

УДК 621.313

АНАЛИЗ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-300-240-1.

О.А. Андреева, А.В. Нефисов

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Турбина К-300-240-1 изготовлена на параметры пара $P=23,5$ МПа и $T=833/838$ К, давление пар в конденсаторе $P_k=3,4$ кПа, температуру питательной воды $T_n=538$ К (при полной нагрузке). Эксплуатируется турбина с начальными параметрами пара $P_n=23,5$ МПа и $T_n=813/818$ К в блоке с прямоточным котлом. Турбина состоит из трёх цилиндров. Первый цилиндр - высокого давления - ЦВД. Второй цилиндр - совмещающий часть среднего давления (ЧСД) и один поток части низкого давления (ЧНД) - ЦСНД. Третий - двухпоточный цилиндр низкого давления - ЦНД[1].

Длина последней рабочей лопатки ЧНД 960 мм, а средний диаметр 2480 мм. Ометаемая площадь рабочей лопаткой 7,48 м². Последняя ступень обеспечила сооружение турбины для $P_k \approx 3,5$ кПа из расчёта одного выхода мощностью на 100 МВт, а для более высокого противодавления - 130 МВт на один выход. Удельная паровая нагрузка последнего рабочего колеса при $P_k = 3,5$ кПа - 25 т/(м²·ч). Такая же ступень турбин К-800-240-3 $P_k = 3,5$ кПа эксплуатируется с удельной паровой нагрузкой примерно 31,5 т/(м²·ч). Выходная кинетическая энергия $h_c \approx 35$ кДж/кг.

С момента ввода в эксплуатацию турбины, систематически совершенствовались основные узлы паротурбинной установки К-300-240-1. Главные направленные работ - доводка всех узлов до состояния безусловной надёжности, повышение их долговечности и экономичности.

Следствие выполненных работ - увеличение пропускной способности проточной части турбины от 975 до 1050 т/ч и повышение максимальной мощности турбины с 310 до 330 МВт. Основной критерий ограничения максимальной мощности - давление пара на входе в ЧНД, которое не должно превышать 0,264 МПа.

В результате выполненных работ достигнуты высокие технико-экономические показатели турбоустановок К-300-240-1:

- нормативный удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии (q_1) - 7862,8 и 8122,4 кДж/(кВт·ч) при нагрузках 300 и 120 МВт;

-наработка на отказ - 22037 часов;

-коэффициент технического использования - 0,8982;

-коэффициент готовности - 0,9988.

И это при наработке каждой из восьми турбин свыше 230 тыс. часов и при более чем шестистах остановах и пусках каждого энергоблока.

Исходно-номинальный УРТ на отпущенную электроэнергию в режиме номинальной нагрузки 300 МВт на блоках с турбиной К-300-240-1 при сжигании природного газа - 311 г/(кВт·ч); мазута - 315,5 г/(кВт·ч).

С целью повышения экономичности и надёжности была выполнена модернизация ЧНД турбины К-300-240-1. Модернизация ЧНД предусматривала замену всех рабочих колес и диафрагм, а также ротора низкого давления (РНД). Новый РНД - цельнокованный, не имеющий центрального сверления и насадных втулок в зоне концевых уплотнений. Цельнокованный РНД по габаритам и весу аналогичен ротору с насадными дисками и не требует дополнительной реконструкции подшипников и других элементов корпусов ЧНД. Конструкция ротора предусматривает цельнокованные полумуфты для соединения с РСНД и ротором генератора[3].

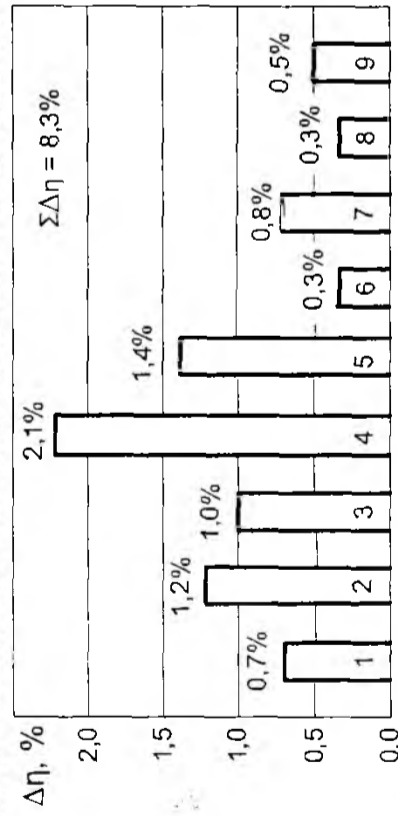
Обойма (внутренний корпус) и выхлопные части ЦНД выполнены сварными с ребрами жесткости и перегородками для установки сопловых аппаратов I и 6 ступеней и диафрагм. Все диафрагмы - сварные. Диафрагмы ступеней 5 и 10 с устройствами для влагоудаления, а также для организации камер отборов за ступенями 2, 4, 8 и 9 в каждом потоке.

