

УДК 621.313.322

**Владислав Дмитриевич Битней**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», студент кафедры ЭС института электроэнергетики и электротехники, Россия, Москва, e-mail: BitneyVD@mpei.ru

**Николай Николаевич Смотров**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры ЭС института электроэнергетики и электротехники, Россия, Москва, e-mail: SmotrovNN@mpei.ru

**Александр Андреевич Тимофеев**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», аспирант кафедры ЭС института электроэнергетики и электротехники, Россия, Москва, e-mail: TimofeevAAn@mpei.ru

**Андрей Владимирович Охлопков**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», ассистент кафедры ТОТ ИТАЭ, Россия, Москва, e-mail: OkhlopkovAV@mpei.ru

## Влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ<sup>1</sup>

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Необходимость работы турбогенераторов в режиме потребления реактивной мощности связана с дефицитом компенсирующих устройств в сети. В последнее время участились аварии, связанные с продолжительной работой генераторов в режиме малых уровней возбуждения, что является необходимым условием для потребления генератором реактивной мощности. Цель исследования заключается в оценке влияния режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ.

**Методы и материалы.** Источником сведений о техническом состоянии турбогенератора послужили данные, полученные из эксплуатационной и ремонтной документации, протоколов электрических и тепловых испытаний, технических отчетов с результатами комплексных диагностических обследований турбогенератора.

**Результаты.** Обследованы сердечники генераторов серии ТЗФ. При обследованиях ни разу не выявлены зазоры между нажимными пальцами и поверхностью крайних пакетов, что указывает на отсутствие существенной кривизны крайних пакетов сердечника. В ходе исследования температуры по термопреобразователям сопротивления ТЗФП-110-2МУЗ выявлено, что с увеличением потребления реактивной мощности температура обмоток и активной стали сердечника статора турбогенератора уменьшается и в основном не превышает верхних предельных уставок, в режиме выдачи реактивной мощности выявлена противоположная зависимость. Установлено, что влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние ТЗФП-110-2МУЗ при работе в установившихся режимах в пределах заводской PQ-диаграммы минимально. В сердечнике статора турбогенератора рассматриваемой серии за счет значительного усовершенствования конструкции и технологии изготовления торцевых зон достигнута высокая устойчивость зубцов крайних пакетов к эксплуатационным нагрузкам.

**Выводы.** С точки зрения практической значимости турбогенераторы серии ТЗФ допускаются к применению для потребления реактивной мощности. В качестве дальнейшего направления исследований планируется рассмотреть работу турбогенераторов в маневренных режимах с переходом от выдачи реактивной мощности к ее потреблению и обратно.

**Ключевые слова:** электрическая станция, сердечник статора турбогенератора, регулирование реактивной мощности, обмотка статора

**Vladislav Dmitrievich Bitney**

National Research University "MPEI", Student, Electric Power Stations Department, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, e-mail: BitneyVD@mpei.ru

**Nickolay Nickolaevich Smotrov**

National Research University "MPEI", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Electric Power Stations Department, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, e-mail: SmotrovNN@mpei.ru

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методики выбора оптимальных режимов по реактивной мощности для генерирующих установок ГТУ и ПГУ с помощью цифрового расчетного аппарата» при поддержке гранта НИУ МЭИ на реализацию программ научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

The study has been carried out within the framework of the project "Development of the methodology for selecting optimal reactive power modes for generating units of GTU and CCGT using a digital calculation apparatus" with the grant of the National Research University MPEI for implementation of the research programs "Priority 2030: Future Technologies" in 2022–2024.

**Alexander Andreevich Timofeev**

National Research University "MPEI", Graduate Student, Electric Power Stations Department, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, e-mail: TimofeevAA@mpei.ru

**Andrey Vladimirovich Okhlopkov**

National Research University "MPEI", Assistant, Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering Department, Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow, e-mail: OkhlopkovAV@mpei.ru

## Effect of Reactive Power Consumption Mode on Technical Condition of T3FP-110-2MU3 Turbogenerator

### Abstract

**Background.** The necessity of turbogenerators operation in the reactive power consumption mode is determined by the shortage of compensating devices in the network. Recently, accidents associated with generators long-term operation at low levels of excitation have become more frequent, which is a prerequisite for the consumption of reactive power by the generator. The purpose of this research is to assess the effect of the reactive power consumption mode on the technical condition of the T3FP-110-2MU3 turbogenerator.

**Materials and methods.** The source of information about the technical condition of the turbogenerator is the data obtained from the operating and repair documentation, electrical and thermal tests protocols, technical reports with the results of comprehensive diagnostic examinations of the turbogenerator.

**Results.** The cores of T3F series generators have been examined. No gaps between the pressure fingers and the surface of the edge packages have ever been detected during examinations, which indicates the absence of significant curvature of the extreme core packages. During the study of temperature by T3FP-110-2MU3 thermal resistance converters, it is found out that with an increase of reactive power consumption, the temperature of the windings and the active steel of the stator core of the turbo generator decreases and it does not exceed the upper warning settings in the mode of reactive power output, the opposite dependence is visible. It is established that the influence of the reactive power consumption mode on the technical condition of the T3FP-110-2MU3 when operating in steady-state modes within the factory PQ-diagram is minimal. In the stator core of the turbogenerator under consideration, high resistance of the teeth of the extreme packages to operational loads has been achieved, due to significant improvements in the design and manufacturing technology of the end zones.

