

Г. П. Езовит<sup>1</sup>, Н. И. Власенко<sup>1</sup>,  
В. П. Угляренко<sup>1</sup>, С. И. Бурлака<sup>1</sup>,  
И. И. Баламаджи<sup>1</sup>, Ф. М. Красногоров<sup>2</sup>,  
П. В. Заныборщ<sup>2</sup>, И. П. Сливинский<sup>2</sup>,  
С. Е. Оринин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-технический центр НАЭК «Энергоатом»,  
г. Киев, Украина

<sup>2</sup>Запорожская АЭС, г. Энергодар, Украина

## Оптимизация режимов работы турбогенераторов мощностью 1000 МВт типа ТВВ-1000-4УЗ с целью продления эксплуатации сверх назначенного срока службы

*Рассмотрен методический подход к оценке технического состояния мощного турбогенератора (ТГ), выработавшего назначенный срок службы, с целью определения возможности продления его эксплуатации. Особое внимание обращено на изменение нагрева основных узлов ТГ (обмоток статора и ротора, сердечника статора) и охлаждающих сред (водород и дистиллят) за весь период его работы. Для иллюстрации использованы технические материалы для ТГ типа ТВВ-1000-4УЗ мощностью 1000 МВт Запорожской АЭС.*

*Ключевые слова:* турбогенератор, статор, ротор, водород, дистиллят, температура, давление, расход, датчики, диагностика.

**Г. П. Єзовіт, М. І. Власенко, В. П. Угляренко, С. І. Бурлака,  
І. І. Баламаджи, Ф. М. Красногоров, П. В. Заниборщ,  
І. П. Слівінський, С. Є. Оринін**

**Оптимізація режимів роботи турбогенераторів потужністю 1000 МВт типу ТВВ-1000-4УЗ з метою продовження експлуатації понад призначений термін служби**

*Розглянуто методичний підхід до оцінки технічного стану потужного турбогенератора (ТГ), який відпрацював призначений термін служби, з метою визначення можливості продовження його експлуатації. Особливу увагу звернено на зміну нагріву основних вузлів ТГ (обмоток статора і ротора, сердечника статора) і охолоджуючих середовищ (водень і дистиллят) за весь період його роботи. Для ілюстрації використано технічні матеріали для ТГ типу ТВВ-1000-4УЗ потужністю 1000 Мвт Запорізької АЕС.*

*Ключові слова:* турбогенератор, статор, ротор, водень, дистиллят, температура, тиск, витрати, датчики, діагностика.

© Г. П. Езовит и др., 2012

**Н**а атомных и тепловых электростанциях Украины эксплуатируются более 110 турбогенераторов (ТГ) мощностью 200–1000 МВт типа ТВВ и ТГВ, большинство из которых находятся в работе 30–40 лет, т. е. практически исчерпали назначенный срок службы (30 лет). Поскольку модернизация (реконструкция) этих ТГ или замена на новые требует длительного времени, актуальна задача продолжения их эксплуатации, но с уточнением нагрузочных режимов, учитывающих техническое состояние каждого из этих ТГ. Рассмотрим результаты такого подхода для ТГ мощностью 1000 МВт.

На Запорожской АЭС эксплуатируются шесть ТГ типа ТВВ-1000-4УЗ ( $P_a = 1000$  МВт,  $\cos \varphi = 0,95$ ,  $U_{ст} = 24$  кВ,  $I_{ст} = 26,7$  кА), из которых первые два (ТГ-1, 2) введены в эксплуатацию в 1984 и 1985 гг. Для того чтобы определить возможность дальнейшей надежной эксплуатации ТГ, проанализировано их техническое состояние, оценено изменение технического состояния за весь период работы (с момента ввода в эксплуатацию), а для этого собрана, систематизирована и проанализирована эксплуатационная документация, результаты всех ранее проведенных ремонтов и регламентных испытаний (в частности, испытания на нагревание, высоковольтные испытания обмоток статора и ротора, испытания сердечника статора на удельные потери и др.), режимы работы ( $\cos \varphi$ ) и т. п. Первостепенное внимание обращалось на состояние основных узлов ТГ (обмотки статора и ротора, сердечник статора) и эффективность работы систем их охлаждения. При этом изучались и технический уровень эксплуатации ТГ (соблюдение инструкций по эксплуатации, требований нормативных документов и пр.), и необходимость проведения измерений отдельных параметров и дополнительных испытаний ТГ.