Внутренний корпус ЦНД используется существующий, так как новые диафрагмы спроектированы специально так, что устанавливаются в существующие проточки в цилиндре.

По данным Ленинградского Металлического Завода (ЛМЗ) модернизация ЦНД приводит к увеличению его средневзвешенного относительного внутреннего КПД по состоянию перед соплами ($\eta_{\text{вп}}$) на 8,3% (рисунок 1) до 90,3%.

Составляющие повышения экономичности ЦНД:

- удаление демпферных связей из проточной части;
- направляющие лопатки с тангенциальным навалом;
- цельнофрезерованные бандажи, сварные диафрагмы;
- согласование поточных и скелетных углов;
- плавные меридиональные обводы;
- отсос плёночной влаги;
- модернизация выхлопного патрубка;
- развитые диафрагменные уплотнения;
- новая конструкция надбандажных уплотнений[4]



1 – удаление демферных связей из проточной части; 2 – направляющие лопатки с тангенциальным навалом; 3 – цельнофрезерованные бандажи, сварные диафрагмы; 4 – согласование поточных и скелетных углов; 5 – плавные меридиональные обводы; 6 – отсос плёночной влаги; 7 – модернизация выхлопного патрубка; 8 – развитые диафрагменные уплотнения; 9 – новая конструкция надбандажных уплотнений.

Рисунок 1 – Составляющие повышения экономичности ЦВД

При уменьшении объёмных расходов пара через последнюю ступень ЦВД ЦВД влывно снижается. При объёмном расходе 0,5 номинального $\eta_{\text{ЦВД}}$ уменьшается до 67%.

По гарантиям ЛМЗ при расходе свежего пара $G_0 = 937,3$ т/ч после модернизации ЦВД мощность турбины повышается на 6,5 МВт.

Модернизированной турбине присвоено обозначение К-300-240-1М.

В дальнейшем выполнена модернизация всей проточной части турбины К-300-240-1. В тендере на модернизацию участвовали фирмы ОАО «Силовые машины» («СМ») и «ALSTOM Power» («АР»)[2]. В тендерных предложениях претенденты при расходе свежего пара $G_0 = 937,3$ т/ч для расчётных тепловых схем турбоустановок гарантировали:

1) «СМ» - снижение q_r на 309,8 кДж/(кВт·ч) (q_r после модернизации 7553 кДж/(кВт·ч)), повышение мощности турбины на 15,8 МВт;

2) «АР» - q_r после модернизации 7576 кДж/(кВт·ч) (снижение q_r на 287 кДж/(кВт·ч)).

Оба претендента гарантировали длительную максимальную допускаемую мощность турбины 330 МВт при $G_0 = 990$ т/ч. Ротор низкого давления (РНД) турбины «АР» на 25 т тяжелее РНД турбины «СМ» Весовые характеристики роторов турбин представлены в таблице 1.

Таблица 1

Весовые характеристики роторов турбин К-300-240

Ротор	К-300-240-1	Вес, кг	
		Модернизированных турбин по предложениям	АР
Высокого давления (РВД)	9324	12100	-
Среднего давления (РСД)	29300	31593	39550
Низкого давления (РНД)	32060	30178	55000

