

**Науково-виробничий журнал Міністерства палива та енергетики України, Науково-технічної спілки енергетиків та електротехніків України**

Заснований у 1960 році  
Виходить щомісяця

**Голова редакційної ради**  
Бойко Ю.А.

**Редакційна колегія (секція "Електроенергетика" науково-технічної ради Мінпаливенерго України):**  
Светелік О.Д. (перший заст. голови НТР), Чех С.М. (голова секції "Електроенергетика" НТР), Улітін Ю.І., Борисов М.А., Меженій С.Я., Фоменко О.Л., Євменев О.О., Гутаревич О.Т., Лях В.В., Дулак О.С., Кесова Л.О., Корсуненко В.І., Корчевий Ю.П. (голова секції "Загальна теплотехніка" НТР), Кулик М.М., (співголова секції "Стратегія ПЕК" НТР), Лучников В.А., Мисак Й.С., Носовський А.В., Письменний Є.М., Поташник С.І., (голова секції "Гідроенергетика НТР"), Стогній Б.С. (голова секції "Загальна електротехніка" НТР), Шелепов І.Г.

Свідство про реєстрацію журналу серія КВ № 612 від 04.05.1994 р.  
© Міністерство палива та енергетики України, Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України, 2006

**Шеф-редактор:**

Шрамко В.О.

**Редактор з випуску:**

Сушина Ю.О.

**Художник:**

Джураєва О.Т.

**Додрукарська підготовка:**

ТОВ «Технічний центр «Енергія»

Свідство про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції серія ДК № 850 від 12.03.2002 р.

**Адреса редакції:** 03150, Київ, вул. Антоновича, 125-А  
ТОВ «Технічний центр «Енергія»,  
Тел.: +38 044 536-40-29  
Тел./факс: +38 044 522-92-52  
**E-mail:** [electromagazine@ukr.net](mailto:electromagazine@ukr.net)  
<http://www.energo.net.ua>

**Львівський кор. пункт:**

79011, м. Львів, вул. Тютюнників, 55, АТ "ЛьвівОРГРЕС"  
Тел.: +38 032 276-01-37, 294-87-45, 258-25-15  
Тел./факс: +38 0322 76-01-32  
**E-mail:** [lvivorgres@mail.lviv.ua](mailto:lvivorgres@mail.lviv.ua)  
Керівник: Мисак Йосиф Степанович

**Харківський кор. пункт:**

61003, м. Харків, вул. Університетська, 16, УІПА  
Тел.: +38 057 731-12-33  
Керівник: Шелепов Ігор Григорович

**Друк:**

ТОВ "Гнозіс"  
тел. (044) 467-62-06  
м. Київ, вул. Межигірська, 82-А

Видання цього номера журналу рекомендоване науково-технічною радою Міністерства палива та енергетики України

Журнал включено до переліку №1 наукових спеціалізованих видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня (розділ "Технічні науки"), затверджено постановою ВАК України від 09.06.99 №1-05/7

**ISSN 0424 - 9879**

Передплатний індекс в каталогах "Преса України" та "Газети і журнали Росії" – **74160**

## Зміст

### ОГОЛОШЕННЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ:  
«UKR-POWER» ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ,  
ЭКОЛОГИЯ – СТРАТЕГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ  
ЭНЕРГЕТИКИ. ИНВЕСТИЦИИ И ИННОВАЦИИ» .....2

### ЕНЕРГОРИНОК

*В.В. Козирський, О.В. Гай, В.М. Лазебний, П.В. Петров*  
ПЕРСПЕКТИВИ ВЗАЄМОВІДНОСИН МІЖ ПОСТАЧАЛЬНИКОМ  
ТА СПОЖИВАЧЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗРІЗІ ВВЕДЕННЯ  
ПОСТАНОВИ НКРЕ ЩОДО ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....3

*О.В. Коцар*  
ФОРМУВАННЯ ДАНИХ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ  
В ОРЕ УКРАЇНИ .....6

*М.Т. Стрелков*  
ЛИБЕРАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ РЫНКА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ .....10

*Б.С. Серебрянников, К.Г. Петрова*  
ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ЦІН НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ  
В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД НЕРІВНОМІРНОСТІ ГРАФІКУ  
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ .....18

### ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА

*И.А. Вольчин, В.А. Ращепкин*  
ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАГРУЗКИ КОТЛОАГРЕГАТА ТЭС  
И РАСХОДА ОРОШАЮЩЕЙ ВОДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
МОКРОГО СКРУББЕРА ВЕНТУРИ .....24

### ЕКОЛОГІЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

*В.В. Литовкин, А.В. Литовкин*  
ОБРАЩЕНИЕ С ТВЕРДЫМИ ОТХОДАМИ УГОЛЬНЫХ ТЭС –  
СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ. ....29

### ЕКСПЛУАТАЦІЯ І РЕМОНТ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

*В.В. Шевченко*  
ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ  
РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРОСТРОЕНИЯ.....33

*С.А. Воинова*  
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕСУРСА  
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ .....40

### ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

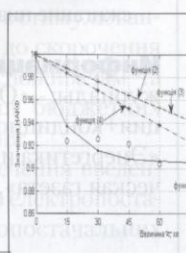
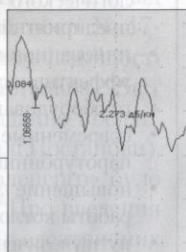
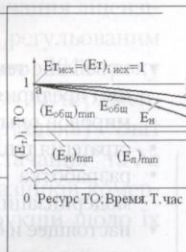
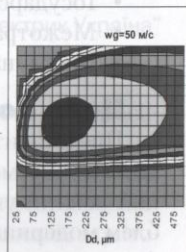
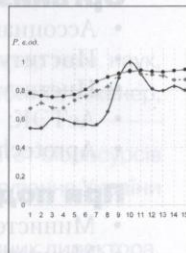
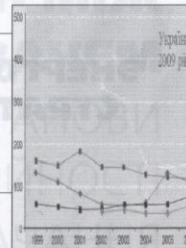
*Л.Г. Погорілий, О.О. Манько, О.В. Колченко*  
КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВОЛЗ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ .....44

*Д.В. Журавлев*  
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ  
ПАТЕНТОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-РЕАКТОРНЫХ  
ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ .....47

*Ю.Н. Веприк*  
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С ТРОСАМИ  
В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ  
РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....56

### СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*М.А. Денисенко, Я.С. Бедерак*  
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ТА НОРМОВАНИХ  
АВТОКОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ  
НАВАНТАЖЕНЬ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ.....62



# ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРОСТРОЕНИЯ

В.В. Шевченко, канд. техн. наук,

НТУ «ХПИ»

Целью работы является определение задач по обеспечению надежной и эффективной работы мощных турбогенераторов (ТГ), определение передовых технологий их производства и существующих проблем, установление направлений совершенствования современных ТГ.

ТГ представляют собой основной вид генерирующего оборудования, обеспечивающего свыше 80 % общего мирового объема выработки электроэнергии [1,2]. В то же время ТГ являются и наиболее сложным типом электрических машин (ЭМ), в которых сочетаются проблемы получения предельной мощности, оптимизации массогабаритных показателей, получение высоких значений электромагнитных характеристик, обеспечение допустимого нагрева и достаточного охлаждения, обеспечение высокой статической и динамической прочности элементов конструкции. Кроме того, необходимо обеспечить максимальную эксплуатационную надежность и экономичность ТГ. Уровень турбогенеростроения определяет в целом уровень развития электроэнергетики любой страны.

Проблема исследования будущего мировой энергетики состоит в том, что необходимо учесть сложный комплекс факторов – направления и приоритеты совместного развития мировой экономики и промышленности, технологические, ресурсные и экологические возможности, энергетические, политические, демографические проблемы, а также необходимость учета взаимного влияния всех указанных факторов друг на друга. Особенно важно учесть зависимость развития энергетики и уровня экономики. Необходимо также сочетать количественные и качественные сочетания показателей электромашиностроения. Для решения этих задач наиболее целесообразно применять комплексный подход, т.е. вести непрерывный учет и оценку возможного совместного развития вышеперечисленных направлений.

Несмотря на огромное количество работ, выполненных за прошедшие десятилетия, решение вопросов дальнейшего развития теории электромашиностроения, разработка более совершенных технологий и конструкций ТГ, поиски методов расчета и исследований не теряют своей актуальности. Применение новых решений при выборе конструкций в качестве типовых (базовых) для ТГ различных серий позволяет не только повысить их качество и надежность, но и обеспечить высокую унификацию, снизить себестоимость

производства и эксплуатационные расходы. В частности, перед исследователями возникают новые задачи в связи с тенденцией отказа от водорода в качестве хладагента и перехода на конструкции с другими системами охлаждения (вода, воздух). Среди новых разработок следует, в первую очередь, выделить конструкции, не имеющие мировых аналогов и позволяющие превзойти продукцию конкурентов по главным технико-эксплуатационным показателям: уровню нагрева, КПД, маневренности, перегрузочной способности, надежности, массы и габаритов [1,2].

