

DOI:

Турбогенератор ТВВ-315-2У3 – решение по замене турбогенераторов ТГВ-300 и ТВВ-300, выработавших свой ресурс

- **Чириков А. В.**, НПО “ЭЛСИБ” ПАО, Новосибирск
- **Мозгов А. О.**, НПО “ЭЛСИБ” ПАО, Новосибирск
- **Артемов А. В.**¹, НПО “ЭЛСИБ” ПАО, Новосибирск

Изложены результаты разработки турбогенератора ТВВ-315-2У3 с водородно-водяным охлаждением номинальной мощностью 315 МВт. Приведены основные особенности конструкции, технические параметры, габаритно-присоединительные размеры, диаграмма мощности, результаты тепловых испытаний турбогенератора. Турбогенератор ТВВ-315-2У3 предназначен для широкого применения как при реализации проектов модернизации и замен, выработавших свой ресурс генераторов типа ТГВ, ТВВ, так и при строительстве новых энергоблоков теплоэлектростанций.

Ключевые слова: турбогенератор типа ТВВ-315-2У3, водородно-водяная система охлаждения, замена турбогенераторов типа ТГВ, ТВВ.

В мае 2025 г. на НПО “ЭЛСИБ” были успешно завершены заводские испытания головного образца турбогенератора с водородно-водяным охлаждением ТВВ-315-2У3. Результаты испытаний подтвердили выполнение всех заявленных технических параметров генератора. Этот проект – реализация заключенного НПО “ЭЛСИБ” ПАО контракта на поставку турбогенератора ТВВ-315-2У3 на Рефтинскую ГРЭС для замены турбогенератора ТГВ-300-2У3 (ст. № 1, был введен в эксплуатацию в 1994 г.) производства ГП “Электротяжмаш” (г. Харьков). На Рефтинской ГРЭС эксплуатируются шесть турбогенераторов типа ТГВ-300-2У3, большинство из которых было изготовлено в 70-е годы прошлого века и имеют большую наработку. Крайне маловероятно, что в перспективе турбогенераторы производства ГП “Электротяжмаш” будут поставляться и ремонтироваться заводом-изготовителем на российских ГРЭС.

Авторы в первую очередь ставили перед собой цель донести до профессионального сообщества энергетиков России информацию о появлении альтернативы и возможности выбора отечественного завода-изготовителя при замене турбогенераторов ТГВ-300 производства ГП “Электротяжмаш” (г. Харьков) на турбогенераторы типа ТВВ-315 (-320, -330) производства НПО “ЭЛСИБ” ПАО или АО “Силовые машины” (завод “Электросила”), которые по энергетическим и массогабаритным па-

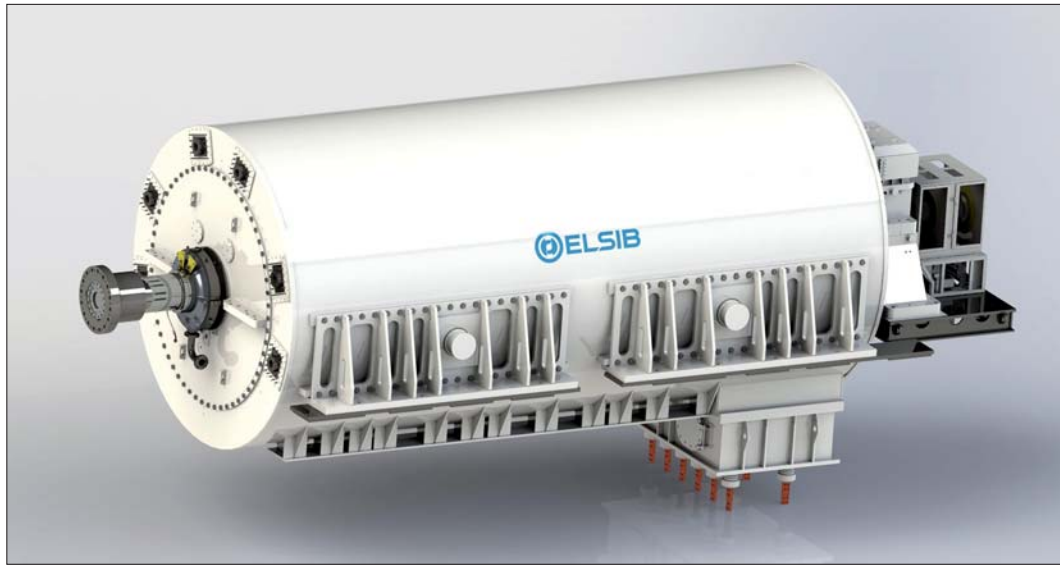
раметрам превосходят машины типа ТГВ (см. далее в табл. 2).