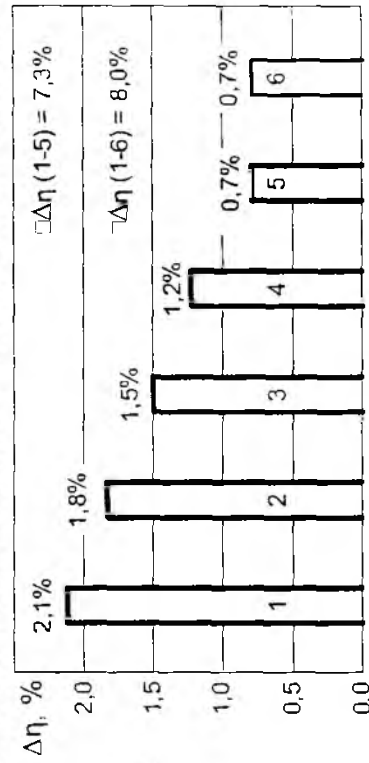
Увеличение веса РНД турбины «АР» повышает статические и динамические нагрузки на опоры турбины и требует реконструкции подшипников и оснащения турбины системой гидроподъёма роторов. Поэтому по условиям надёжности к реализации принято тендерное предложение «СМ».

Модернизация проточной части ЦВД, предложенная «СМ», заключается в полной замене старой проточной части на новую проточную часть с реактивным облачением. Новая проточная часть ЦВД состоит из РС и 19 ступеней реактивного типа. В первом потоке расположены РС и 10 ступеней давления, а во втором – 9 ступеней.

По расчётам ЛМЗ новая проточная часть с реактивным облачением и со старым наружным корпусом ЦВД на номинальном режиме увеличивает КПД ЦВД на 7,3%.

Составляющие повышения экономичности ЦВД (рисунок 2):

- увеличение числа ступеней;
- применение развитых уплотнений;
- увеличение высоты лопаток и уменьшение диаметра проточной части;
- новые эффективные профили направляющих и рабочих лопаток, согласованные с поточными углами;
- уменьшение перепада на регулируемую ступень;
- новый наружный корпус.



1 – увеличение числа ступеней; 2 – применение развитых уплотнений; 3 – увеличение высоты лопаток и уменьшение диаметра проточной части; 4 – новые эффективные профили направляющих и рабочих лопаток, согласованные с поточными углами; 5 – уменьшение перепада на регулируемую ступень; 6 – новый наружный корпус

Рисунок 2 – Составляющие повышения эффективности ЦВД

Вследствие повышения КПД ЦВД q_1 брутто турбоустановки снизится на 1,5-2,0%, а мощность турбины при том же расходе теплоты повысится ориентировочно на 4,5 МВт.

Проточная часть ЦВД рассчитана на максимальный пропуск свежего пара 990 т/ч, при котором гарантируется максимальная длительная мощность турбины 330 МВт.

Модернизация ЧСД предусматривает замену:

- РСНД;
- направляющего аппарата первой ступени;
- обойм диафрагм;
- диафрагм;
- всех рабочих лопаток на новые рабочие лопатки с целью фрезерованными бандажами;
- камер и обойм концевых уплотнений.

Модернизированная ЧНД унифицирована с ЧНД турбины К-300-240-1М. Модернизированной турбине с реактивным облопачиванием ЧВД присвоено обозначение К-300-240-6МР.

По данным испытаний в гарантийной точке после модернизации:

$$q_1 = 7645,8 \text{ кДж/(кВт}\cdot\text{ч)};$$

$$P = 317,46 \text{ МВт.}$$

По сравнению с типовой энергетической характеристикой турбоагрегата К-300-240 ЛМЗ q_1 снижается на 217,0 кДж/(кВт·ч), а мощность повышается на 18,26 МВт.

Исходно-номинальный УРТ на отпущенную электроэнергию энергоблоком с турбиной К-300-240-6МР оценивается при сжигании природного газа – 303,0 г/(кВт·ч); мазута – 307,0 г/(кВт·ч). Оценка эффективности модернизации паровых турбин К-300-240 после проведенного анализа представлена в таблице 2.

Таблица 2
Оценка эффективности модернизации паровых турбин К-300-240

Тип турбины	Исходно-номинальный УРТ на отпущенную электроэнергию в блоком зависимость от вида сжигаемого топлива, г/(кВт·ч)		Экономия топлива при работе с установленной мощностью 5000 ч/год, т/год
	газ	мазут	
К-300-240-1	311,0*	315,5*	-
К-300-240-1М	305,0*	309,0*	9 000
К-300-240-6МР	303,0**	307,0**	12 000