Работы по совершенствованию конструкции, повышению качества и экономичности ТГ в условиях усиления конкурентной борьбы за право поставок энергетического оборудования на мировой рынок имеют большое значение, существенно повышают требования к эксплуатационным показателям ТГ. В первую очередь, это относится к увеличению сроков службы и межремонтных периодов, повышению требований к коэффициенту готовности, маневренности, запасам мощности, обеспечению безаварийной работы ТГ в режимах с потреблением реактивной мощности, снижению расходов на обслуживание и ремонты, обеспечению высокой надежности, повышению долговечности отдельных узлов и деталей. Последнее обеспечивается за счет оптимального регламента проведения ремонта, индустриализации ремонтных работ, создания более совершенной технологии ремонта.

Современные ТГ работают в энергосистемах в сложных условиях: при пониженных частоте и напряжении, глубоких разгрузках, систематических пусках и остановах. Генераторы в составе агрегатов периодически подвергаются динамическим воздействиям: крутильным колебаниям, ударным токам, следующим за переходными режимами при КЗ, неточной синхронизации, потере синхронизма и др. В последние годы, благодаря выполненным исследованиям, обеспечена устойчивая работа ТГ в режимах глубокого недо возбуждения, в несимметричных и динамических режимах. Однако изучение влияния этих режимов на конструкцию и надежность работы генераторов должно быть продолжено.

Другое направление повышения эффективности ТГ связано с совершенствованиями систем обеспечения (системы газо- и маслоснабжения, водяного хозяйства, возбуждения), широким внедрением в этих системах микропроцессорной техники и высоким уровнем автоматизации. Дальнейшее улучшение показателей надежности будет также достигнуто за счет применения средств технической диагностики состояния напряженных узлов и элементов в режимах on-line, при плановых и аварийных ремонтах. Широкое внедрение комплексных систем диагностики позволит своевременно выявлять предаварийное состояние машин, устранять имеющиеся неисправности и избегать длительного простоя ТГ из-за аварийного выхода из строя.

В последние 30–35 лет замедлился рост единичной мощности ТГ, во-первых, по причинам технико-технологического характера, которые определяются необходимостью внедрения сложных систем охлаждения, ограничениями по механическим напряжениям ротора и статора и необходимостью обеспечения допустимых значений вибраций машины. Во-вторых, современный уровень развития науки и техники позволяет создать ТГ мощностью до 2000–2500 МВт, однако социально-экономические последствия аварийного выхода из строя машины такой большой единичной мощности ставят под вопрос целесообразность их применения. В 80-е годы XX века именно это привело к тому, что на НПО «Электросила» (г. Ленинград, СССР) было выпущено только три ТГ мощностью 1200 МВт, затем их выпуск был приостановлен.

В настоящее время вопрос повышения единичной мощности ТГ опять стал актуален, т.к. это является одним из реальных направлений энергосбережения, общая мощность энергосетей страны стала выше, т.е. устойчивее в случае внезапного отключения

мощного генерирующего элемента системы. Кроме того, развитие металлургической промышленности привело к тому, что если в 70–80-е годы прошлого века, по условиям механической надежности могли изготавливать машины с максимальным диаметром неавнополосного ротора 1,2–1,3 м, то в настоящее время ТГ мощностью 1500 МВт ( $p = 2$ ) имеют наружный диаметр ротора до 1,9 м [5]. В настоящее время в Великобритании и США проектируют генераторы мощностью до 2000 МВт.

Рост единичной мощности ТГ приводит к снижению удельных затрат на материалы, на удельные капиталовложения при сооружении станций и, в результате, к снижению стоимости электроэнергии. Например, удельные капиталовложения на 1 кВт установленной мощности для ТГ 200 МВт почти в 2,5 раза меньше, чем для ТГ мощностью 32 МВт. КПД ТГ мощностью 1200 МВт примерно равен 99 %, однако, отводимые потери в нем достигают 12 МВт, что требует обеспечения интенсивного охлаждения [4,5].