Проект замены оборудования на Рефтинской ГРЭС осуществляется ООО “Сибирская генерирующая компания” в рамках реализации программы КОММод – в дальнейших планах компании замена оборудования на нескольких энергоблоках станции. Согласно техническому заданию, турбогенератор ТВВ-315-2У3 будет устанавливаться на существующий фундамент заменяемого генератора, без значительных изменений основной конструкции фундамента.

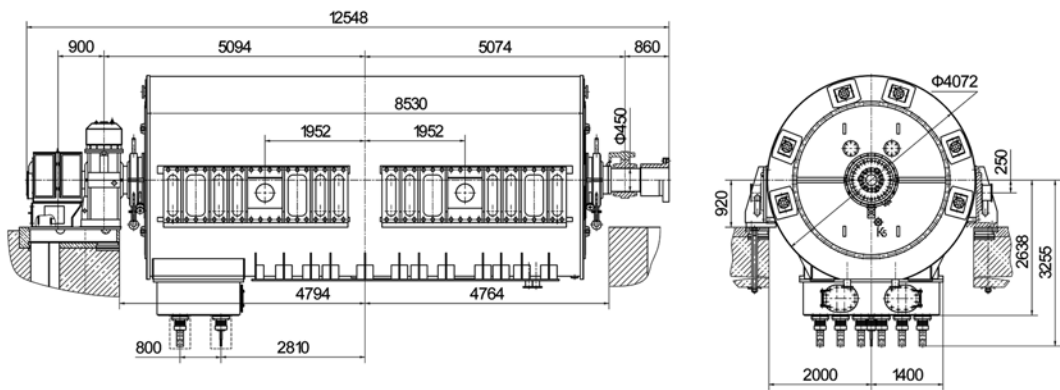
Под незначительной доработкой фундамента подразумевается сохранение верхнего строения фундамента, в том числе использование существующих анкерных колодцев для крепления статора вновь устанавливаемого генератора. Доработка, в частности для установки на фундамент генератора ТГВ-300, заключается в наращивании поперечной балки фундамента под задний подшипник генератора в связи с различиями длины статоров генераторов ТГВ-300 и ТВВ-315-2.

Для НПО “ЭЛСИБ” ПАО выпуск мощных турбогенераторов класса 300 МВт и более не является новой задачей с чистого листа. В советский период инженерами предприятия были успешно решены задачи по проектированию и освоению производства турбогенераторов (ТГ) серии ТВМ с водомасляным охлаждением мощностью 300 МВт (Каширская ГРЭС, 4 ТГ) и 500 МВт (Рефтинская ГРЭС, 5 ТГ). Эти машины имели уникальную, не

¹ Артемов Александр Владимирович: avartemov@elsib.ru



а)



б)

Рис. 1. Турбогенератор ТВВ-315-2У3:

а – 3D-изображение; б – габаритно-присоединительные размеры

имеющую аналогов в мире, конструкцию системы охлаждения статора генератора, основным преимуществом турбогенераторов ТВМ был высокий КПД как при полной, так и частичной нагрузке. У НПО «ЭЛСИБ» ПАО также есть опыт освоения производства и выпуска турбогенераторов ТВВ-500-2Е с водородно-водяным охлаждением по чертежам завода «Электросила», такие машины были изготовлены и поставлены на Славянскую ГРЭС (1988 г., Украина), Экибастузскую ГРЭС-2 (1992 г., Казахстан).

При постановке задачи создания нового турбогенератора для замены выработавших свой ресурс генераторов 300 МВт учитывалось, что энергетикам потребуется генератор с повышением мощности до 315 – 330 МВт. Было принято решение о проектировании турбогенератора с водородно-водяным охлаждением мощностью 330 МВт, который в полной мере будет отвечать техническому заданию заказчика (Рефтинской ГРЭС) и обеспечивать все заявленные технические параметры