Важнейшая характеристика эффективности проточной части паровой турбины – сохранение экономичности в межремонтный период. Основное изменение экономичности имеет место в первый год эксплуатации. Для оценки изменения экономичности модернизированной турбины в межремонтный период электростанция и ОАО «Белэнергостроиналадка» провели испытания по определению диаграммных КПД ЦВД ($\eta_{oi}^{ЦВД}$) и ЦСД ($\eta_{oi}^{ЦСД}$) через 13 месяцев после модернизации. На момент испытаний модернизированная турбина отработала 8647 часов при 15 пусках и остановах. По данным испытаний за этот период снижение $\eta_{oi}^{ЦВД}$ составило 0,81%. При этом максимальное значение КПД составляет 86,39%, что практически соответствует гарантии ЛМЗ для модернизированной турбины – 86,6%. Снижение $\eta_{oi}^{ЦСД}$ турбины составило 1,14%. Абсолютная величина $\eta_{oi}^{ЦСД}$ после года эксплуатации находится на уровне 93,8%. После модернизации $\eta_{oi}^{ЦСД}$ оценивался в 94,42% при гарантии 94,23%.

Выводы:

Модернизация проточной части турбины привела к таким положительным эффектам как:

- увеличение номинальной мощности энергоблока на 15 МВт с 300 до 315 МВт;
- увеличение вращающегося резерва мощности в энергосистеме на 15 МВт при гарантийной ОАО «Силовые машины» максимально длительной мощности турбины 330 МВт;
- увеличение срока службы турбины на 40 лет;

С. Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік
университетінің ғылыми журналы
Научный журнал Павлодарского государственного
университета им. С. Торайғырова

*1997 жылы құрылған
Негізінен 1997 г.*

«ӘА»
’ і і і – ŷ α – α
— ≈ — “Ō» «√»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СЕРИЯ

Научный журнал Павлодарского государственного университета
им. С. Торайгырова

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на учет средства массовой информации
№ 4533-Ж

выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия
Республики Казахстан
31 декабря 2003 года

Арын Е.М., д.э.н., профессор (главный редактор);
Кислов А.П., к.т.н., доцент (**зам. гл. редактора**);
Бергузин А.Н. (**отв. секретарь**).

Редакционная коллегия:

Баубеков К.Т., к.т.н., доцент;
Глазырин А.И., д.т.н., профессор;
Глазырин С.А., к.т.н., доцент;
Захаров И.Е., д.т.н., доцент;
Клецель М.Я., д.т.н., профессор;
Новожилов А.Н., д.т.н., профессор;
Тастенов А.Д., к.т.н., доцент;
Утегулов Б.Б., д.т.н., профессор;
Ханенский В.Ф., д.т.н., профессор;
Айтжанова Д.Н. (тех. редактор)

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.

Мнение авторов публикаций не всегда совпадает с мнением редакции.

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов.

Рукописи и дискеты не возвращаются.

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник ПГУ» обязательна.

МАЗМҰНЫ

К.К. Әбішев

Құрылыс-жол машинасының ауырлық центрінің координатасын анықтау мәселесі

О.А. Андреева, А.В. Нефтьисов

К-300-240-1 бу турбинасының тармақ бөлігін моделдендіру анализі 12

В.А. Бороденко

МАТЛАВ ортасында жүйелер кедергісімен моделдендіру 19

Н.К. Дроздова, Л.М. Беляева

Электр энергиясының қоршаған ортаға әсері 31

Б.З. Калшев, Ф.М. Сидвокисова, Н.Б. Байкенова

Электр энергетикалық жүйелеріндегі өтпелі процестің сандық және саналық критерийлерінің өзара байланысы 34

А.П. Кислов, А.Н. Бергузинов

Основные понятия качества электроэнергии и их связь с работой электротехнологических установок 39

А.П. Кислов, А.Н. Бергузинов

Характеристики режимов энергопотребления электротехнологических установок... 50

А.П. Косогоров, С.А. Машевский, А.С. Шеломенцев

Электр тораптарының кенет ауыспалын үлгілеу 62

А.Н. Новожилов, Н.А. Исупова, Е.Н. Колесников,

Д.А. Кудабиев, В.А. Черных

Нейтральмен ажыратылған электр желісіндегі коммутационды өтпелі үрдістерді моделдендіру 70

Е.Т. Оразов, К.К. Тохтибакиев, А.А. Саухимов

Электр тартымдық желілерде электр энергия ысырабын иммитациялық математикалық моделдеу..... 78

Д.Ж. Сатыбалдина

Аппараттық қауіпсіздік қауіп-қатерінің әсерінен туындаған шығынды бағалау әдістерін жасау 87

А.О. Юсупова, А.А. Бектасова

Жиілік және фазалық модуляцияны спектрді талдау радиотехникалық шынжырдың жүк көтергіш сигналдары 94

А. Нұржауов

Машина-трактор агрегаты массаларының тербелістерін жиілік алқабында зерттеу ..