**Conclusions.** From the point of view of practical significance, T3F series turbogenerators are allowed to be used for reactive power consumption. As a further direction of research, it is planned to consider the operation of turbogenerator in maneuverable modes with the transition from the issuance of reactive power to its consumption and vice versa.

**Key words:** electric power plant, turbogenerator stator core, reactive power control, turbogenerator, operation, stator winding

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.034-042

**Введение.** Проблема избытка реактивной мощности в энергосистеме Московского региона существует уже достаточно длительное время и обусловлена рядом причин объективного характера:

– общим снижением энергопотребления в регионе (закрытие в 2000-е годы расположенных на территории Москвы предприятий) и, как следствие, работой ненагруженных ЛЭП как источников реактивной мощности;

– постепенной заменой воздушных линий (ВЛ) электропередач на кабельные с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющие существенно большую удельную емкость<sup>2</sup>;

– недостаточным количеством и мощностью существующих средств компенсации реактивной мощности на подстанциях Московского

региона (в том числе, из-за демонтажа синхронных компенсаторов) [1, 2].

Избыток реактивной мощности в энергосистеме вызывает общее повышение напряжения в системе и приводит к недопустимо высокому уровню величины  $U$  в отдельных ее точках, что влечет за собой снижение надежности работы и повышение аварийности электрооборудования потребителей (в том числе, из-за роста нагрева, вызванного увеличением потребляемого тока по сравнению с номинальным, и, как следствие, ускорения процессов старения и износа изоляции).

Одним из путей решения данной проблемы является перевод эксплуатирующихся на электростанциях генерирующих компаний турбогенераторов в режим потребления реактивной мощности (недовозбуждения). В настоящее время большинство турбогенераторов ТЭС эксплуатируются преимущественно в режимах выдачи реактивной мощности согласно ГОСТ 533-2000,

<sup>2</sup> Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2012. – 376 с.

РД 34.45.501-88, СО 153-34.45.501<sup>3</sup> (работа в режимах потребления ограничена действием устройств ограничения минимального возбуждения (ОМВ)).

Следует отметить, что турбогенераторы, как правило, оснащены быстродействующими системами возбуждения, способными отреагировать на возмущения в сети в течение долей миллисекунд и действовать в течение одной полувольты периода электрического напряжения. В объем их функций входят как нормализация напряжения в узлах электрической сети в нормальном режиме работы, так и компенсация мгновенных изменений напряжения в электрической сети при аварийных возмущениях или переходных процессах для поддержания значения напряжения близким к номинальному [3, 4].

**Методы исследования.** При анализе влияния режимов работы оборудования ТЭС были использованы:

1) паспортные данные генераторов, результаты нормативных испытаний, проведенных в соответствии с «Объемом и нормами испытания электрооборудования» (электрические, тепловые и т.д.);

2) карты допустимых нагрузок генераторов;

3) сведения об отказах и повреждениях турбогенераторов за указанный период, о количестве unplanned остановов энергоблоков по состоянию вышеперечисленного оборудования в год и за наблюдаемый период, о длительности периодов простоя энергоблоков при проведении аварийно-восстановительных ремонтов указанного оборудования, а также данные по фактической длительности наработки энергоблоков за наблюдаемый период эксплуатации;

4) данные по режимам работы генераторов за указанный период:

- сведения о длительности, периодичности и нагрузке при работе турбогенераторов в режимах, отличающихся от номинальных по активной и реактивной мощности, уровням напряжений, по месяцам;

- данные по вибромониторингу турбогенераторов;

- данные по тепловому состоянию турбогенераторов;

- результаты комплексных обследований турбогенераторов;

5) нормативно-техническая документация по теме участия генерирующего оборудо-

вания в режимах регулирования реактивной мощности<sup>4</sup>.

В данном исследовании были собраны сведения о техническом состоянии сердечника статора турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ с косвенным воздушным охлаждением [5]. При проведении ретроспективного анализа технической документации наибольшее количество информации было получено из протоколов и технических отчетов по результатам комплексных диагностических обследований рассматриваемых турбогенераторов за период с 2008 по 2021 г.

При изучении технической документации в первую очередь анализировались результаты контроля состояния зубцов сердечника при проведении капитальных ремонтов и регистрировались данные о выявленных случаях ослабления прессовки и распушения зубцов, о наличии трещин в листах активной стали, обломах и выкрашиваниях ослабленных листов, подсчитывалось количество зубцов, требующих ремонта путем установки специальных уплотняющих клиньев или стеклотекстолитовых вставок [6]. Параллельно изучались сведения о наличии либо отсутствии местных замыканий между листами сердечника в местах распрессовок и выкрашиваний, а также данные о повреждениях корпусной изоляции обмотки статора ослабленными и обломившимися сегментами [7].

Общий вид турбогенератора серии ТЗФ, предназначенного для выработки электроэнергии при непосредственном соединении с паровыми турбинами на тепловых электростанциях, приведен на рис. 1<sup>5</sup>.

Сердечник статора, состоящий из сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм с низкими удельными потерями, собран на продольных ребрах статора и вдоль оси разделен вентиляционными каналами на пакеты. Торцевая зона сердечника статора защищена

<sup>3</sup> ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия; РД 34.45.501-88, СО 153-34.45.501. Типовая инструкция по эксплуатации генераторов на электростанциях.