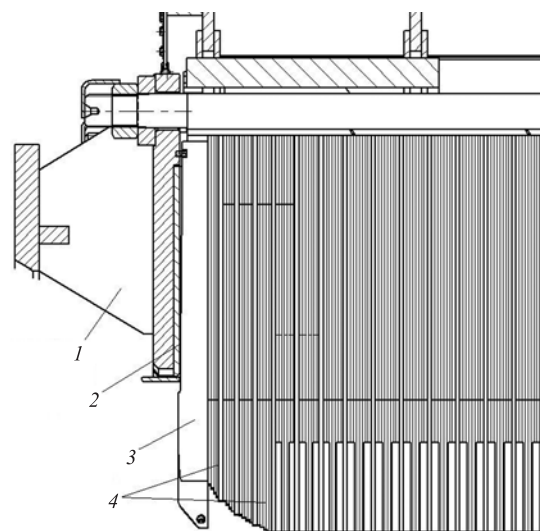


Рис. 2. Торцовая зона сердечника турбогенератора ТВВ-315-2У3:

1 – нажимное кольцо; 2 – медный экран; 3 – нажимной палец; 4 – крайние пакеты

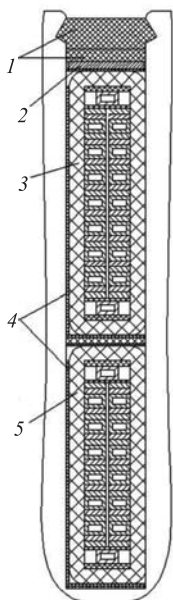


Рис. 3. Разрез паза статора турбогенератора ТВВ-315-2У3:

1 – клин; 2 – прокладка; 3 – стержень верхний; 4 – уплотняющая прокладка; 5 – стержень нижний

требуемого к поставке турбогенератора ТВВ-315-2У3 (рис. 1)

Далее приведены основные особенности и решения, заложенные в конструкцию турбогенератора ТВВ-315-2У3, технические характеристики, программа и результаты испытаний нового генератора.

Турбогенератор ТВВ-315-2У3 выполнен с непосредственным охлаждением обмотки статора дистиллированной водой (дистиллятом) и непосредственным охлаждением обмотки ротора, внешней поверхности ротора и сердечника статора водородом под давлением.

Дистиллят в обмотке статора циркулирует под действием насосов и охлаждается теплообменниками, расположенными вне генератора. Охлаждающий водород циркулирует в генераторе под действием вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается газоохладителями. Циркуляция технической воды в газоохладителях и теплообменниках осуществляется насосами, расположенными вне генератора. Газоохладители генератора встроены в корпус горизонтально, укомплектованы воздушными дренажами для удаления воздуха из верхней части.

Цилиндрический газонепроницаемый корпус статора выполнен неразъёмным с внутренними поперечными кольцами жёсткости для крепления сердечника и рационального распределения газа по всей длине корпуса. Газоплотность соприкасающихся поверхностей корпуса и наружных щитов обеспечивается резиновым шнуром, приклеенным ко дну канавок в наружных щитах. Для подъёма и установки статора на фундамент с бо-

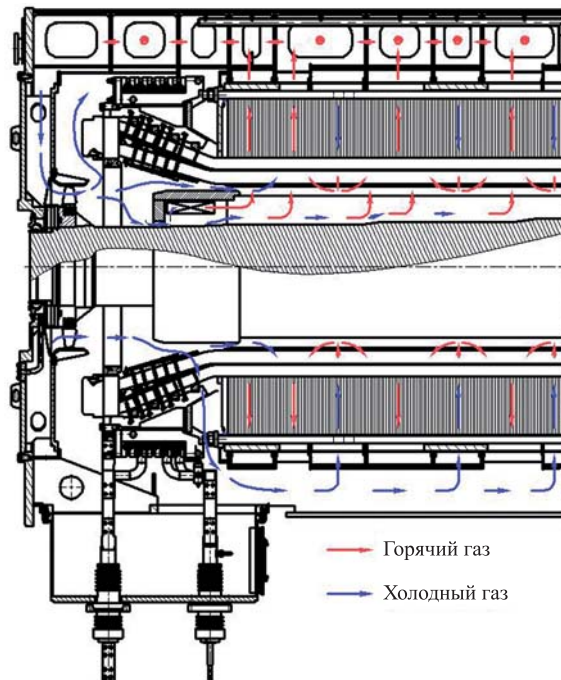


Рис. 4. Схема вентиляции турбогенератора ТВВ-315-2У3

ков статора установлены рым-лапы, снимаемые при транспортировке.