Наши авторы 150

Правила для авторов 152

СОДЕРЖАНИЕ

К.К. Абишев К вопросу определения координаты центра тяжести строительного-дорожного машины	9
О.А. Андреева, А.В. Нефтисов Анализ модернизации проточной части паровой турбины К-300-240-1	12
В.А. Бороденко Моделирование систем с запаздыванием в среде MATLAB	19
Н.К. Дроздова, Л.М. Беляева Воздействие электрической энергии на окружающую среду	31
Б.З. Калиев, Г.М. Садовикова, Н.Б. Байкенова Взаимосвязь качественных и количественных критериев переходного процесса в электроэнергетических системах (ЭЭС)	34
А.П. Кислов, А.Н. Бергузинов Основные понятия качества электроэнергии и их связь с работой электротехнологических установок	39
А.П. Кислов, А.Н. Бергузинов Характеристики режимов энергопотребления электротехнологических установок... 50	
А.П. Косогоров, С.А. Машевский, А.С. Шеломенцев Моделирование резкопеременных нагрузок электрических систем	62
А.Н. Новожилов, Н.А. Исупова, Е.Н. Колесников, Д.А. Кудабасев, В.А. Черных Моделирование коммутационных переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью	70
Е.Т. Оразов, К.К. Тохтибакиев, А.А. Саухимов Имитационное моделирование потерь электроэнергии в тяговых сетях	78
Д.Ж. Сатыбалдина Разработка методов оценки ущерба от воздействия угроз информационной безопасности	87
А.О. Юсупова, А.А. Бектасова Анализ спектра частотной и фазовой модуляции несущих сигналов радиотехнической цепи	94
А. Нуржауов Исследование колебаний масс машинно-тракторного агрегата в частотной области.	
Наши авторы	150
Правила для авторов	152

АНАЛИЗ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-300-240-1.

О.А. Андреева, А.В. Нефтисов

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Турбина К-300-240-1 изготовлена на параметры пара $P=23,5$ МПа и $T=833/838$ К, давление пар в конденсаторе $P_k=3,4$ кПа, температуру питательной воды $T_0=538$ К (при полной нагрузке). Эксплуатируется турбина с начальными параметрами пара $P_0=23,5$ МПа и $T_0=813/818$ К в блоке с прямоточным котлом. Турбина состоит из трёх цилиндров. Первый цилиндр - высокого давления - ЦВД. Второй цилиндр - совмещающий часть среднего давления (ЧСД) и один поток части низкого давления (ЧНД) - ЦСНД. Третий - двухпоточный цилиндр низкого давления - ЦНД[1].

Длина последней рабочей лопатки ЧНД 960 мм, а средний диаметр 2480 мм. Омываемая площадь рабочей лопаткой 7,48 м². Последняя ступень обеспечила сооружение турбины для $P_k \approx 3,5$ кПа из расчёта одного выхода мощностью на 100 МВт, а для более высокого прогнводавления - 130 МВт на один выход. Удельная паровая нагрузка последнего рабочего колеса при $P_k = 3,5$ кПа - 25 т/(м²·ч). Такая же ступень турбин К-800-240-3 $P_k = 3,5$ кПа эксплуатируется с удельной паровой нагрузкой примерно 31,5 т/(м²·ч). Выходная кинетическая энергия $h_k \approx 35$ кДж/кг.

С момента ввода в эксплуатацию турбины, систематически совершенствовались основные узлы паротурбинной установки К-300-240-1. Главное направление работ - доводка всех узлов до состояния безупрочной надёжности, повышения их долговечности и экономичности.

Следствие выполненных работ - увеличение пропускной способности проточной части турбины от 975 до 1050 т/ч и повышение максимальной мощности турбины с 310 до 330 МВт. Основной критерий ограничения максимальной мощности - давление пара на входе в ЧНД, которое не должно превышать 0,264 МПа.