<sup>4</sup> Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть. Ч. 1. – М.: ОРГРЭС, 2002; Сборник информационных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть. Приложение к «Сборнику распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем». – М.: ОРГРЭС, 2002; СТО 17330282.27.01-2006. Тепловые электрические станции. Методики оценки состояния основного оборудования. Утв. Приказом № 200 ОАО «РАО «ЕЭС России» от 28.03.2007; Циркуляр Ц-06-96 «О повышении надежности турбогенераторов мощностью 100–800 МВт, работающих в режимах недо возбуждения». – М.: Департамент науки и техники РАО «ЕЭС России», 1996.

<sup>5</sup> СТО 70238424.29.160.20.010-2009. Турбогенераторы серии ТЗФ. Групповые технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования. Дата введ. 03.08.2009.

от потоков рассеяния медными экранами, что позволяет расширить диапазон нагрузки при работе генератора с потреблением реактивной мощности<sup>6</sup>.

Обмотка статора трехфазная, стержневая, двухслойная с транспозицией проводников в пазовой части. Изоляция обмотки статора терморезистивная класса F, допустимые температуры по классу B.

Обмотка ротора выполнена из полосовой меди с присадкой серебра и имеет непосредственное охлаждение воздухом, проходящим по вертикальным выфрезерованным в катушках обмотки ротора каналам и поступающим из подпазовых каналов.

В табл. 1 представлены паспортные данные турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ, произведенного заводом «Электросила» и введенного в эксплуатацию в 2008 г.

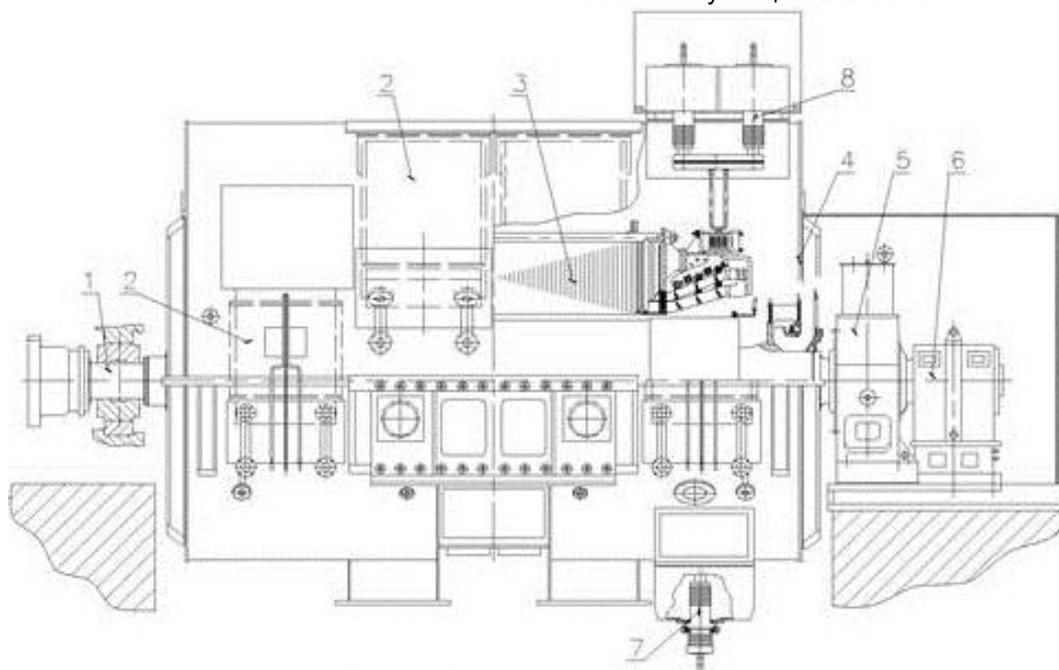


Рис. 1. Общий вид турбогенератора ТЗФП-110-2: 1 – ротор; 2 – воздухоохладитель; 3 – статор; 4 – кожух воздухохладительный; 5 – подшипник; 6 – щеточный аппарат; 7 – концевой вывод; 8 – нулевой вывод

Таблица 1. Паспортные данные турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ

Параметр	Обозначение, размерность	ТЗФП-110-2МУЗ
Номинальная активная мощность	$P$ , МВт	110
Номинальная полная мощность	$S$ , МВА	137,5
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,8
КПД (в номинальном режиме)	$\eta$ , %	98,4
Статическая перегрузаемость	отн. ед.	1,77
Номинальное линейное напряжение статора	$U_1$ , кВ	10,5
Номинальный ток обмотки статора	$I_1$ , кА	7,561
Номинальное напряжение возбуждения	$u_2$ , В	190
Номинальный ток возбуждения	$i_2$ , А	1,720

Параметр	Обозначение, размерность	ТЗФП-110-2МУЗ
Номинальная частота вращения	$n$ , об/мин	3,000
Охлаждение	–	Воздушное
Толщина (мм) / марка активной стали	–	0,5/3,405
Длина активной стали	$L_a$ , мм	2,940
Диаметр расточки статора	$D_1$ , мм	1,215
Число пазов статора	$z_1$	60
Сопряжение фаз обмотки статора	–	YY
Число параллельных ветвей обмотки статора	$a$	2
Класс нагревостойкости изоляции обмотки статора	–	F
Допустимая температура обмотки статора по термопреобразователю сопротивления (ТС)	$\theta_{обм.с}$ , °C	125
Допустимая температура стали статора по ТС	$\theta_{ст.с}$ , °C	120
Допустимая температура обмотки ротора по сопротивлению	$\theta_{обм.р}$ , °C	120

<sup>6</sup> Генератор ТЗФП-110-2МУЗ [Электронный ресурс] // Записки автомашера. URL: <https://dmsht.ru/generator-tzfp-110-2muz/> (дата обращения: 27.02.2022).