Сердечник статора собирается из изолированных сегментов электротехнической стали с низкими удельными потерями на статорных клиньях и разделён вдоль оси вентиляционными каналами на пакеты. Клинья сердечника статора для уменьшения передачи на корпус колебаний от сердечника соединяются с поперечными стенками корпуса статора с помощью упругого соединения в виде рессоры. Спрессованный сердечник стянут в осевом направлении нажимными кольцами из немагнитной стали.

Зубцовая зона крайних пакетов уплотнена немагнитными нажимными пальцами, установленными между сердечником и нажимными кольцами. Для увеличения монолитности торцевой зоны (рис. 2) турбогенератора, крайние пакеты выполнены клееными. Для демпфирования полей рассеяния лобовых частей обмотки статора и уменьшения потерь и нагревов в крайних пакетах под нажимными кольцами установлены медные экраны.

Обмотка статора трёхфазная двухслойная с укороченным шагом. Стержни обмотки состоят из сплошных и полых элементарных проводников прямоугольного сечения. В полых проводниках циркулирует дистиллят, охлаждающий обмотку. Стержни обмотки выполняются с транспозицией элементарных проводников в пазовой части на 540° (рис. 3). Изоляция обмотки статора класса нагревостойкости “F”. Допустимые температуры по классу нагревостойкости “B”.

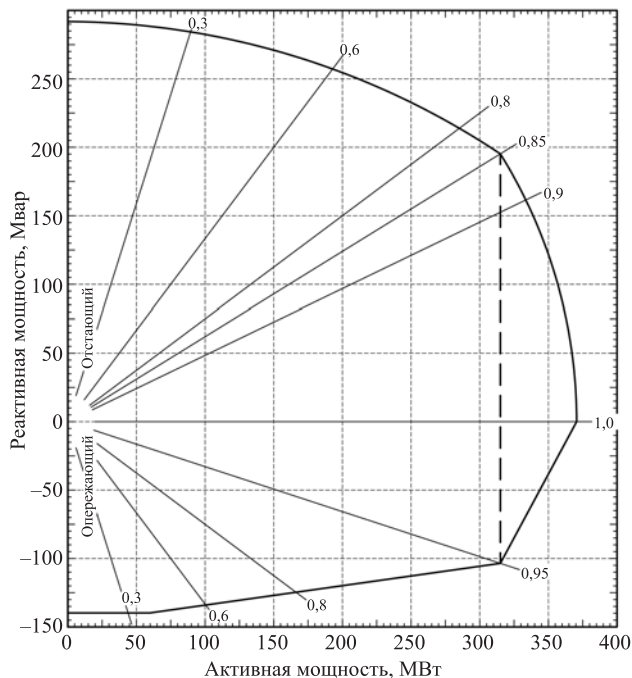


Рис. 5. Диаграмма мощности турбогенератора ТВВ-315-2У3 при номинальных напряжении, частоте и параметрах охлаждающих сред

Линейные и нулевые выводы обмотки выведены из корпуса статора через изоляторы. Число выводов – 9 (3 линейных, 6 нулевых). Выводы обмотки статора размещаются на стороне заднего подшипника турбогенератора.

Во время работы и на остановленной машине влага из турбогенератора удаляется с помощью холодильной машины, которая поставляется в комплекте.

Ротор изготавливается из цельной поковки специальной высококачественной стали, обеспечивающей механическую прочность ротора при всех режимах работы турбогенератора.

Обмотка ротора выполняется из полосовой меди с присадкой серебра. Обмотка ротора имеет непосредственное охлаждение водородом по схеме самовентилиации с забором газа из подпазового канала. Изоляция обмотки ротора класса нагревостойкости “F”. Допустимые температуры по классу нагревостойкости “B”. В пазах обмотка ротора закреплена дюралюминиевыми клиньями. Лобовые части обмотки удерживаются бандажными кольцами из высокопрочной коррозионно-стойкой немагнитной стали. Бандажные кольца имеют одно посадочную конструкцию, посажены на бочку ротора и удерживаются на ней от осевых смещений пружинными шпонками. Под бандажом размещаются медные демпферные сегменты.

Подвод тока возбуждения осуществляется через контактные кольца из специальной стали, насаженные через изоляцию на консольный конец вала. С обеих сторон бочки ротора на вал насажены осевые вентиляторы, которые обеспечивают



Рис. 6. Турбогенератор ТВВ-315-2У3 на испытательном стенде НПО “ЭЛСИБ” ПАО

циркуляцию водорода внутри генератора по замкнутому циклу (рис. 4).