Анализ перспектив развития энергетики показывает, что в ближайшие годы потребуются ТГ мощностью 1500 МВт для работы в блоке с атомными реакторами [3]. Их конструкция будет базироваться на конструкциях и технологиях изготовления ТГ мощностью 1000–1200 МВт. При этом должны быть продолжены исследования по выявлению и возможному устранению повышенных местных нагревов, концентраторов механических напряжений и мест повышенных напряженностей электрического поля.

За прошедшее десятилетие в энергосистемах Украины усилились проблемы с поддержанием нормативных значений напряжения в электрических сетях высокого напряжения, приводящие к необходимости увеличения потребления ТГ реактивной мощности. Эти проблемы в последнее время обострились из-за общего сниже-

ния величины электропотребления по стране и, как следствие, генерации реактивной мощности малонагруженными ЛЭП 220–500 кВ и недостаточности средств компенсации реактивной мощности (особенно в электросетях 500 кВ).

Потребление турбогенераторами избытка реактивной мощности из сети позволяет несколько снизить уровни напряжения при «провале нагрузки» в системе, но, со временем, это приводит к ускоренному износу ТГ, а, в ряде случаев, и к аварийным отключениям из-за разрушения торцевых зон активной стали статоров, т.к. серийные ТГ фактически не рассчитаны на эти режимы [5].

Одним из возможных способов решения проблемы является применение ТГ нового асинхронизированного типа (АСТГ). В отличие от синхронных ТГ обычного типа, АСТГ обладают большими пределами устойчивости, повышают качество отработки динамических режимов. Снятие проблемы устойчивости и совершенствование конструкции торцевой зоны позволяет обеспечить работу АСТГ в режимах глубокого потребления реактивной мощности без ущерба для их технического состояния, что и объясняет их более высокую степень надежности.

Современные ТГ имеют гибкие роторы, для обеспечения балансировки которых необходим комплекс измерительной аппаратуры позволяющий определять амплитуды и фазы вибраций не только подшипников, но и самих роторов в различных сечениях, а также производить гармонический анализ этих колебаний. Кроме того, в современных ТГ обычно нет демпферных обмоток. Их роль выполняют контуры вихревых токов замыкающихся по массивным участкам стали.

Одно из новых направлений развития турбогенераторостроения связано с использованием явления сверхпроводимости. Применение сверхпроводимости в сочетании с беспазовой конструк-

Таблица 1

Свойства охлаждающих сред по отношению к воздуху, в о.е.

Среда	Плотность	Объемная теплоемкость	Теплопроводность	Теплоотводящая способность	Расход
Воздух	1	1	1	1	1
Водород при избыточном давлении, МПа:					
0,1	0,14	1,5	7,1	2,3	1
0,2	0,21	2,2	7,1	2,7	1
0,3	0,27	3,0	7,1	3,0	1
0,4	0,35	3,75	7,1	3,5	1
Масло трансформаторное	848	1400	5,3	21	0,01
Вода	1000	3500	23	60	0,01

цией статора даст возможность снизить массу ТГ в 2–2,5 раза и одновременно повысить их КПД на 0,6–0,7 %; Уже создан опытно-промышленный сверхпроводниковый ТГ мощностью 20 МВА при частоте вращения 3000 мин<sup>-1</sup> и изготавливается опытный генератор мощностью 300 МВт, 3000 мин<sup>-1</sup>. Активный переход к сверхпроводниковым ТГ ограничивается высокой стоимостью высокотемпературных сверхпроводников [4].

Для охлаждения в ТГ применяют воздух, водород, дистиллированную воду и трансформаторное масло. Их физические свойства в относительных единицах (о.е.) приведены в табл. 1.

В настоящее время достигнут следующий уровень использования систем охлаждения турбогенераторов:

- чисто воздушное – до 400 МВт/500 МВА (фирма «Алстон»);
- чисто водородное – до 800 МВт (фирма АВВ);
- водородно-водяное (только для обмотки статора) – до 1500 МВт.

По принципу охлаждения все ТГ можно подразделить на машины с косвенным (поверхностным) охлаждением и непосредственным охлаждением проводников обмоток статора и ротора различными агентами, а также смешанным охлаждением. Типы ТГ с различ-

ными видами охлаждения представлены в табл. 2.

