектор 1,28 МПа (13 кгс/см²) с максимальным расходом 70 т/ч.

Для такого отбора был применён ПКДО с перепадом давления 0,196 МПа (2 кгс/см²) при указанных параметрах и расходе. Учитывая, что последовательно установлены 2 клапана, суммарный перепад давления на них составляет 0,392 МПа (4 кгс/см²). Таким образом, минимальное давление в перепускных трубах ЦВД-ЦСД для обеспечения пропуска 70 т/ч пара в коллектор составляет 1,672 МПа (17 кгс/см²), что возможно при расходе пара в турбину не менее 315 т/ч (рис. 5). Результаты расчётов для промежуточных значений расхода пара в ДО с учётом изменения перепада давления на клапанах также приведены на рис. 5. Особенным образом определяется условие включения ДО: согласно реализованным алгоритмам это можно делать при минимальном перепаде давления на клапанах (защитном и регулирующем) 0,294 МПа (3 кгс/см²) для недопущения отключения отбора по минимальному перепаду, составляющему 0,049 МПа (0,5 кгс/см²). Одновременно это позволяет сразу после включения ДО довести расход в него до 30 т/ч.

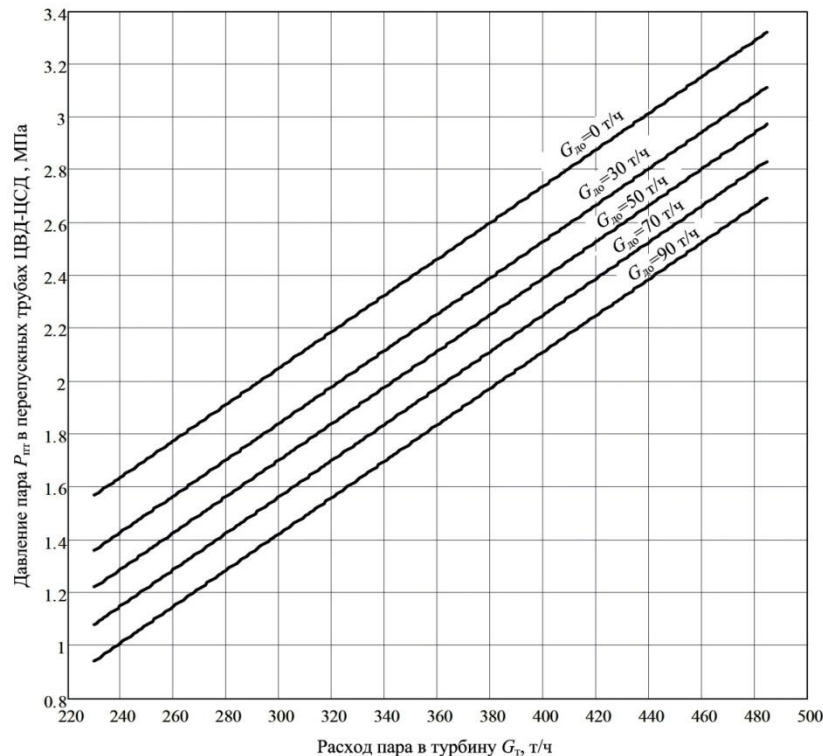


Рис. 4. Зависимости $P_{пт}(G_t, G_{до})$ турбины типа Т-110/120-130

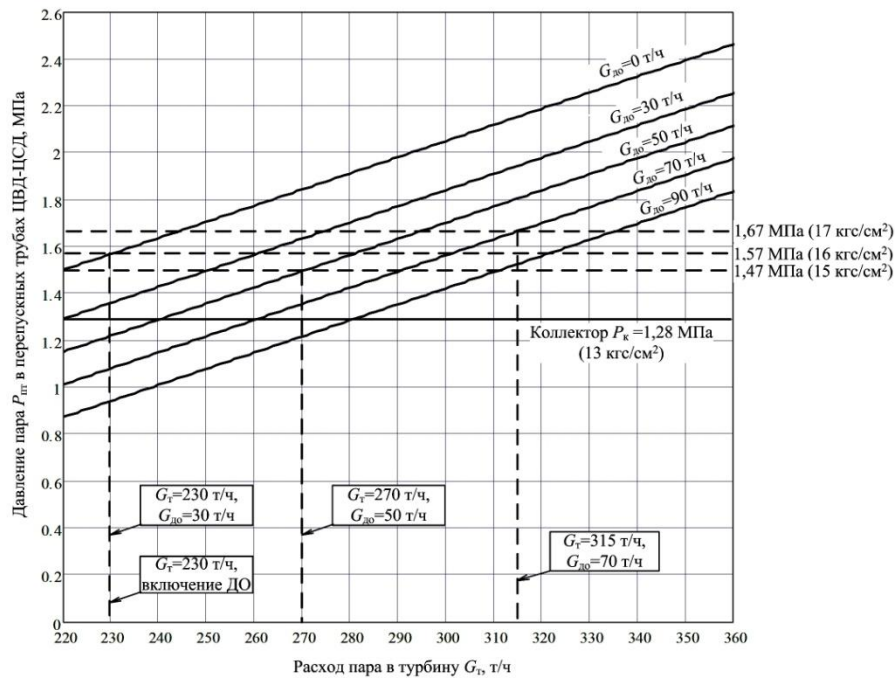


Рис. 5. Пример определения диапазонов допустимых режимов турбины Т-110/120-130 для ДО 70 т/ч в стационарный коллектор 1,28 МПа (13 кгс/см²)

Аналогичным образом рассчитываются диапазоны работы турбины с ДО для различных давлений P_k в стационарном коллекторе. Обобщённые результаты для турбины Т-110/120-130 показаны на рис. 6. Допустимые режимы ДО располагаются правее и под соответствующей номограммой.

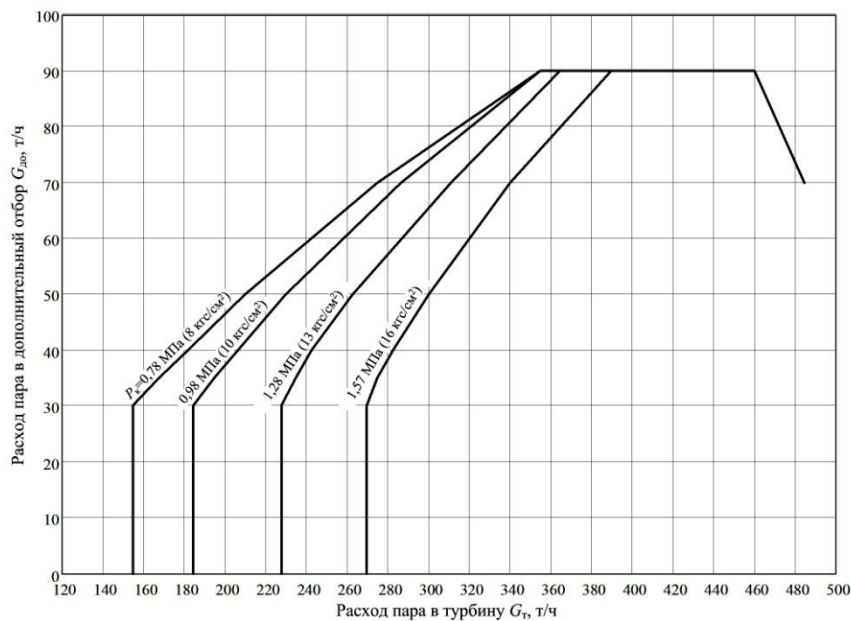


Рис. 6. Номограммы ДО турбины Т-110/120-130 для нескольких значений давления пара в стационарном коллекторе

Расчёты показали, что при всех указанных на рис. 6 давлениях пара в стационарном коллекторе сразу после включения ДО расход в него может быть увеличен до 30 т/ч, дальнейшее увеличение отбора требует увеличения расхода пара в турбину.