На рис. 2 представлена PQ-диаграмма турбогенератора ТЗФ-110-МУЗ. В настоящее время одна из проблем регулирования реактивной мощности состоит в следующем: оперативный персонал ТЭЦ в ряде случаев не может обеспечить выполнение команд диспетчера АО «СО ЕЭС» на перевод генераторов в режим с максимальным приемом реактивной мощности из-за особенностей настройки ОМВ, призванных исключить выпадение генератора из синхронизма, или ухудшением технического состояния оборудования. Следствием невыполнения команд диспетчера являются значительные штрафные санкции в отношении генерирующей компании.

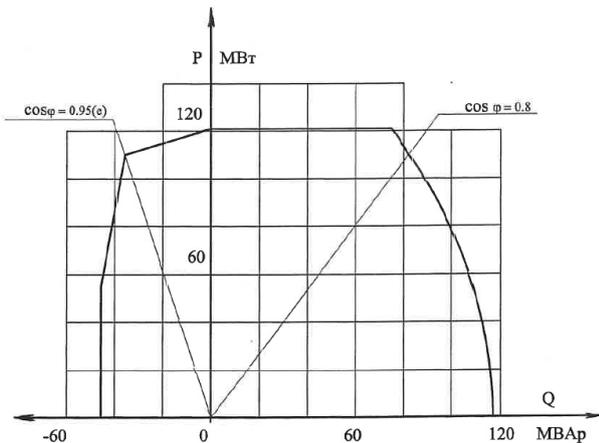


Рис. 2. Диаграмма мощности турбогенератора ТЗФ-110-2

В свою очередь, диспетчер АО «СО ЕЭС» при регулировании режима руководствуется заводской документацией: номинальными паспортными данными турбогенераторов и диаграммой мощности турбогенератора, построенной для номинального напряжения на статоре и без учета особенностей настройки ОМВ.

Одним из путей решения данной проблемы является актуализация данных диаграмм на основании проведенных испытаний. Генерирующие компании, в соответствии с существующей нормативно-технической документацией, имеют возможность направить актуальные версии PQ-диаграмм в АО «СО ЕЭС».

Турбогенератор выполнен с непосредственным воздушным охлаждением обмотки ротора и сердечника статора и косвенным воздушным охлаждением обмотки статора. Охлаждающий воздух циркулирует в генераторе по трехконтурной схеме под действием вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается вертикальными воздухоохладителями, встроенными в корпус турбогенератора (рис. 3). Система вентиляции турбогенераторов серии ТЗФ выполнена таким образом, что потоки охлаждающего сердечник воздуха в центральной части не выходят в зазор между статором и ротором, а по специальным U-образным каналам между пакетами активной стали проходят со «спинки» в область зубцов, потом разворачиваются и выходят вновь в область «спинки».

