

DOI: 10.34831/EP.2023.1099.2.006

Турбогенератор ТВФ-165В-2У3 – альтернатива генераторам ТВВ-165-2, выработавшим свой ресурс

- **Чириков А. В.**, технический директор, НПО “ЭЛСИБ”, г. Новосибирск
- **Мозгов А. О.**, заместитель главного конструктора по проектированию турбогенераторов, НПО “ЭЛСИБ”, г. Новосибирск
- **Артемов А. В.¹**, заместитель директора по продажам, НПО “ЭЛСИБ”, г. Новосибирск

Изложены результаты проектирования турбогенератора ТВФ-165В-2У3 с форсированной водородной системой охлаждения (косвенное охлаждение обмоток статора и непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом) номинальной мощностью 165 МВт. Приведены основные особенности конструкции, технические параметры, габаритно-присоединительные размеры, диаграмма мощности, результаты тепловых испытаний турбогенератора. Турбогенератор ТВФ-165В-2У3 предназначен для широкого применения как при реализации проектов модернизации и замены выработавших свой ресурс генераторов типа ТВ2-150-2, ТВВ-160-2, ТВВ-165-2, так и при строительстве новых энергоблоков тепловых электростанций.

Ключевые слова: турбогенератор типа ТВФ, водородная система охлаждения, ТВФ-165В-2У3, тепловое состояние турбогенератора.

В декабре 2022 г. на Иркутской ТЭЦ-10 был завершён монтаж турбогенератора ТВФ-165В-2У3 (ст. № 2) с водородным охлаждением производства НПО “ЭЛСИБ” (www.elsib.ru). Успешно прошедшие комплексные испытания подтвердили выполнение всех заявленных технических параметров генератора. Турбогенератор ТВФ-165В-2У3 спроектирован и изготовлен для замены выработавших свой ресурс турбогенераторов типа ТВВ-165-2. Необходимо отметить, что замена генераторов типа ТВВ с водо-водородным охлаждением на генераторы типа ТВФ с водородным охлаждением в значительной степени упрощает эксплуатацию и повышает надёжность оборудования за счёт отсутствия в конструкции дистиллированной воды для охлаждения обмотки статора. Ранее в 2021 г. НПО “ЭЛСИБ” изготовлен и отгружен на Назаровскую ГРЭС (ООО “Сибирская генерирующая компания”) головной образец генератора ТВФ-165В-2У3.

В рамках реализации проектов КОММод (ДПМ-2) НПО “ЭЛСИБ” были заключены контракты с ООО “ТД “ЕвроСибЭнерго” на поставку для Иркутской ТЭЦ-10 четырех турбогенераторов ТВФ-165В-2У3: генератор ст. № 2 запущен в эксплуатацию, ст. № 8 отгружен в адрес заказчика в декабре 2022 г., остальные машины ст. № 7, 5 в настоящее время находятся в производстве. Отдельно хочется отметить, что отгруженный турбогене-

ратор ТВФ-165В-2У3 ст. № 8 – юбилейный 900-й турбогенератор, изготовленный на НПО “ЭЛСИБ”.



