

УДК 621.313.322.025

В.В. Шевченко

Національний технічний університет «ХПИ», Харків

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПО ИХ РЕАБИЛИТАЦИИ

*Современное состояние энергосетей Украины позволяет вести работы по увеличению единичной мощности генераторов электростанций. При этом необходимо учитывать современные изменения условий работы энергосистем. Приобретение нового оборудования для ТЭС и АЭС невозможно из-за экономического кризиса, поэтому стоит вопрос внедрения новых методов диагностики работающего электрооборудования и проведения работ по его реабилитации.*

**Ключевые слова:** мощность, энергосистема, асинхронизированный турбогенератор, охлаждение, реабилитация электрооборудования.

### Введение

**Постановка проблемы.** Основной тенденцией в развитии турбогенераторостроения является создание агрегатов большой единичной мощности. При этом снижаются материальные расходы на единицу мощности и, что самое главное, повышается экономичность и КПД установок в целом. С 80-х годов прошлого века эта тенденция была приостановлена после изготовления трех турбогенераторов (ТГ) мощностью 1200 МВт из-за недостаточной мощности электросетей. Но в настоящее время потребность в генерирующих единицах большой мощности опять стала актуальна и возможна. Экономическое положение в стране делает невозможным проводить плановую замену оборудования на тепловых электростанциях, износ которого уже к 2006 г. оценивался практически в 90–100 %, [1, 2]. Поэтому необходимо искать новые методы, которые позволят продлить срок эксплуатации турбогенераторов путем проведения их реабилитации. Для чего необходимо применять новые системы диагностики. При возможности замены устаревшего турбогенератора следует использовать новые решения: устанавливать более мощные машины или даже другие типы.

**Цель статьи** – определить пути, проблемы и возможные решения при проектировании новых турбогенераторов и проведении реабилитации работающих.

### Основной материал

Факторами, которые сдерживают повышение единичной мощности ТГ, является состояние смежных отраслей производства (металлургия, химическая промышленность и т.д.), состояние энергосистем, а также необходимость обеспечения высокой степени надежности мощных агрегатов с повышенной электромагнитной, механической и тепловой нагрузкой.

Эксплуатационные характеристики действующих на большинстве электростанций ТГ старых типов, не всегда отвечают требованиям, обусловлен-

ным изменениями условий работы энергосистем. Синхронные ТГ старых типов на ТЭС недостаточно маневренны, существенно ограничены в потреблении реактивной мощности из сети. Это ограничивается возможностями систем охлаждения и возникающими избыточными механическими усилиями в торцевых пакетах сердечника статора, недостаточно стойкими, в частности, в режимах потребления реактивной мощности (в режимах недо возбуждения), ограниченными в возможностях контроля, сложными для автоматизации и др.

В ТГ старых типов наблюдается избыточный нагрев конечных (торцевых) пакетов сердечников статора с нарастающими в таких режимах механическими усилиями, что способствует «распушиванию» торцевых пакетов [6]. В старых конструкциях ТГ также несовершенны способы крепления лобовых частей обмоток статоров шнуровыми бандажами. Устарели и материалы, которые применяются для этой цели, в том числе прокладочные. Используемая система крепления приводит к ослаблению этих креплений, определяет усиление вибрации стержней и к возможным замыканиям в пазовых частях обмотки статора. Вибрации стержней обмоток в лобовых и пазовых частях вызывают нарушение герметичности трактов водяного охлаждения, что может спровоцировать аварию.

С учетом вышеизложенного при проектировании новых ТГ следует устанавливать, кроме основных (уточненных и новых), дополнительные требования, такие как:

– повышенная маневренность генераторов по выработке активной и реактивной энергии с возможностью глубокого потребления последней из электросети. Потребление реактивной мощности должно ограничиваться только фактором стойкости, а не нагревом и механическими процессами в торцевых зонах сердечника статора;

– при проектировании следует предусмотреть установку в генераторах тиристорных пусковых

устройств для обеспечения высокой маневренности (в частности, скорости пуска и останова) частотным методом;

- обеспечение возможности регулирования частоты вращения генераторов при сохранении неизменной частоты их связи с сетью для повышения экономических и режимных показателей электростанций. Это целесообразно и для некоторых нетрадиционных источников электроэнергии (ГЭС, ГАЭС, ветровых, приливных и др.);

- необходимо предусмотреть высокие управляемость и контролепригодность генераторного оборудования всех типов, (в том числе такого, которое регулируется по частоте вращения) с широкой степенью автоматизации.

Из-за изменения величины и характера нагрузки, больших «провалов» и более ярко выраженных «пиков» энергопотребления, значительного вклада в энергосистему электроэнергии тепловыми станциями с практически полностью изношенным оборудованием, [2], частота тока в электросети Украины последние несколько лет находится на уровне 49,5 – 49,2 Гц. Более низкие значения частоты опасны для работы всей энергосистемы и электрооборудования. Например, при снижении частоты в сети до 49,0 Гц реакторы энергоблоков АЭС должны разгружаться до 10 % номинальной тепловой мощности, а это может повлечь дополнительное увеличение дефицита мощности и осложнить аварийную ситуацию в энергосистеме. В ЕЭС России ситуация более стабильная, частота поддерживается в достаточно узких границах, и пределы наибольших отклонений частоты от 50 Гц меньше:  $\pm 0,15$  Гц, наблюдаются лишь у часа утренних пиков нагрузки [2 ÷ 4].