ТГ серии ТВМ мощностью 300 и 500 МВт и напряжением до 36,75 кВ охлаждаются трансформаторным маслом, воздухом и водой. Масло является хорошей изолирующей средой для обмоток статора (как и для мощных трансформаторов), что позволяет увеличить их напряжение до 36,75 кВ по сравнению с 20–24 кВ для генераторов с другими типами охлаждения. В целях отделения объема статора, заполняемого маслом, от вращающегося ротора, внутри сердечника статора устанавливается цилиндр, изготовленный из изоляционного материала. Обмотка ротора ТГ серии ТВМ охлаждается водой, поверхность ротора – воздухом, зубцы ротора – водой. В настоящее время в ТГ ТВМ масло заменяют негорючим жидким диэлектриком (совтол, клофен, пиранол и т.п.), табл. 3.

В целом большинство украинских ТГ имеет большую надежность, чем аналогичные ТГ в США (Дженерал Электрик), но несколько меньшую, чем ТГ новейших серий фирм АВВ и Siemens/KWU. Повышать и дальше надежность позволит, например, переход от водородного и водо-водородного охлаждения, к ТГ с полным воздушным охлаждением. Существующий многолетний опыт их применения показал, что это эко-

номически целесообразно, что они более простые в эксплуатации и менее пожароопасные. В настоящее время происходит возвращение к воздушному охлаждению ТГ на новом техническом уровне и, прежде всего, с применением современных схем охлаждения, более современной термореактивной корпусной изоляции обмотки статора, новой изоляции ротора, применению электротехнической стали с уменьшенными удельными потерями и современных конструктивных материалов и технологий. Разработана серия ТГ с воздушным охлаждением нового поколения мощностью от 63 до 220 МВт. Осуществлен выпуск ТГ мощностью 63 МВт, 110 МВт, 160 МВт. Прорабатывается продление этой серии путем включения в нее ТГ мощность 320 МВт. В мировой практике освоено серийное производство двухполюсных ТГ с воздушным охлаждением мощностью до 500 МВА. Первые машины были тяжелее и крупнее по габаритам, чем «воздушные», теперь – даже легче, чем «водородные» старых конструкций.

Необходимость в создании ТГ с воздушным охлаждением нового поколения очевидна, что связано с такими их преимуществами, как отсутствие дорогих вспомогательных систем – водяного и водородного хозяйства и требующихся для них дополнительных систем и пло-

Типи турбогенераторов

Наименование серии*	Расшифровка	Система охлаждения		
		Обмотка статора	Сердечник статора	Обмотка ротора
T2 - 2,5 - 2; T2 - 4 - 2; T2 - 6 - 2; T2 - 12 - 2 («Электросила»); T-2,5-2УЗ; T-4-2УЗ; T6-2УЗ; T-12-2УЗ (Лысьвинский завод)	T — турбогенератор; 2 — вторая серия; 2,5 — мощность, МВт, 2 — двухполюсный, УЗ — климатическое исполнение и категория размещения	Косвенное воздушное	Непосредственное воздушное	Косвенное воздушное
TВ2 - 30 - 2; TВ2 - 100 - 2; TВ2 - 150 - 2 («Электросила»)	В — водородное охлаждение	Косвенное водородом	Непосредственное водородом	Косвенное водородом
ТВФ-63-2ЕУЗ; ТВФ-110-2ЕУЗ («Электросила»)	Ф — форсированное охлаждение ротора	Косвенное водородом		Непосредственное водородом
ТВВ - 160 - 2ЕУЗ; ТВВ - 220 - 2ЕУЗ; ТВВ - 320 - 2ЕУЗ; ТВВ - 500- 2ЕУЗ; ТВВ - 800 - 2ЕУЗ; ТВВ-1000-2УЗ; ТВВ-1200-УЗ	ВВ — водородно-водяное охлаждение, Е — единая серия	Непосредственное водой		Непосредственное водородом
ТГВ-200-2; ТГВ-200-2Д; ТГВ-200-МТ; ТГВ-200-2М; ТГВ-300-2; ТГВ-500-2 («Электротяжмаш»)	ТГВ — турбогенератор с водородно-водяным охлаждением обмоток, М — модификация	Непосредственное водородом	Непосредственное водородом	Непосредственное водородом
ТГВ - 500, 800, ТГВ - 200 - 2М («Электротяжмаш»)		Непосредственное водой		
ТВМ-300, ТВМ-500 («Сибэлектротяжмаш»)	М — масляное охлаждение статора погружного исполнения, В — водяное охлаждение обмотки ротора	Непосредственное маслом		Непосредственное водой

\* Число после первой черточки — мощность в МВт.