Для предотвращения выхода водорода из корпуса статора на наружных щитах турбогенератора установлены масляные уплотнения вала.

Щёточно-контактный аппарат выполнен со съёмными блоками щеткодержателей с возможностью регулирования степени нажатия на щётки. Между контактными кольцами на валу установлен вентилятор для охлаждения контактных колец и щеток, отвода щеточной пыли из зоны щёточно-контактного аппарата.

Подшипник выносной стоякового типа с самоустанавливающимся вкладышем. Подшипник на стороне колец контактных имеет электрическую изоляцию от фундаментной плиты и маслопроводов. Подшипник на стороне турбины поставляется производителем турбины и конструктивно встроены в её корпус. В случае иной конструкции турбины возможна поставка турбогенератора с двумя подшипниками. Смазка подшипников принудительная от системы маслоснабжения турбины.

Контроль вибрации опор ротора осуществляется системой виброконтроля, поставляемой турбинным заводом. На крышке подшипника предусмотрены места для установки измерительных преобразователей.

НПО “ЭЛСИБ” ПАО гарантирует соответствие турбогенератора требованиям стандартов при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, транспортировки и хранения, установленных техническими условиями. Гарантийный срок эксплуатации при внутригосударственных поставках – не менее трёх лет со дня ввода в эксплуатацию, но не более четырех лет со дня отгрузки с предприятия-изготовителя. Полный назначенный срок службы турбогенератора – 40 лет при соблюдении сроков и объёмов плановых ремонтов. Диа-

грамма мощности турбогенератора ТВВ-315-2У3 представлена на рис. 5.

Конструкция турбогенератора допускает возможность осуществления ремонта статорной обмотки в условиях станции с гарантией сохранения всех параметров после ремонта без каких-либо ограничений.

Далее приведены значения основных параметров турбогенератора ТВВ-315-2У3 в номинальном режиме.

Полная мощность, МВ·А	370,59
Активная мощность, МВт	315,0
Номинальное напряжение, В	20000
Ток, А	10698
Коэффициент мощности	0,85
Частота вращения, об/мин	3000
Частота, Гц	50
Соединение фаз обмотки статора	УУ
Отношение короткого замыкания, отн. ед.	0,44
Переходное индуктивное сопротивление, отн. ед.	0,3
Статическая перегружаемость, отн. ед., не менее	1,68
Коэффициент полезного действия, %	98,75
Номинальный ток возбуждения (расчётное значение), А	2825
Номинальное напряжение возбуждения при 95°С (расчётное значение), В	385
Число выводов:	
линейных	3
нулевых	6
Температура охлаждающей воды на входе в газоохладители, °С:	
минимальная	12
номинальная	32
Температура охлаждающего водорода на выходе из газоохладителей, °С	40

На НПО “ЭЛСИБ” по утверждённой программе ИАЕЛ.651133.001 ПМ были проведены приёмочные испытания и измерения параметров головного турбогенератора ТВВ-315-2У3 по ГОСТ Р 70940-2023:

измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками;

измерение сопротивления изоляции обмотки ротора относительно корпуса;

измерение сопротивления обмоток статора при постоянном токе в холодном состоянии;

измерение сопротивления обмотки ротора при постоянном токе в холодном состоянии;

измерение сопротивления термопреобразователей сопротивления статора при постоянном токе и сопротивления изоляции термопреобразователей сопротивления относительно корпуса и между собой;

измерение полного сопротивления обмотки ротора при переменном токе и испытание на электрическую прочность межвитковой изоляции;

испытание ротора при повышенной частоте вращения 3600 об/мин в течение 2 мин;

определение характеристики и потерь трёхфазного короткого замыкания;

определение характеристики и потерь холостого хода;

испытание изоляции обмотки статора повышенным напряжением, равным $1,3U_n$, в течение 5 мин;

измерение вибрации подшипников;

испытание изоляции обмотки статора относительно корпуса и между фазами переменным напряжением $2U_n + 1000$ В;

испытание изоляции обмотки ротора относительно корпуса десятикратным номинальным напряжением;

проверка подшипниковой изоляции.