В результате выполненных работ достигнуты высокие технико-экономические показатели турбоустановок К-300-240-1:

- нормативный удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии (q_b) - 7862,8 и 8122,4 кДж/(кВт·ч) при нагрузках 300 и 120 МВт;

-наработка на отказ - 22037 часов;

-коэффициент технического использования - 0,8982;

-коэффициент готовности - 0,9988.

– снижение удельных капитальных вложений на единицу вводимой номинальной мощности 531 USD/кВт против 1217 USD/кВт (например на ГРЭС по данным РУП «Белничиэнергопром»). Абсолютная экономия капитальных вложений составляет при этом более 9,91 млн. долларов США;

– снижение удельного расхода теплоты на турбину на 217,7 кДж/(кВт·ч), вследствие чего:

а) уменьшается удельный расход топлива на 8 г/(кВт·ч);

б) обеспечивается экономия топлива в размере 12 тыс. т/год на одном энергоблоке и 96 тыс. т/год при модернизации всех турбин электростанции.

В целом, полная модернизация паровых турбин К-300-240, как и модернизация ЧНД, – одно из наиболее эффективных энергосберегающих мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косяк Ю.Ф. Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ. – Энергоиздат. – 1982. – 272 с.
2. Бойко Е.А. Баженов К.В. Грачев П.А. Тепловые электрические станции. – Красноярск. – 2006. – 251 с.
3. Щегляев А.В. Паровые турбины. – Энергоатомиздат. – 1993. – 331 с.
4. Огурцова А.П. Рыжкова В.К. Паровые турбины. – 1991. – 243 с.

Түйіндеме

Мақалада К-300-240-1 турбинасының кезенді моделдендірілуі сипатталды және моделдіру дейінгі және кейінгі көрсеткішінің сомыстырмашы анализі көрсетілген.

Resume

In article stage-by-stage modernization of the turbine K-300-240-1 is described and the comparative analysis of indicators before modernization is carried out.

Исходно-номинальный УРТ на отпущенную электроэнергию энергоблоком с турбиной К-300-240-6МР оценивается при сжигании природного газа – 303,0 г/(кВт·ч); мазута – 307,0 г/(кВт·ч). Оценка эффективности модернизации паровых турбин К-300-240 после проведенного анализа представлена в таблице 2.

Таблица 2
Оценка эффективности модернизации паровых турбин К-300-240

Тип турбины	Исходно-номинальный УРТ на отпущенную электроэнергию в блоках зависимости от вида сжигаемого топлива, г/(кВт·ч)		Экономия топлива при работе с установленной мощностью 5000 ч/год, т/год
	газ	мазут	
К-300-240-1	311,0*	315,5*	-
К-300-240-1М	305,0*	309,0*	9 000
К-300-240-6МР	303,0**	307,0**	12 000

Важнейшая характеристика эффективности проточной части паровой турбины – сохранение экономичности в межремонтный период. Основное изменение экономичности имеет место в первый год эксплуатации. Для оценки изменения экономичности модернизированной турбины в межремонтный период электростанция и ОАО «Белэнергоремналадка» провели испытания по определению диаграммных КПД ЦВД ($\eta_{oi}^{ЦВД}$) и ЦСД ($\eta_{oi}^{ЦСД}$) через 13 месяцев после модернизации. На момент испытаний модернизированная турбина отработала 8647 часов при 15 пусках и остановах. По данным испытаний за этот период снижение $\eta_{oi}^{ЦВД}$ составило 0,81%. При этом максимальное значение КПД составляет 86,39%, что практически соответствует гарантии ЛМЗ для модернизированной турбины – 86,6%. Снижение $\eta_{oi}^{ЦСД}$ турбины составило 1,14%. Абсолютная величина $\eta_{oi}^{ЦСД}$ после года эксплуатации находится на уровне 93,8%. После модернизации $\eta_{oi}^{ЦСД}$ оценивался в 94,42% при гарантии 94,23%.

Выводы:

- Модернизация проточной части турбины привела к таким положительным эффектам как:
- увеличение номинальной мощности энергоблока на 15 МВт с 300 до 315 МВт;
 - увеличение вращающегося резерва мощности в энергосистеме на 15 МВт при гарантийной ОАО «Силовые машины» максимально длительной мощности турбины 330 МВт;
 - увеличение срока службы турбины на 40 лет;