щадей, объемов и несущих конструкций. Эти преимущества «воздушных» ТГ особенно проявляются при реконструкции энергоблоков ТЭС с заменой старых генераторов, их вспомогательного оборудования и систем тиристорного возбуждения (вместо электромашинных) в условиях ограниченного пространства для размещения,

например, на ТЭЦ. Переход в полному воздушному охлаждению возможен за счет совершенствования существующих конструкций ТГ, для чего необходимо решать следующие задачи [4,5]:

1) на основе анализа мирового опыта и результатов исследований, разрабатывать, теоретически и экспериментально обосновывать

оптимальные схемы компоновки ТГ;

2) необходимо разработать, исследовать эффективные схемы вентиляции, конструкцию и параметры вентиляторов, элементы вентиляционных систем;

3) необходимо разрабатывать, внедрять в производство прогрессивные технологические процессы

Таблица 3

Технические данные турбогенераторов серии ТВМ ( $\cos\phi = 0,85$ )

Тип	Мощность активная, МВт	Напряжение статора, кВ	Ток статора, кА	Напряжение возбуждения, В	Ток возбуждения, А	КПД, %
ТВМ-300-2	300	20	10,2	282	4420	98,8
ТВМ-500-2	500	36,75	9,24	430	5560	98,8

с применением современных материалов и оборудования;

4) следует освоить производство и исследовать свойства общей конструкции и узлов ТГ нового поколения с воздушным охлаждением, подтвердить их технологичность и эффективность;

5) следует разработать конструкцию, отработать технологию изготовления, испытать в условиях эксплуатации АСТГ (типа ТЗФА-110-2) с воздушным охлаждением, подтвердить высокий уровень разработки, определить области допустимых и необходимых режимов применения.

Эти теоретические разработки, технологические и конструктивные решения направлены на усовершенствование конструкции, повышение надежности и других важных эксплуатационных показателей ТГ, таких как:

- увеличение срока службы, повышение взрыво- и пожаробезопасности;
- увеличение межремонтных периодов;
- сокращение объема периодических ремонтов;
- повышение маневренности, в том числе обеспечение возможности работы в режимах с потреблением реактивной мощности;
- снижение трудоемкости и себестоимости производства ТГ.

Также, кроме высокой надежности, разработанные усовершенствованные конструкции узлов должны удовлетворять требованиям технологичности, повышению ремонтпригодности и обеспечению контроля в условиях эксплуатации.

В СССР к созданию машин с полным воздушным охлаждением

приступили более 30 лет тому назад. В начале 90-х годов ГП «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина) разработал серию воздушных ТГ серии «ТА» в диапазоне мощностей от 120 до 320 МВт. В 2000 г. были завершены испытания и отгружен на Миrowsкую ТЭС, где успешно эксплуатируется, головной образец серии ТА-120-2М-У3 мощностью 120 МВт с полным воздушным охлаждением.

Основные технико-экономические преимущества ТГ с воздушным охлаждением:

- повышенный коэффициент готовности 0,997 – 0,998 по сравнению с 0,95 – 0,995 для ТГ с непосредственным водородным и жидкостным охлаждением;
- значительно упрощены условия эксплуатации и ремонта, сокращающие сроки и стоимость ремонтов;
- простота конструкции, предопределяющая сокращение периода разработки и внедрения головных образцов;
- повышение маневренности;
- возможность создания облегченного корпуса, отсутствие масляных уплотнений, отсутствие необходимости применения дорогостоящих материалов для создания этих уплотнений;
- отсутствие систем водородного и водяного охлаждения, материалов и систем обеспечения этих систем (меди с присадкой серебра, уплотнительной резины, фторопластовых шлангов, полых медных проводников и т.д.).

Кроме всего вышперечисленного, следует принимать во внимание оценку стоимости ущерба от возможного пожара и от снижения

расходов на создание систем противопожарной защиты.

Применение полного воздушного охлаждения в ТГ серии ТА возможно путем применения прогрессивных конструкторских и технологических решений:

- 1) для ротора следует применять непосредственное охлаждение обмотки с раздачей газа из подпазового канала по радиальным щелевидным отверстиям в медных проводниках обмотки с выбросом нагретого газа в воздушный зазор;
- 2) сердечники статора и обмотка статора охлаждаются воздухом по системе радиальных и аксиальных каналов без поступления воздуха, охлаждающего статор, в воздушный зазор, что снижает механические потери и нагрев охлаждающего газа;
- 3) применение косвенного охлаждения для обмотки статора возможно при использовании новой утоньщенной изоляции класса нагревостойкости «F», электротехнической стали толщиной 0,35 мм с низкими удельными потерями, снижением объема тока в пазу, благодаря применению несимметричных многопараллельных обмоток с числом параллельных ветвей, превышающим число полюсов (ТА-120-2МУЗ), в сочетании с соединением фаз в треугольник (ТА-35-2МУЗ).