Рассматривались три возможных варианта результатов оценки технического состояния обследуемого ТГ:

техническое состояние ТГ практически не изменилось, он может и далее эксплуатироваться в соответствии с действующими инструкциями по эксплуатации;

техническое состояние ТГ изменилось, он может эксплуатироваться далее только при условии выполнения отдельных технологических и режимных рекомендаций в соответствии с уточненной диаграммой мощности (при этом есть ограничение полной мощности);

техническое состояние ТГ изменилось значительно, его дальнейшая эксплуатация целесообразна только после выполнения мероприятий по реконструкции, модернизации, замене отдельных узлов и деталей, а в отдельных случаях — и ТГ в целом.

На рис. 1–4 представлены основные результаты всех испытаний (или контрольных режимов) на нагревание, проведенных за весь период работы ТГ-1, 2, т. е. с момента ввода в эксплуатацию (через  $\Delta t$  обозначено превышение температуры основных узлов ТГ-1, 2 над температурой охлаждающих агентов).

Отметим, что при проектировании ТГ исходят из допустимых значений температуры для соответствующего класса изоляции и вполне определенной (регламентированной) температуры охлаждающей среды (водород, дистиллят). Повышение температуры охлаждающей среды или снижение эффективности охлаждения (вентиляции) ТГ вызывает увеличение температуры основных узлов ТГ и снижение срока службы изоляции. Из практики эксплуатации электрических машин известно, что срок службы высоковольтной изоляции сокращается примерно в два раза при повышении ее температуры на  $10^\circ\text{C}$ . При этом

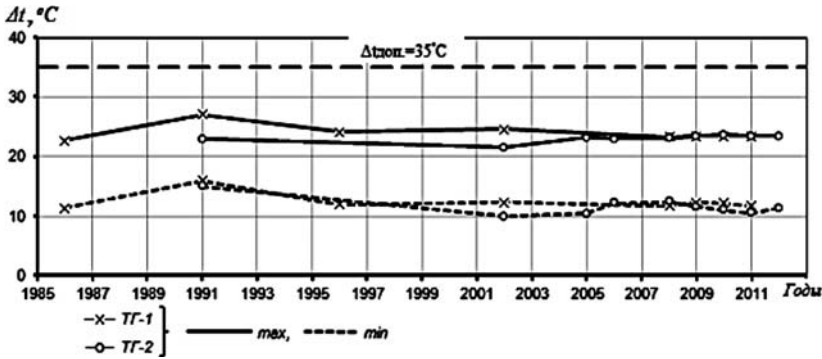


Рис. 1. Изменение нагрева обмоток статора ТГ-1, 2 за весь период эксплуатации.

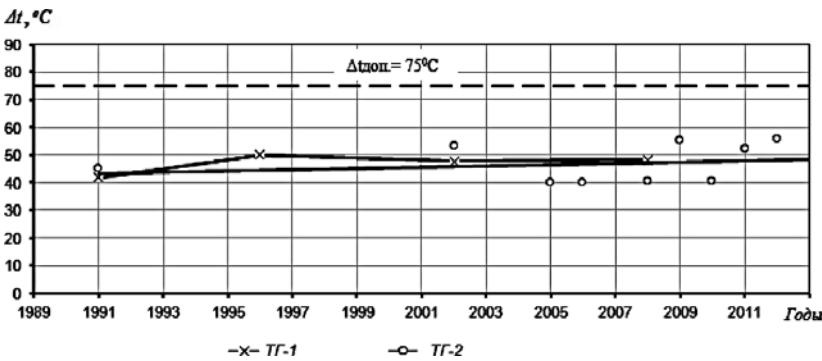


Рис. 2. Изменение нагрева обмоток ротора ТГ-1, 2 за весь период эксплуатации.

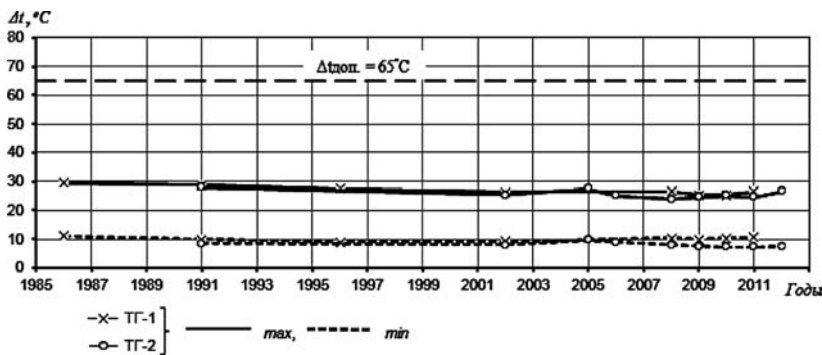


Рис. 3. Изменение нагрева сердечников статора ТГ-1, 2 за весь период эксплуатации