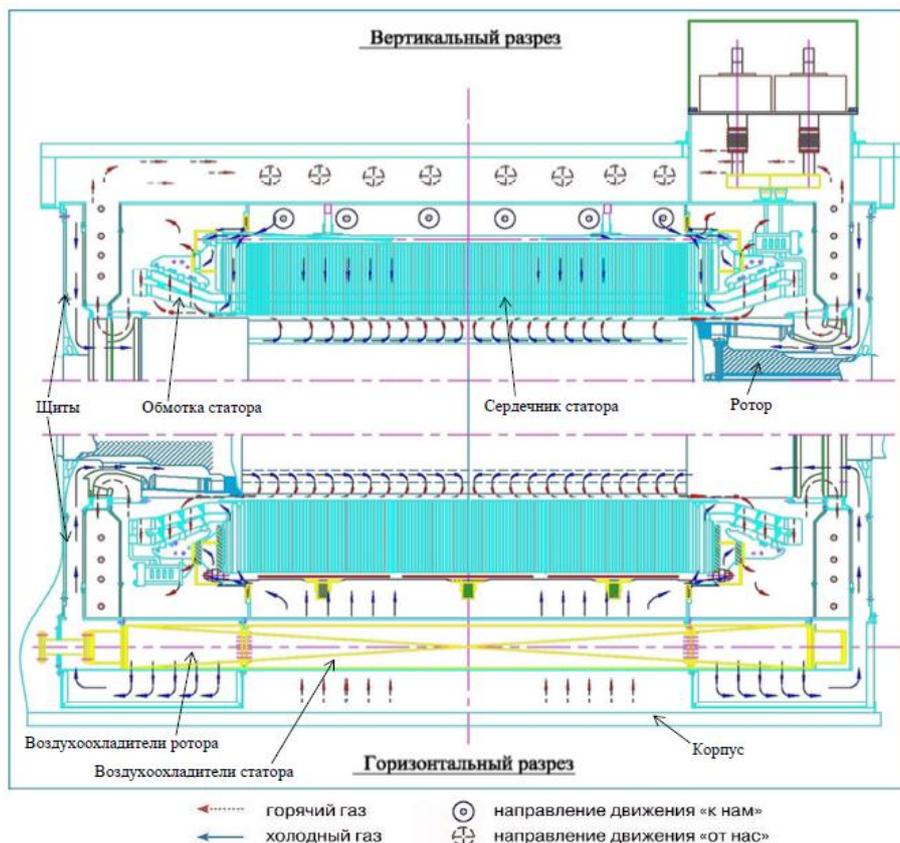


Рис. 3. Схема вентиляции турбогенератора серии ТЗФ

Выходу воздуха в зазор препятствуют специальные тангенциально-ориентированные распорки, установленные в области коронок зубцов. Наличие таких распорок практически исключает вероятность отгиба и излома уголков крайних листов в области коронок зубцов в процессе эксплуатации генератора и при проведении мероприятий по переключению пазов, что неоднократно отмечалось на старых турбогенераторах типа ТВ2-30-2, ТВ2-100-2, ТВ-60-2.

Турбогенераторы серии ТЗФ являются дальнейшим развитием серии ТФ. Применяемая в них трехконтурная схема отличается повышенной эффективностью. Улучшенные характеристики, повышенное значение КПД, надежность и перегрузочная способность турбогенераторов достигаются за счет разделения потоков воздуха, охлаждающего статор и ротор. Исключение их взаимного отрицательного влияния позволяет снизить нагрев активных и конструктивных частей генератора при одновременном снижении расхода воздуха. Применение встроенных центробежных вентиляторов со специальными направляющими и спрямляющими аппаратами позволило снизить потери в вентиляторах и повысить КПД генераторов.

В стандартах МЭК 60751 (введен в 2008 г.) и в новом ГОСТ 6651-2009 (введен в России с 1 января 2011 г.) были приняты новые значения (класс А и класс В) предельных отклонений ТС от идеальной характеристики. Контроль теплового состояния обмотки и сердечника статора турбогенератора, а также охлаждающих сред производится термопреобразователями сопротивления с допуском класса В ( $0,3+0,005 \cdot |t|$ ), где  $|t|$  – температура измеряемой среды, °С), который является наиболее распространенным в промышленности<sup>7</sup>. Их уставки на сигнал представлены в табл. 2 в зависимости от объекта измерения. Схема расположения термопреобразователей сопротивления в ТЗФП-110-2МУЗ представлена на рис. 4.

**Анализ влияния режимов потребления/выдачи реактивной мощности на температуру турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ.** На основании данных по потреблению/выдаче реактивной мощности и данных по изменению температуры обмотки и активной стали сердечника статора за период с 06.2021 по 11.2021 была построена зависимость, представленная на рис. 5 [8, 9].

Таблица 2. Термопреобразователи сопротивления, установленные в ТЗФП-110-2МУЗ

№ ТС	Тип ТС	Место установки		Объект измерения	Уставка на сигнал, °С		
					верхняя аварийная	верхняя предупредительная	нижняя предупредительная
1	ТСП 9502-02	Паз. № 3	Сторона турбины	Обмотка статора	145	125	–
2		Паз. № 11					
3		Паз. № 23					
4		Паз. № 31					
5		Паз. № 43					
6		Паз. № 51					
7		Паз. № 3	Сторона контактных колец				
9		Паз. № 11					
10		Паз. № 23					
11		Паз. № 31					
12		Паз. № 43					
13		Паз. № 51					
14		Паз. № 3	Сторона турбины	Активная сталь сердечника статора	140	120	–
15		Паз. № 11					
16		Паз. № 23					
17		Паз. № 31					
18		Паз. № 43					
19		Паз. № 51					
20		Паз. № 3	Сторона контактных колец				
21		Паз. № 11					
22		Паз. № 23					
23		Паз. № 31					
24		Паз. № 43					

<sup>7</sup> Термопреобразователи сопротивления платиновые и медные ТСП 9502, ТСМ 9502 [Электронный ресурс] // НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. URL: [https://omsketalon.nt-rt.ru/images/manuals/tsp\\_9502\\_tsm\\_9502.pdf](https://omsketalon.nt-rt.ru/images/manuals/tsp_9502_tsm_9502.pdf) (дата обращения: 27.02.2022).