Согласованный с заводом изготовителем турбины (УТЗ) максимальный расход пара в ДО составляет до 90 т/ч при расходе пара в турбину до 460 т/ч. При дальнейшем увеличении расхода пара в турбину до максимального 485 т/ч расход в ДО снижается до 70 т/ч по условиям прочности элементов проточной части ЦВД.

Экономическая эффективность организации дополнительного отбора пара

Оценим экономический эффект ДО при подаче пара в стационарный коллектор 1,28 МПа (13 кгс/см²) в количестве $G_{до} = 90$ т/ч в течение $n_T = 2000$ ч/год взамен РОУ 140/15. Среднегодовой расход пара в турбину примем 420 т/ч, при этом давление в перепускных трубах ЦВД-ЦСД составит 2,25 МПа (рис. 4). Для указанных условий энтальпии острого пара и пара в перепускных трубах составляют $i_0 = 3487$ кДж/кг, $i_{пт} = 3080$ кДж/кг соответственно.

В отличие от РОУ140/15, пар дополнительного производственного отбора при прохождении через ЦВД турбины вырабатывает дополнительную мощность:

$$\Delta N = \frac{G_{до}(i_0 - i_{пт})}{3,6} = \frac{90(3487 - 3080)}{3,6} = 10175 \text{ кВт} = 10,175 \text{ МВт}. \quad (9)$$

При отсутствии потребности в дополнительной мощности экономится топливо, при этом годовая экономия составит:

$$\Delta B = \Delta N \cdot n_T \cdot b_3, \quad (10)$$

где $b_3 = 361 \frac{\text{г} \cdot \text{У} \cdot \text{Т}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} = 0,361 \cdot 10^{-3} \frac{\text{т} \cdot \text{У} \cdot \text{Т}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ – удельный расход топлива на отпущенную электроэнергию.

$$\text{Таким образом, } \Delta B = 10175 \cdot 2000 \cdot 0,361 \cdot 10^{-3} = 7343,3 \frac{\text{т} \cdot \text{У} \cdot \text{Т}}{\text{год}}.$$

При стоимости условного топлива $C_T = 3155 \frac{\text{руб}}{\text{т} \cdot \text{У} \cdot \text{Т}}$ годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{до} = \Delta B \cdot C_T = 7343,3 \cdot 3155 = 23177734 \frac{\text{руб.}}{\text{год}}. \quad (11)$$

При постоянном использовании ДО ($n_T = 7000$ ч), годовой экономический эффект соответственно увеличивается до $81122069 \frac{\text{руб.}}{\text{год}}$.

Выводы

1. Представлено обоснование экономической целесообразности организации дополнительных отборов пара от турбин с целью вытеснения РОУ 140/15.
2. Приведены примеры реализованных ОАО «УРАЛЭНЕРГОРЕМОНТ» проектов дополнительных отборов на 6 турбинах типа Т-110/120-130 с использованием поворотных клапанов с электромеханическим приводом, что позволяет повысить пожаробезопасность турбоустановки, снизить габаритно-весовые требования к оборудованию дополнительного отбора и его размещению в тесном пространстве турбоустановки.
3. Разработана методика расчёта режимов турбины для обеспечения дополнительных отборов пара в типичные стационарные коллекторы.
4. Представлен расчёт экономической эффективности организации дополнительного отбора пара, замещающего РОУ.

5. Дополнительный отбор может быть осуществлён из перепускных труб ЦВД-ЦСД других турбин ЗАО УТЗ (например, Т-175/210-130, Т-185/215-130), а также турбин других заводов-изготовителей, имеющих аналогичные параметры пара в перепускных трубах ЦВД-ЦСД.