Кроме штатного теплоконтроля турбогенератор был дополнительно оснащён специальными

Т а б л и ц а 1

Характеристики теплового состояния турбогенератора ТВВ-315-2У3

Параметр	Метод испытания	Результат испытания	Допустимое значение
Температура обмотки статора, °С	Метод термопреобразователей сопротивления*, при температуре охлаждающего газа 40°С	72	90
Температура сердечника статора, °С		64	120
Температура обмотки ротора, °С	Метод сопротивления**, при температуре охлаждающего газа 40°С	73	120
Уровень вибрации, мкм: сердечника статора корпуса статора	Показания снимались виброизмерителем “Кварц”		
		28	60
		16	30

* Метод термопреобразователей сопротивления – измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивления заложенными в конструкцию обмотки статора.

** Метод сопротивления – расчет температуры по измеренному сопротивлению обмотки.

Таблица 2

Сравнение параметров турбогенераторов типа ТГВ и ТВВ класса 300 – 330 МВт различных производителей

Параметр	ГП “Электротяжмаш” (Харьков)	АО “Силовые машины” (Санкт-Петербург)	НПО “ЭЛСИБ” ПАО (Новосибирск)	
			ТВВ-315-2	ТВВ-330-2
Тип турбогенератора	ТГВ-300	ТВВ-320 (ТВВ-320-2Е)	ТВВ-315-2	ТВВ-330-2
Номинальная мощность, МВт	300	320	315	330
Напряжение, кВ	20,0	20,0	20,0	
КПД, %	98,7	98,75	98,75	
Масса генератора, т	364	340	315	
Масса ротора, т	55,8	55,1	54,7	
Масса статора (монтажная), т	266	201,7	208	
Габаритные размеры, мм:				
длина	16 960	15 915	12548*	
ширина	4150	4700	4950	
высота	2995	5750	4585	

* Длина без возбuditеля.

измерительными датчиками, установленными на элементах торцевой зоны, крайних пакетах сердечника статора, в радиальных каналах статора.

Результаты испытаний турбогенератора ТВВ-315-2У3 на стенде завода (рис. 6) показали, что генератор полностью отвечает заявленным техническим показателям. Из анализа результатов, представленных в табл. 1, видно, что ТВВ-315-2У3 имеет значительные тепловые запасы, обеспечивающие высокую надёжность и перегрузочную способность машины. Уровень вибрации сердечника статора турбогенератора – 28 мкм, при допустимом уровне вибрации 60 мкм, корпуса статора – 16 мкм, при норме 30 мкм.

Показатели надёжности и долговечности турбогенератора ТВВ-315-2У3 приведены далее.

Число пусков-остановов в год / за весь срок службы, не более	330/10 000
Полный назначенный срок службы, лет	40
Коэффициент готовности	0,996
Наработка на отказ, ч	22 000
Ресурс между капитальными ремонтами, лет	8

Результаты тепловых испытаний турбогенератора ТВВ-315-2У3 подтвердили возможность:

нести нагрузку и полноценно соответствовать по техническим параметрам турбогенератору номинальной мощностью 330 МВт;

при выполнении несущественных конструктивных доработок генератора изготовить в габаритах машины ТВВ-315-2У3 турбогенератор с номинальной мощностью 350 МВт.

Сравнение параметров турбогенераторов типа ТГВ и ТВВ класса 300 – 330 МВт различных производителей по коэффициенту полезного дейст-

вия, массе, габаритным размерам представлено в табл. 2.

В настоящее время в производстве НПО “ЭЛСИБ” ПАО находится второй турбогенератор ТВВ-315-2У3 для Рефтинской ГРЭС (замена ТГВ-300 ст. № 4, был введён в эксплуатацию в 1972 г.) и головной турбогенератор ТВВ-350-2У3 для Среднеуральской ГРЭС (замена ТВВ-300-2 ст. № 9, был введён в эксплуатацию в 1969 г.).

Новый турбогенератор ТВВ-315-2У3 с водородно-водяным охлаждением номинальной мощностью 315 МВт стал очередным шагом в расширении номенклатуры предприятия в классе крупных генераторов свыше 300 МВт. Такие машины предназначены для широкого применения в теплоэнергетике как при реализации проектов модернизации и замены выработавших свой ресурс турбогенераторов, так и при строительстве новых энергоблоков теплоэлектростанций. Конструкция турбогенератора ТВВ-315-2У3 позволяет выполнять замену генераторов типа ТГВ-300 и ТВВ-300 с незначительной доработкой фундамента.

Соблюдение этических норм

- Авторы не получали поддержки от какой-либо организации в отношении представленной работы.
- Не было получено никакого финансирования для оказания помощи в подготовке этой рукописи.
- Финансирование для проведения данного исследования получено не было.
- Никаких средств, грантов или другой поддержки получено не было.