На заводе «Электротяжмаш» уже изготовлены ТГ с воздушной системой охлаждения мощностью 120 и 160 МВт [4,5]. На базе имеющейся оснастки возможно изготовление генератора мощностью 200 – 220 МВт в активной длине 4 м (вместо 5 м у ТГВ-200 и ТГВ-200-2М) с габаритами, позволяющими установить его на существующие

**Значения мощности и веса турбогенераторов серии ТА и ТЗФ с воздушной системой охлаждения**

Тип	Мощность, МВт	Масса, т	Производитель
ТЗФП-120-2	120	178	«Электросила»
ТА-120-2	120	257	«Электротяжмаш»
ТА-160-2	160	300,5	«Электротяжмаш»
ТЗФП-160-2М	160	243	«Электросила»
ТЗФ-220-2	220	268	«Электросила»
ТЗФ-350-2	350	280	«Электросила»

фундаменты. Цены отечественных «воздушных» ТГ мощностью 220 МВт сравнялись с зарубежными фирмами и находятся на уровне 5 – 6 млн долларов, но они уступают мировым аналогам по удельному соотношению мощности и веса. Поэтому идет поиск решений по улучшению этого показателя. Новые разработки конструкций ТГ направлены не только на повышение мощности в исходном габарите и на увеличение значения КПД, но и на уменьшение материалоемкости для повышения конкурентоспособности ТГ на мировом рынке [6].

Воздушные ТГ требуют небольших изменений в системе вентиляции ТГ, установленных на станциях:

- демонтаж центробежного компрессора;
- модернизация осевого вентилятора, что может быть выполнено и апробировано в процессе очередного капремонта на установленных на станциях ТГ, без транспортировки их на завод-изготовитель.

Выполнение указанных работ по модернизации может послужить основой для поставки машин серии ТАВ-320 для замены действующих генераторов ТГВ-300.

К числу ограничений, которые необходимо соблюдать при проектировании ЭМ, наряду с максимально допустимыми механическими и электрическими нагрузками, величиной допустимых температур активных элементов конструкций и возможностью осуществления технологических операций, относятся нормативы по установлению массогабаритных параметров конструкций. Последние характеризуют эффективность геометрии машины, степень рациональности выбора и использования конструкционных материалов и трудоемкость технологических операций. Общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует оценка его конкурентоспособности, одним из главных критерием которых являются массогабаритные характеристики ТГ.

Таблица 4

В табл. 4 приведены данные сравнительного анализа конструкций ТГ украинского («Электротяжмаш») и российского производства («Электросила», г. С.-Петербург) [5], для сравнения соотношения мощности машин и их весовых показателей. Условное соотношение веса активной и неактивной частей составляет, соответственно, 85% и 15%.

Из данных табл. 4 следует, что вес ТГ завода «Электротяжмаш» остается выше российской продукции. Но возможно уменьшение массы ТГ при переходе от водородного к воздушному охлаждению путем внесения изменений в конструкцию неактивной зоны ТГ [6]. В табл. 5 приведены данные этих машин.

Изменения в конструкцию неактивной зоны должны быть направлены на обеспечение технических и технологических требований эксплуатации ТГ, а именно:

- обеспечение достаточной механической прочности конструкции;
- соблюдение герметичности газового пространства;
- учет особенностей компоновки газоохладителей.

При реабилитации и модернизации ТГ непосредственно на действующих блоках 200–500 МВт следует выполнить ряд технических и организационных мероприятий, которые позволят повысить режимную маневренность ТГ и упростить конструкцию:

Таблица 5

**Сравнение мощности и массы турбогенераторов производства завода «Электротяжмаш» с водородным (серия ТГВ, ТВВ) и воздушным охлаждением**

Тип	Водородное охлаждение		Воздушное охлаждение		
	Мощность, МВт	Масса, т	Тип	Мощность, МВт	Масса, т
ТГВ-200-2М	200	321	ТА-160-2	160	300,5
ТГВ-300-2	300	364	ТА-200-2*	200	264
ТГВ-500-2	500	495	ТА-350-2*	350	303,5
ТВВ-1000-2	1000	561	-	-	-

\* – проект находится на стадии разработки.