Турбогенератор ТВФ-165В-2У3 ст. № 2 в машинном зале Иркутской ТЭЦ-10

¹ Артемов Александр Владимирович: avartemov@elsib.ru

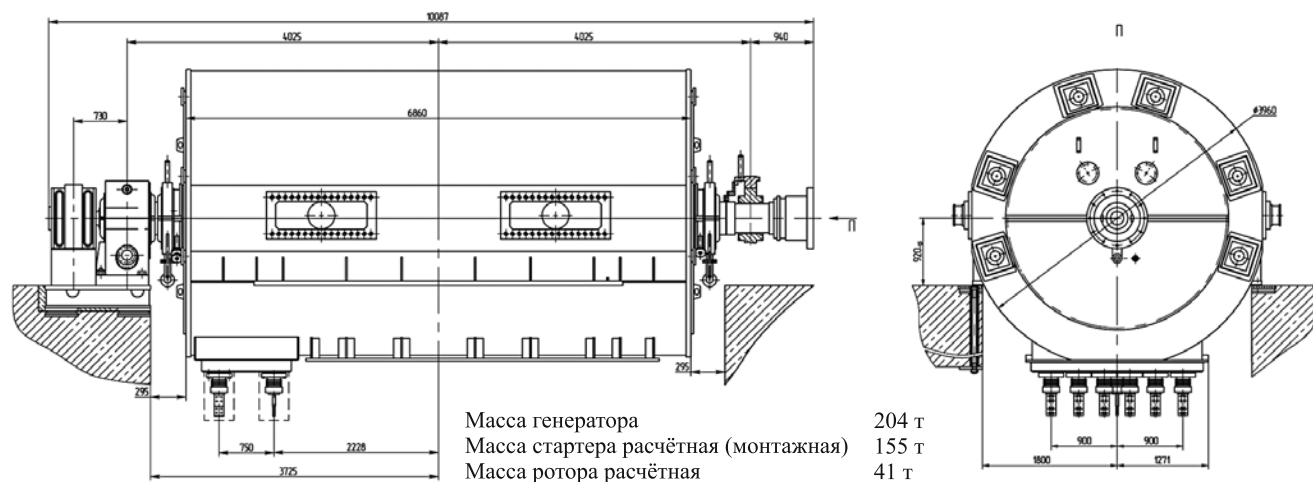


Рис. 1. Турбогенератор ТВФ-165В-2У3, габаритно-присоединительные размеры

Основные особенности конструкции турбогенераторов НПО «ЭЛСИБ» с водородным охлаждением типа ТВФ. Газонепроницаемый неразъёмный корпус генератора представляет собой прочную герметичную конструкцию цилиндрической формы. Плотность соединений корпуса и щитов, а также масляные уплотнения вала ротора исключают утечки водорода. Циркулирующий внутри корпуса генератора водород отводит тепло от активных частей и затем охлаждается водяными газоохладителями, встроенными в корпус генератора горизонтально. Движение водорода внутри турбогенератора обеспечивается осевыми вентиляторами, расположенными с обеих сторон вала ротора.

Спрессованный сердечник статора удерживается нажимными кольцами из немагнитной стали. Зубцовая зона крайних пакетов уплотнена нажимными пальцами из немагнитной стали, установленными между сердечником и нажимными кольцами. Для увеличения монолитности торцевой зоны турбогенератора три крайних пакета выполняются склеенными. Для демпфирования полей рассеяния лобовых частей обмотки статора, снижения потерь и нагревов в крайних пакетах сердечника статора под нажимными кольцами установлены экраны в виде медных колец.

Обмотка ротора имеет непосредственное охлаждение водородом с раздачей его из подпазового канала. Изоляция стержней – терморезистивная типа «Монолит-4» класса нагревостойкости F, допустимые превышения температур по классу нагревостойкости В. Тепловой контроль обмотки статора осуществляется термометрами сопротивления, установленными в пазах сердечника статора. Турбогенераторы ТВФ отличаются повышенной маневренностью, возможностью длительной работы с номинальной нагрузкой в режиме потребления реактивной мощности.

В советский период основную часть номенклатуры НПО «ЭЛСИБ» составляли турбогенераторы серии ТВФ номинальной мощностью от 60 до 120 МВт с форсированной водородной системой охлаждения (косвенное охлаждение обмоток статора и непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом). Подавляющее большинство генераторов теплоцентралей России составляют машины именно этого типа. Именно эта продукция принесла широкую известность НПО «ЭЛСИБ» – суммарная установленная мощность поставленных на теплоэлектростанции турбогенераторов серии ТВФ составила более 63 ГВт (установленный парк свыше 800 шт.).

Водород – это уникальная охлаждающая среда для вращающихся машин в силу сочетания в себе трёх необходимых свойств: низкой плотности, высокой удельной теплоёмкости и теплопроводности. Применение водорода в качестве охлаждающей среды в турбогенераторах позволяет создавать компактные, высокоэффективные, надёжные и долговечные конструкции.