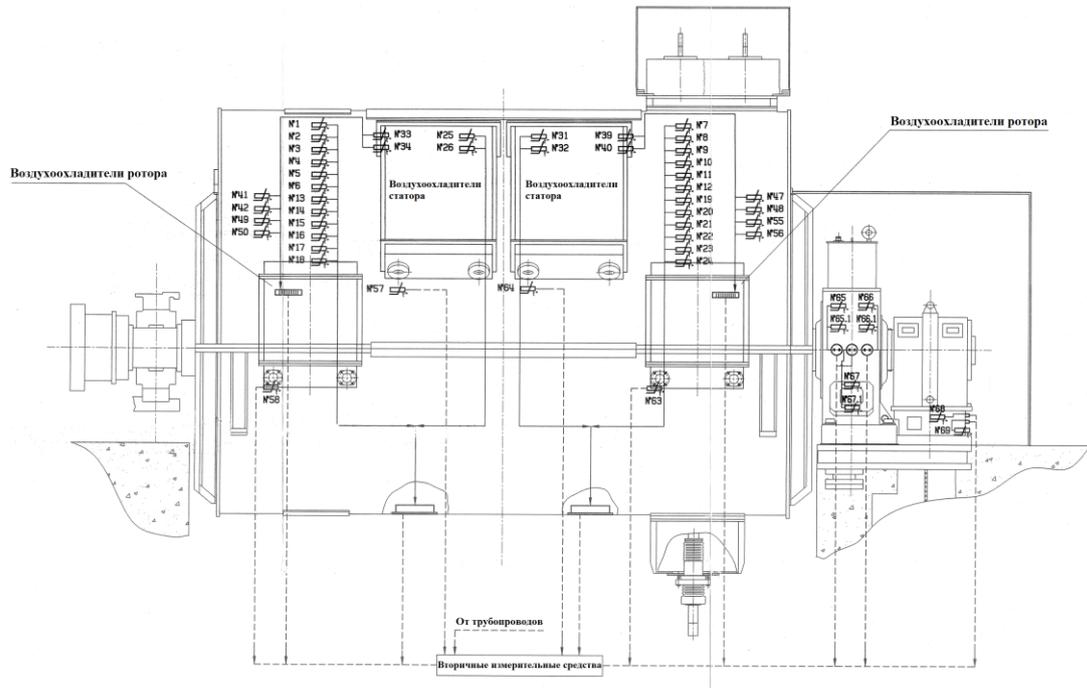


Рис. 4. Схема расположения термopеобразователей сопротивления в ТЗФП-110-2МУ3

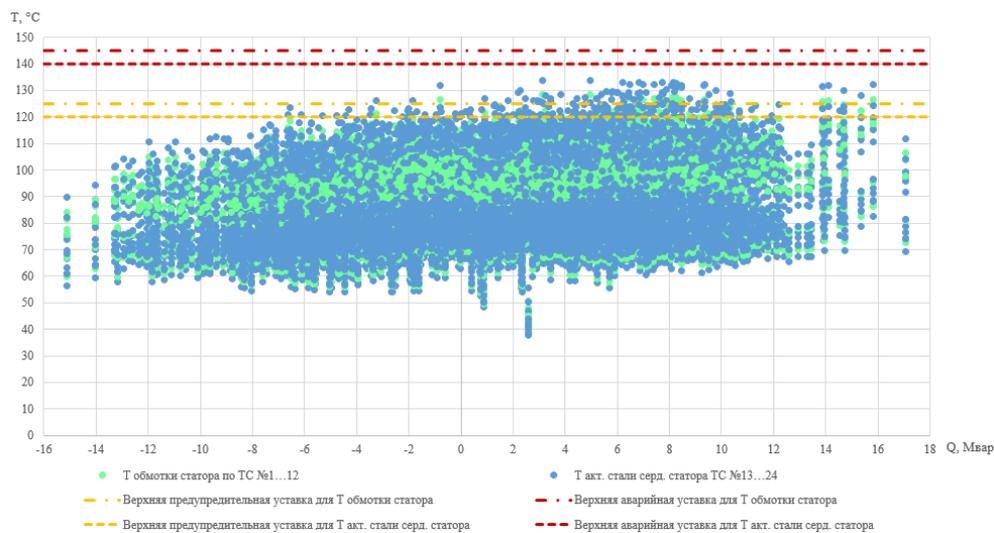


Рис. 5. Зависимость температуры статора ТЗФП-110-2МУ3 от режима потребления/выдачи реактивной мощности (убран датчик «Т обмотки статора Паз №11 (сторона “Т”)», который показывает температуру 180,5 °С)

Анализ зависимости (рис. 5) позволяет сделать следующие выводы:

1. Измеренные температуры распределяются достаточно равномерно по контрольным точкам в различных пазах, за исключением одного, вероятно, дефектного датчика на турбогенераторе.

2. На ТС № 13-24, предназначенных для измерения температуры активной стали сердечника статора, отмечается значительное превышение верхней предупредительной уставки более чем в 15 % измерений.

3. С увеличением потребления реактивной мощности температура обмоток и активной стали сердечника статора турбогенератора

ТЗФП-110-2МУ3 уменьшается и в основном не превышает верхних предупредительных уставок. В режиме выдачи реактивной мощности выявлена противоположная зависимость.

В сердечнике статора данного генератора реализованы все наиболее эффективные конструктивные и технологические решения для обеспечения высокого уровня надежности и устойчивости крайних пакетов активной стали к эксплуатационным воздействиям [10–12]:

– под нажимными плитами устанавливаются медные экраны, используемые для демпфирования поля рассеяния лобовых частей, а первые и вторые крайние пакеты с каждой стороны сердечника статора имеют укороченные

зубцы и выполняют функцию магнитных шунтов – они практически не воспринимают на себя нагрузку от приложенного к статору электромагнитного момента и предназначены в основном для ослабления поля рассеяния лобовых частей, проникающего в зубцы рабочих крайних пакетов сердечника;

–зубцы магнитных шунтов, а также третьих, четвертых и пятых рабочих крайних пакетов выполнены ступенчатыми, со значительным скосом в радиальном направлении; кроме того, эти зубцы сделаны разрезными (в средней их части выполнены продольные шлицы) – данные конструктивные меры способствуют ослаблению индукции магнитного поля лобовых частей в области коронок зубцов, а также уменьшению плотности вихревых токов, индуцируемых в них аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния;

–крайние пакеты сердечника (включая и магнитные шунты) выполнены склеенными и запеченными, а шлицы разрезных пакетов замоничены эпоксидной замазкой, что повышает жесткость и выносливость зубцов по отношению к электромагнитным и термомеханическим воздействиям при работе генератора.