- создание менее газоплотного, т.е. дешевого и легкого корпуса;
- возможность убрать масляные уплотнения вала;
- снятие водородной и/или водяной систем охлаждения и маслоснабжения уплотнений вала.

Следует также отметить отсутствие при изготовлении ТГ остродефицитных материалов, например, уплотнительной резины, фторопластовых шлангов, полых медных проводников и др.

Новая серия ТГ с воздушным охлаждением проектируется с учетом возможности их установки на фундаменты машин аналогичной мощности с водородным и водородно-водяным охлаждением, которые отработали свой ресурс. В первую очередь они могут быть установлены взамен генераторов 100, 150 и 200 МВт. Для такой замены в настоящее время рассматриваются генераторы 120 и 200 МВт Бурштынской и Змиевской ТЭС, а с также Ровенской АЭС.

## ВЫВОДЫ

1. ТГ – основной вид генерирующего оборудования, наиболее сложный тип электрических машин, в которых сочетаются различные проблемы: получение предельной мощности, оптимизация массо-габаритных показателей, получение высоких значений электромагнитных характеристик, обеспечение допустимого нагрева и достаточного охлаждения, обеспечение высокой статической и динамической прочности элементов конструкции, максимальной эксплуатационной надежности и экономичности и т.д.

2. При оценке направлений развития современного турбогенераторостроения необходимо учитывать приоритеты совместного развития мировой экономики и промышленности, технологические, ресурсные и экологические возможности, энергетические, политические, демографические проблемы, а также необходимость учета взаимного влияния всех ука-

занных факторов друг на друга. Иными словами, целесообразно применять комплексный подход.

3. Работы по совершенствованию конструкции, повышению качества и экономичности ТГ должны вестись с учетом усиления конкурентной борьбы за право поставок энергетического оборудования на мировой рынок, что требует проведения работ, в том числе и по такому фактору, как снижение массогабаритных показателей ТГ.

4. При выборе конструкции ТГ и обеспечении требований его надежности необходимо учитывать широкий спектр характеристик электроприемников энергосистемы и динамичность режимов эксплуатации.

5. Необходимо проводить широкое внедрение комплексных систем технической диагностики в режимах on-line, при плановых и аварийных ремонтах для своевременного выявления предаварийного состояния машин, устранения имеющихся неисправностей и исключения длительного простоя ТГ из-за аварийного выхода из строя.

6. Актуален вопрос повышения единичной мощности ТГ, т.к. это является одним из реальных направлений энергосбережения. Это возможно, т.к. общая мощность энергосетей стала выше, т.е. устойчивее в случае внезапного отключения мощного генерирующего элемента системы. Рост единичной мощности ТГ приводит к снижению удельных затрат на материалы, на удельные капиталовложения при сооружении станций и, в результате, к снижению стоимости электроэнергии. Также перспективно рассмотрение использования сверхпроводимости в турбо-генераторостроении, что позволит снизить массу ТГ и повысить КПД.

7. Для обеспечения устойчивости работы энергосистемы необходимо, чтобы ТГ регулировали (чаще – потребляли) из сети избыток реактивной мощности. Классические ТГ не рассчитаны на эти режимы, поэтому одним из воз-

можных способов решения проблемы является применение ТГ нового, асинхронизированного типа.

8. Современные исследования в турбогенераторостроении в мировой практике направлены на отказ в ТГ мощностью до 300 МВт и более от водородного охлаждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 7(287). – С. 11–16.

2. Шевченко В.В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины // Збірник наукових праць Донецького Інституту залізничного транспорту. – 2012. – № 29. – С. 77–81.

3. Шевченко В.В., Лизан І.Я., Шевченко С.Е. Проблемы, перспективы и основные направления развития электроэнергетики и электрооборудования Восточной Украины // Актуальні проблеми економічного і соціального розвитку регіону: Збірник матеріалів регіональної НПК. – Красноармійськ: КП ДонНТУ, 2007. – С. 369–383.

4. Шевченко В.В., Шевченко С.Е., Шуджан Р.Я. Предложения по использованию сверхпроводников в электротехнических устройствах // Системи обробки інформації. – Харківський університет повітряних сил, 2007. – Вип.1(13). – С. 96–101.

5. Шевченко В.В., Минко А.Н. Сравнительная оценка массогабаритных параметров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – №3. – С. 108–112.

6. Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов. – Харьков: Монограф СПДФД Частышев А.В., 2012. – 248 с.