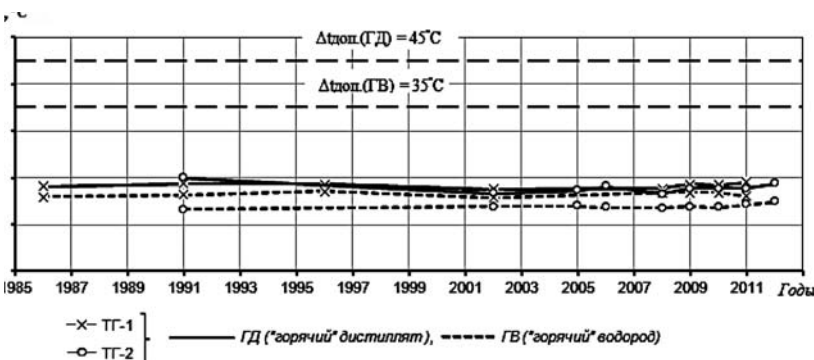


Рис. 4. Изменение нагрева охлаждающих агентов (водорода и дистиллята) ТГ-1, 2 за весь период эксплуатации

в расчет должна приниматься не средняя температура, а температура в наиболее нагретом месте, так как для повреждения изоляции достаточно одного самого напряжённого по нагреву места [1]. Поэтому на рис. 1 и 3 приведены показания термодатчиков с максимальными (и для сравнения — с минимальными) значениями температуры.

Рассмотрим нагрев основных узлов ТГ-1, 2 (результаты пересчитаны на номинальные значения токов статора и ротора).

*Обмотки статоров* (рис. 1). Температура максимально нагретых стержней колеблется в пределах 22...24 °С

(при допустимом значении 35 °С), а минимально нагретых — 10...13 °С.

Обнаруженные в отдельные годы при проведении испытаний на нагревание случаи засорения полых проводников отдельных стержней обмотки статора (значит, и повышение их нагрева) или недостоверность показаний термодатчиков обычно устранялись при очередном ремонте ТГ путём ревизии каналов измерения температуры или промывки этих стержней обратным ходом дистиллята.

*Обмотки роторов* (рис. 2). Температура колеблется в пределах 43...50 °С (при допустимом значении 75 °С).

*Сердечники статоров* (рис. 3). Максимальная температура колеблется в пределах 25...28 °С (при допустимом значении 65 °С), а минимальная — в пределах 8...10 °С.

*Охлаждающий водород в корпусе* (рис. 4). Температура колеблется в пределах 14...17,5 °С (при допустимом значении 35 °С и давлении  $H_2$  в корпусе 5,0 кгс/см<sup>2</sup>).

*Охлаждающий дистиллят в обмотке статора* (рис. 4). Температура колеблется в пределах 16,5...20 °С (при допустимом значении 45 ° и неизменном расходе).

Рассмотрение этих зависимостей позволяет определить, что за почти 30 лет работы ТГ-1, 2 нагрев их основных узлов и охлаждающих агентов (дистиллят и водород) изменился незначительно. Такой результат можно объяснить как надежностью конструкции ТГ этого типа, так и достаточно высоким уровнем эксплуатации (выполнение требований инструкций по эксплуатации, нормативных документов и др.), а также качеством ремонтов. Анализ результатов различных регламентных испытаний (высоковольтные обмоток статора и ротора, измерение сопротивления их изоляции, удельных потерь в сердечнике статора и др.), проведенных на ТГ-1, 2 за этот период, показал, что техническое состояние их основных узлов удовлетворительное.

Для повышения надежности эксплуатации ТГ-1, 2, с учетом их работы сверх назначенного срока службы, целесообразно поддерживать:

расход дистиллята в обмотке статора и давление дистиллята на входе в обмотку статора — не ниже номинальных значений;

температуру «холодного» дистиллята — не выше 40 °С;  
температуру «холодного» водорода — не выше 30 °С.