В целом следует также отметить достаточно высокое качество изготовления сердечников генераторов серии ТЗФ – при обследованиях ни разу не выявлены зазоры между нажимными пальцами и поверхностью крайних пакетов, что указывает на отсутствие существенной кривизны крайних пакетов сердечника.

**Результаты исследования.** Опыт проводимых комплексных диагностических обследований на турбогенераторах серии ТЗФ подтверждает высокую устойчивость зубцов крайних пакетов к эксплуатационным нагрузкам и показывает, что на данных турбогенераторах отсутствуют опасные дефекты прессовки, распушения и выкрашивания. Таким образом, у данных машин в настоящее время отсутствует непосредственная угроза возникновения механических повреждений изоляции обмотки статора ослабленными сегментами активной стали.

Ретроспективный анализ результатов испытаний генераторов серии ТЗФ на нагревание показывает, что в тепловом отношении обмотки статоров этих машин характеризуются сравнительно высокими температурами нагрева. В ряде случаев максимальные температуры обмоток в номинальном режиме достигали и даже превышали предельно допустимые значения. При этом температура верхних слоев изоляции в машинах ТЗФ ближе к температуре меди и из-за этого наружная поверхность стержней нагрета сильнее.

Вплоть до настоящего времени, благодаря регулярно проводимым комплексным диагностическим обследованиям сердечников статоров и ремонтно-восстановительным работам, выполнявшимся по результатам этих обследований, удавалось избегать массовых пробоев

статорных обмоток, непосредственно вызванных механическими повреждениями корпусной изоляции ослабленными и обломившимися фрагментами листов активной стали.

При отсутствии должного контроля за состоянием сердечников и проведения ремонтов ослабленных зубцов будет возрастать опасность прорезания корпусной изоляции обмотки статора обломками выкрашившихся листов активной стали и, соответственно, риск ее пробоя в работе или при испытаниях.

Дополнительно необходимо отметить, что работа генератора в маневренных режимах с переходом от выдачи реактивной мощности к ее потреблению и обратно будет создавать условия для увеличения взаимных перемещений активной стали и стержней обмотки в районе их выхода из пазов и, как следствие, более интенсивного истирания изоляции в результате ее фрикционного взаимодействия с боковыми гранями зубцов сердечника статора.

**Выводы.** В ходе исследования были сформулированы следующие выводы.

1. Влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ при работе в установившихся режимах в пределах заводской PQ-диаграммы минимально.

2. В сердечнике статора турбогенератора рассматриваемой серии за счет значительного усовершенствования конструкции и технологии изготовления торцевых зон достигнута высокая устойчивость зубцов крайних пакетов к эксплуатационным нагрузкам.

3. При обнаружении невозможности работы в режиме с максимальным приемом реактивной мощности для предотвращения невыполнения команд диспетчера АО «СО ЕЭС» рекомендуется проводить актуализацию PQ-диаграмм на основе соответствующих испытаний.

4. Турбогенераторы серии ТЗФ допускаются к применению для потребления реактивной мощности.

В качестве дальнейшего направления исследований планируется рассмотреть работу турбогенераторов в маневренных режимах с переходом от выдачи реактивной мощности к ее потреблению и обратно.

#### Список литературы

1. **Применение** асинхронизированных турбогенераторов на электростанциях ОАО «Мосэнерго» / С.А. Аршунин, П.В. Голов, Н.А. Антипова и др. // Электротехника. – 2010. – № 2. – С. 14–18
2. **Воротницкий В.Э.** Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Электронный журнал «ЭНЕРГОСОВЕТ». – Весна 2017. – № 47 // [www.energsovet.ru](http://www.energsovet.ru).
3. **Цгоев Р.С.** Расширение области устойчивости синхронной машины с тиристорной бесщеточной системой возбуждения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006. – № 1. – С. 11–13. – EDN KVHYNT.

4. **Грабовский В.П.** Анализ повреждаемости валов роторов турбогенераторов с тиристорной системой возбуждения // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по материалам LII–LIII Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 27 мая 2020 г. Т. 4–5(47). – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Сибирская академическая книга», 2020. – С. 63–74. – EDN UNXCHR.

5. **Эксплуатация** турбогенераторов с непосредственным охлаждением / под общ. ред. Л.С. Линдорфа, Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергия, 1972. – 352 с.

6. **Пиккульский В.А.** Влияние режимов работы, условий охлаждения и эксплуатационного состояния статора на изменение плотности прессовки в зубцовой зоне крайних пакетов // *Электротехника*. – 1991. – № 10. – С. 6–9.

7. **Пиккульский В.А.** Влияние термомеханических деформаций в статоре турбогенератора на изменение плотности прессовки в зубцовой зоне крайних пакетов // *Электротехника*. – 1991. – № 5. – С. 17–21.

8. **Битней В.Д., Остроушко В.А., Охлопков А.В.** Оценка влияния режима работы в части регулирования реактивной мощности на техническое состояние генерирующего оборудования // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп., г. Москва, 17–19 марта 2022 г.* – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг «РАДУГА»», 2022. – С. 850. – EDN ILLMVG.