За последние десятилетия номенклатура предлагаемых заказчикам турбогенераторов НПО «ЭЛСИБ» была существенно расширена – изготовлены и введены в эксплуатацию генераторы номинальной мощностью 125, 160, 180, 220 МВт. При разработке турбогенератора ТВФ-165В-2У3 (рис. 1) были реализованы основные требования заказчика к новой машине: напряжение статора 18 кВ, установка нового турбогенератора на существующий фундамент с незначительной доработкой. В конструкции ТВФ-165В-2У3 был использован ряд конструктивных и технических решений, ранее опробованных при создании генераторов ТВФ-160-2У3 и ТВФ-220-2У3. Для улучшения формы ЭДС и индукции в воздушном зазоре генератора зубцовая зона ротора выполнена с разновысокими пазами. Двадцатилетний фактический опыт эксплуатации ранее выпущенных машин с воз-

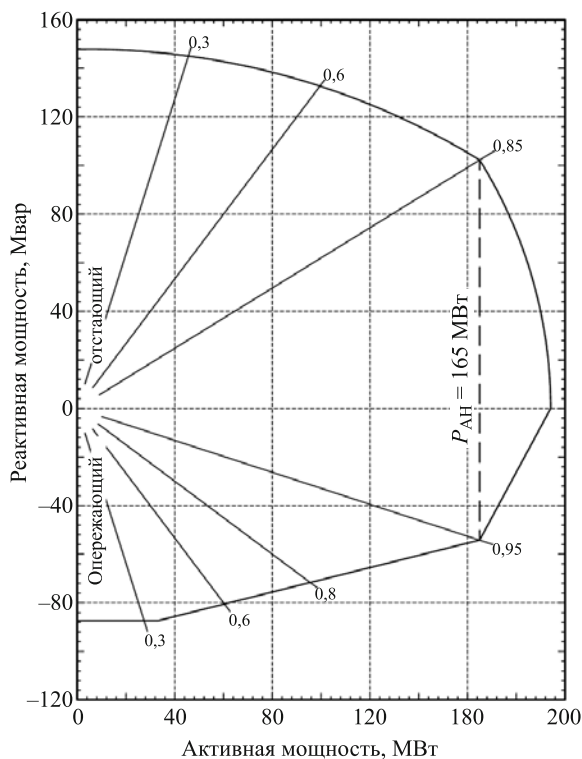


Рис. 2. Диаграмма мощности турбогенератора ТВФ-165В-2У3 (при номинальных напряжении, частоте и параметрах охлаждающих сред)

душным охлаждением мощностью от 50 до 160 МВт, исследовательские испытания на стенде завода и на электростанциях полностью подтвердили эффективность работы системы охлаждения с подпазовым каналом и радиально-аксиальными каналами в обмотке ротора. Сегодня мы внедряем эту систему в новое поколение турбогенераторов с водородным охлаждением.

Такая система охлаждения применена для головного турбогенератора с водородным охлаждением ТВФ-220-2У3, который успешно работает на Красноярской ТЭЦ-3. Как показала практика, более интенсивное охлаждение привело к появлению существенного запаса по нагревам активных элементов, что в свою очередь безусловно обеспечит дли-

тельную безаварийную эксплуатацию генератора. В дальнейшем, при увеличении давления водорода в корпусе генератора, это позволит увеличить мощность машины на 10%. Изоляция статорной обмотки турбогенератора ТВФ-165В-2У3 выполнена современными изоляционными материалами. Это позволило снизить толщину изоляции на 20 – 25% для обеспечения хорошего охлаждения стержней статора и при этом сохранить высокую электрическую прочность. Для ТВФ-165В-2У3 было разработано новое полупроводящее покрытие в пазовой части, улучшающее пропитку изоляции. Автоматизированный контроль режимов пропитки и запечки на участке “Монолит-4” позволил обеспечить гарантированное высокое качество изоляции стержней.