В летний период, когда температуру дистиллята и водорода поддерживать на уровне 40 и 30 °С, соответственно, затруднительно, эксплуатировать ТГ-1, 2 необходимо с использованием уточненной *диаграммы мощности* (рис. 5). Это приведет к некоторому ограничению тока статора, однако, учитывая обычную работу этих ТГ с пониженной (по отношению к номинальной) реактивной нагрузкой, активная нагрузка будет оставаться на уровне номинальной, т. е. 1000 МВт. На рис. 5 такое ограничение затемнено (зона «А»). Отметим, что для обмотки статора изменение температуры охлаждающего дистиллята в сторону повышения вызывает увеличение температуры изоляции стержней и соответствующее снижение срока службы их изоляции.

Учитывая повышенный неконтролируемый нагрев крайних пакетов сердечника и конструктивных узлов в ТГ-1, 2 при работе с  $\cos \varphi$ , близким к 1,0 [2], в случае необходимости уменьшения значения реактивной нагрузки до 150 МВ·Ар и ниже (т. е. соответствующей  $\cos \varphi = 0,98...1,0$ ), целесообразно *снижать активную нагрузку*, как показано на рис. 5.

Кроме того, возрастание подогрева дистиллята более, чем на 5 °С, или возрастание температуры отдельных стержней более, чем на 5 °С (при номинальном расходе дистиллята через обмотку статора), или повышение разности температуры между наиболее и наименее нагретыми стержнями выше допустимого значения указывают на *необходимость очистки (промывки) всей обмотки или отдельных ее стержней*.

Для контроля (с учётом требований основных нормативных документов) возможного изменения технического состояния основных узлов ТГ, особенно тех, которые выработали ресурс, но продолжают эксплуатироваться, наиболее целесообразным можно считать использование (внедрение) *системы диагностики основных узлов турбо-*

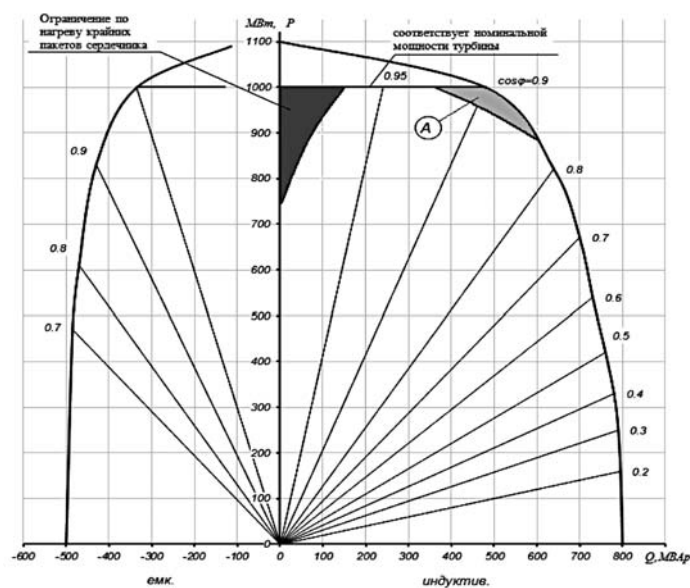


Рис. 5. Уточненная диаграмма мощности ТГ-1, 2 (зона «А» — рекомендуемое ограничение)

*генератора — СИДОУТ* [3], которая позволяет на ранней стадии (в реальном времени) определять отклонения технического состояния основных узлов ТГ, а в результате предотвращать аварийные остановки блока с повреждением ТГ.

## Выводы

Исходя из удовлетворительного технического состояния основных узлов (обмотки статора и ротора, сердечник статора) и эффективности работы системы охлаждения (водород в корпусе и дистиллят в обмотке статора), а также учитывая стабильность тепловых характеристик основных узлов и охлаждающих агентов рассматриваемых ТГ в течение всего почти 30-летнего периода работы, эксплуатация турбогенераторов ТГ-1, 2 типа ТВВ-1000-4УЗ Запорожской АЭС может быть продолжена. При этом желательно выполнение рекомендаций по допустимым режимам работы в сети (уточнённая диаграмма мощности, рис. 5) и повышению технического уровня эксплуатационного контроля состояния основных узлов и технологических параметров (внедрение СИДОУТ).

## Список использованной литературы

1. *Титов В. В.* Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная. — М.: Энергия, 1967.
2. *Исследование режимов и усовершенствование конструкций мощных турбогенераторов (типа ТГВ-200 и ТГВ-200М) / Ю. В. Беднарчук, Н. Г. Гринченко, Г. П. Езовит и др.* — К.: Наук. думка, 1973.
3. *Современная система диагностического контроля технического состояния основных узлов мощного турбогенератора / Г. П. Езовит, В. П. Угляренко, С. И. Бурлака и др.* // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — № 4(52). — С. 45—48.

Получено 15.10.2012.