9. **Impact** of operation mode in terms of reactive power regulations on technical condition and reliability of generating equipment operation / S. Lenev, A. Vivchar, A. Okhlopov, V. Bitney // *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, 17–19 марта 2022 г.* – Moscow, 2022. – DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731385. – EDN JGBMNI.

10. **Азбукин Ю.И., Аврух В.Ю.** Модернизация турбогенераторов. – М.: Энергия, 1980. – 232 с.

11. **Mamikonyants L.G., Pikul'skiy V.A., Polyakov F.A.** A1-211 Service life Prolongation and Reliability Increase of Long Operating Turbogenerators // *Доклад на Сессии СИГРЭ, 2006.*

12. **Курбатов П.А., Гриценко А.Д., Охлопков А.В.** Влияние регулирования реактивной мощности на надежность генерирующего оборудования // *Электрические станции*. – 2022. – № 9(1094). – С. 22–32. – EDN OJNGKK.

## References

1. Arshunin, S.A., Golov, P.V., Antipova, N.A., Labunets, I.A., Sokur, P.V. *Primenenie asinkhronizirovannykh turbogeneratorov na elektrostantsiyakh* ОАО «Mosenergo» [Operation of asynchronous turbogenerators at Mosenergo OJSC electric power plants]. *Elektrotekhnika*, 2010, vol. 2, pp. 14–18.

2. Vorotnitskiy, V.E. *Energeticheskaya effektivnost' i kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh. Problemy i puti resheniya* [Energy efficiency and reactive power compensation in electrical networks. Challenges and ways to address them]. *ENERGOSOVET*, 2017, vol. 47, pp. 44–53. Available at: [www.energosovet.ru](http://www.energosovet.ru).

3. Tsgoev, P.C. *Rasshirenje oblasti ustoychivosti sinkhronnoy mashiny s tiristornoy beshchetochnoy sistemoy возбуждениya* [Expansion of the stability region of a synchronous machine with a thyristor brushless excitation system]. *Elektro*.

*Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2006, no. 1, pp. 11–13.

4. Grabovskiy, V.P. *Analiz povrezhdaemosti valov rotorov turbogeneratorov s tiristornoy sistemoy возбуждениya* [Analysis of damage to rotor shafts of turbogenerators with a thyristor system]. *Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya v sovremennoy nauke: sbornik statey po materialam LII–LIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Novosibirsk, 27 maya 2020 g. T. 4–5(47)* [Experimental and theoretical research in modern science: Collection of articles based on the materials of the LII–LIII International Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, May 27, 2020. Vol. 4–5(47)]. Novosibirsk: Limited Liability Company “Siberian Academic Book”, 2020, pp. 63–74.

5. Lindorf, L.S., Mamikonians, L.G. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbogenerators with direct cooling]. Moscow: Energiya, 1972. 352 p.

6. Pikul'skiy, V.A. *Vliyanie rezhimov raboty, usloviy okhlazhdeniya i ekspluatatsionnogo sostoyaniya statora na izmenenie plotnosti pressovki v zubtsovoy zone kraynikh paketov* [The effect of operating modes, cooling conditions, and the operational status of the stator on the change in the density of pressing in the tooth area of the outer packs]. *Elektrotekhnika*, 1991, vol. 10, pp. 6–9.

7. Pikul'skiy, V.A. *Vliyanie termomekhanicheskikh deformatsiy v statore turbogeneratora na izmenenie plotnosti pressovki v zubtsovoy zone kraynikh paketov* [The effect of thermomechanical deformations in the turbogenerator stator on the change in the density of pressing in the tooth area of the outer packs]. *Elektrotekhnika*, 1991, no. 5, pp. 17–21.

8. Bitney, V.D., Ostroushko, V.A., Okhlopov, A.V. *Otsenka vliyaniya rezhima raboty v chasti regulirovaniya reaktivnoy moshchnosti na tekhnicheskoe sostoyanie generiruyushchego oborudovaniya* [Evaluation of the effect of the operation mode in terms of reactive power control on the technical status of generating equipment]. *Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika: tezisy dokladov XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov, Moskva, 17–19 marta 2022 g.* [Proceedings of abstracts of XXVIII International scientific technical conference of students and graduate students: Radioelectronics, electrical engineering and energy, Moscow, March 17–19, 2022]. Moscow, 2022, p. 850.

9. Lenev, S., Vivchar, A., Okhlopov, A., Bitney, V. *Effect of operation mode in terms of reactive power regulations on technical condition and reliability of generating equipment operation*. *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, March 17–19, 2022*. Moscow, 2022. DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731385.

10. Azbukin, Yu.I., Avrukh, V.Yu. *Modernizatsiya turbogeneratorov* [Retrofit of turbogenerators]. Moscow: Energiya, 1980. 232 p.

11. Mamikonyants, L.G., Pikul'skiy, V.A., Polyakov, F.A. *Service life Prolongation and Reliability Increase of Long Operating Turbogenerators*. Report at the CIGRE Session, 2006.

12. Kurbatov, P.A., Gritsenko, A.D., Okhlopov, A.V. *Vliyanie regulirovaniya reaktivnoy moshchnosti na nadezhnost' generiruyushchego oborudovaniya* [Effect of reactive power control on the generating equipment reliability]. *Elektricheskie stantsii*, 2022, no. 9(1094), pp. 22–32.