Литература

1. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода для ПГУ / А.А. Гольдберг, Л.С. Иоффе, П.В. Коган [и др.]; под общ. ред. канд. техн. наук А.Ю. Култышева. Екатеринбург: Априо, 2015. 168 с.
2. Коган П.В. Повышение эффективности теплофикационных паровых турбин для ПГУ: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2007.
3. Култышев А.Ю. Некоторые вопросы выбора параметров пара и схемных решений в целях оптимизации параметров паротурбинного оборудования и проектно-конструкторских разработок / А.Ю. Култышев, М.Ю. Степанов, Е.Н. Поляева // Теплоэнергетика. 2014. № 12. С. 16–18.
4. Kraft-Wärme-Kopplung [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.siemens.com/global/de/home/produkte/energie/power-generation/kraftwerke/kraft-waerme-kopplung.html>. Заглавие с экрана. (Дата обращения: 20.06.2017).
5. Литвинов Е.В., Новосёлов В.Б., Голубев А.Е. Безмасляные системы регулирования паровых турбин / Сб. тр. первой науч.-техн. конф. молодых учёных Уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 114–116.
6. Бененсон Е.И. Теплофикационные паровые турбины / Е.И. Бененсон, Л.С. Иоффе.; под ред. Д.П. Бузина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: «Энергия». 1986. 272 с.

Авторы публикации

Новоселов Владимир Борисович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: vnowoselov@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

Литвинов Егор Владимирович – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

Лебедев Владимир Вадимович – начальник цеха регулирования и автоматики, АО «УРАЛЭНЕРГОРЕМОНТ» (УЭР).

Михайлов Алексей Геннадьевич – инженер цеха регулирования и автоматики, АО «УРАЛЭНЕРГОРЕМОНТ» (УЭР).

References

1. Parovye turbiny i turboustankovki Ural'skogo turbinnoho zavoda dlja PGU / A.A. Gol'dberg, L.S. Ioffe, P.V. Kogan [i dr.]; pod obshh. red. kand. tehn. nauk A.Ju. Kultysheva. Ekaterinburg : Aprio, 2015. 168 p.
2. Kogan P.V. Povyshenie jeffektivnosti teplofikacionnyh parovyh turbin dlja PGU: avtoreferat dis. ... kand. tehn. Nauk. Ekaterinburg, 2007.
3. Kultyshev A.Ju. Nekotorye voprosy vybora parametrov para i shemnyh reshenij v celjah optimizacii parametrov paroturbinnoho oborudovaniya i proektno-konstruktorskih razrabotok / A.Ju. Kultyshev, M.Ju. Stepanov, E.N. Poljaeva // Teplojenergetika. 2014. No. 12. P. 16

4. Kraft-Wärme-Kopplung [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.siemens.com/global/de/home/produkte/energie/power-generation/kraftwerke/kraft-waerme-kopplung.html>. Zaglavie s jekrana. (Data obrashhenija: 20.06.2017).

5. Litvinov, E.V. Bezmasljanye sistemy regulirovanija parovyh turbin / E.V. Litvinov, V.B. Novosjолоv, A.E. Golubev // sb. tr. pervoj nauch.-tehn. konf. molodyh uchjonyh Ural'skogo jenergeticheskogo instituta. Ekaterinburg: UrFU, 2016. P. 114–116.

6. Benenson E.I. Teplofikacionnye parovye turbiny / E.I. Benenson, L.S. Ioffe.; pod red. D.P. Buzina. 2–e izd., pererab. i dop. M.: «Jenergija». 1986. 272 p.

Authors of the publication

Vladimir Novoselov – Dr. of technical Sciences, Professor of the Department “Turbines and engines”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU). E-mail: vnovoselov@mail.ru.

Yurii Brodov – Dr. of technical Sciences, head of the Department “Turbines and engines”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Egor Litvinov – graduate student of the Department “Turbines and engines”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Vladimir Lebedev – plant control and automation Head, Joint Stock Company “URALENERGOREMONT” (UER).

Aleksej Mihajlov – engineer of control and automation, Joint Stock Company “URALENERGOREMONT” (UER).

Поступила в редакцию

25 июня 2017 г.