Как и все выпускаемые НПО “ЭЛСИБ” турбогенераторы, ТВФ-165В-2У3 обладает хорошей ремонтпригодностью. Обмотка статора генератора выполнена по классической технологии вакуумно-нагнетательной пропитки изоляции и запечки стержней обмотки статора с последующей укладкой в пазы статора. Применение именно такой технологии с отдельной подготовкой и монтажом стержней обмотки статора обеспечивает высокую ремонтпригодность и даёт возможность выполнения капитального ремонта непосредственно в условиях электростанции в течение всего нормативного срока жизни машины. Опыт эксплуатации на ТЭС России за последнее десятилетие показал явное преимущество использования именно классической технологии вакуумно-нагнетательной пропитки обмотки статоров по сравнению с применением в конструкции генераторов сухой изоляции стержней с последующей вакуумно-нагнетательной пропиткой и запеканием статора с обмоткой по технологии “Global VPI”, которая фактически делает обмотку статора турбогенератора неремонтпригодной в условиях станции.

Далее приведены значения основных параметров турбогенератора ТВФ-165В-2У3 (номинальный режим), а на рис. 2 – диаграмма мощности турбогенератора.

Характеристики теплового состояния турбогенератора ТВФ-165В-2У3

Параметр	Метод	Результат испытания	Допустимое значение
Температура обмотки статора, °С	Метод термопреобразователей сопротивления* при температуре охлаждающего газа 40°С	73,0	120
Температура сердечника статора, °С		71,0	120
Температура обмотки ротора, °С	Метод сопротивления**, при температуре охлаждающего газа 40°С	60,0	120
Уровень вибрации сердечника статора, мкм		38	60

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

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

Активная мощность, МВт	165
Полная мощность, МВ·А	194,12
Напряжение, В	18 000
Ток статора, А	6226
Коэффициент мощности	0,85
Частота вращения, об/мин	3000
Частота, Гц	50
Отношение короткого замыкания, отн. ед.	0,5
Переходное индуктивное сопротивление X_d' , отн. ед.	0,236
Статическая перегружаемость, отн. ед.	1,8
Коэффициент полезного действия, %	98,5
Ток ротора номинальный (расчётное значение), А	1560
Напряжение ротора номинальное при 95°C (расчётное значение), В	340
Соединение фаз	Двойная звезда
Число выводов:	
линейных	3
нулевых	6
Температура охлаждающего водорода на входе в генератор, °С	40
Избыточное давление водорода в корпусе, кПа (кгс/см ²)	196 (2,0)
Температура охлаждающей воды на входе в газоохладитель, °С	32
Расход охлаждающей воды через газоохладитель, м ³ /ч	300
Расход масла на один подшипник, л/мин	300
Давление масла в подшипнике, избыточное, кПа	29 – 49
Наименьшая температура масла на входе в подшипник, °С	35
Масса, т	204

Результаты испытаний турбогенератора ТВФ-165В-2У3 на стенде завода показали, что ге-

нератор полностью отвечает заявленным техническим показателям. После анализа результатов, представленных в таблице, видно, что ТВФ-165В-2У3 имеет значительные тепловые запасы, обеспечивающие надёжность и перегрузочную способность машины на высоком уровне. Такие показатели достигнуты за счёт внедрения технических решений, направленных на улучшение передачи тепла от медных проводников обмотки статора к охлаждающему газу и за счёт применения новой системы непосредственного газового охлаждения обмотки ротора. Уровень вибрации сердечника статора турбогенератора – 38 мкм при допустимом уровне вибрации 60 мкм

Показатели надёжности и долговечности турбогенератора представлены далее.

Полный назначенный срок службы, лет	40
Период между капитальными ремонтами, лет	8 (первый ремонт с выемкой ротора проводится через 1 год после сдачи турбогенератора в эксплуатацию)
Коэффициент готовности, не менее	0,996
Наработка на отказ, ч	22 000

Новый генератор номинальной мощностью 165 МВт стал очередным шагом в расширении номенклатуры генераторов НПО “ЭЛСИБ” с водородным охлаждением. Эти машины предназначены для широкого применения как при реализации проектов модернизации и замен генераторов ТВ2-150-2, ТВВ-160-2, ТВВ-165-2, так и при строительстве новых энергоблоков теплоэлектростанций.