Небаланс реактивной составляющей в сети также вызывает изменение частоты.

Кроме проблемы поддержки уровня частоты в сети, существует проблема регулирования напряжения в сети. Сезонные и другие провалы и изменения нагрузки в системах с линиями 330 – 750 кВ приводят к появлению избытков реактивной мощности на уровне сотен Мвар и росту напряжения в линиях. Регулирование напряжения может осуществляться эффективно во всех режимах генератора по активной нагрузке и реактивной мощности (включая режим компенсатора при полном потреблении реактивной мощности) и не влияет на общую устойчивость генератора. Основным условием обеспечения статической устойчивости является правильный выбор настройки коэффициентов обратных связей регулятора в канале регулирования электромагнитного момента.

Чтобы нормализовать напряжение на станциях и в сети, необходимо осуществлять регулировку с компенсацией избытков реактивной мощности. Для решения этой проблемы является недостаточным наличие установленных реакторов, трансформаторов и автотрансформаторов с РПН. Существующие

проблемы могут дополнительно осложняться при эксплуатации энергосистем без надлежащего взаимодействия компаний, которые генерируют и передают. В этих условиях целесообразное распространение отечественного опыта применения технологий генерирования электроэнергии на основании турбогенераторов новых типов с расширенными нагрузочными характеристиками [4, 5].

Допускается кратковременное снижение действующего значения напряжения ниже допустимого в течение времени до 2,5 с, если оно вызвано перегрузкой сети в связи с включениями близко расположенного мощного технологического оборудования, приводящего к перегрузке и нарушениям в работе питаемой аппаратуры, потере и искажению данных. Длительное понижение действующего значения напряжения на более чем 2,5 с ниже допустимого, вызванное перегрузкой энергосети, приводит к сокращению срока службы электрооборудования, в том числе и генераторов [7].

Понижения напряжения до безопасных пределов можно осуществить путем смещения баланса реактивной и активной энергии электрического узла в сторону дополнительного потребления реактивной энергии за счет увеличения потерь  $\Delta Q_T$  в трансформаторах подстанций. Это возможно применять в режимах минимальных нагрузок, когда все другие способы – включение шунтирующих реакторов, изменение конфигурации (топологии) сети 110–220 кВ, перевод генераторов и синхронных компенсаторов в режим недовозбуждения (потребления реактивной мощности) – исчерпаны как резервные, а также при неисправности или выводе в плановый ремонт шунтирующих реакторов или их коммутационной аппаратуры.

Кроме того, возможно изменение режимов эксплуатации турбогенераторов ТЭС и АЭС с целью изменения численного соотношения вырабатываемой ими активной и реактивной энергии. Для этого наблюдаются режимы работы турбогенераторов АЭС с повышенными значениями коэффициентов мощности, что равняются 0,994 – 0,999. Это приводит к циклическим электродинамическим и термомеханическим влияниям на турбогенераторы, ускоренной деградации основного оборудования АЭС, снижению коэффициента готовности и коэффициента использования установленной мощности энергоблоков.

К эффективному, хорошо управляемому электротехническому оборудованию, которое положительно влияет на качества электроэнергии, принадлежат асинхронизированные турбогенераторы (АСТГ). Эти генераторы обеспечивают повышение маневренности, стойкости и потребление избыточной реактивной энергии. Такие генераторы предназначены для модернизации, реконструкции, расширения существующих и проектирование новых электростанций. Они обеспечивают нормализацию ре-

жимов сетей энергосистем по напряжению, реактивной мощностью, повышая их пропускную способность и стойкость.

На роторе АСТГ размещены две обмотки с взаимно перпендикулярными магнитными осями. Обмотки питаются от отдельных источников; в установленном режиме токи в обеих обмотках поддерживаются равными. При динамическом изменении режима система автоматического регулирования проводит одновременное и независимое друг от друга управление значениями токов в обмотках возбужде-

ния по заданному закону. Подобное регулирование обеспечивает возможность работы АСТГ в режимах глубокого потребления реактивной мощности без нарушения устойчивости.

На заводе «Электросила» был спроектирован и изготовлен первый АСТГ типа ТЗФА-110-2, мощностью 110 МВт (10,5 кВ,  $\cos\varphi = 0,95$ , 3000 мин<sup>-1</sup>) с воздушным охлаждением. В Харькове на ГП «Электротяжмаш» (табл. 1), был создан турбогенератор ТА-120-2 с полным воздушным охлаждением, P = 120 МВт, U = 10,5 кВ, 3000 мин<sup>-1</sup>, масса- 257 т.

Таблица 1

Основные параметры турбогенератора типа ТА-120

№ пп	Название параметра	Величина параметра	
		при допустимых температурах по классу В	при допустимых температурах по классу F
1	Номинальная мощность, МВт/МВА	120/150	160/188
2	Номинальное напряжение, кВ	10,5	10,5
3	Номинальная температура циркуляционной воды, °С	33	33
4	Максимальная длительно допустимая мощность, МВт /МВА	144/170	Уточняется по результатам исследований
5	Температура циркуляционной воды при максимально допустимой мощности, °С	33	Уточняется по результатам исследований
6	Отношение короткого замыкания, о.е.	0,533	0,4
7	Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси ( $X'_d$ ), о.е.	0,198	0,25
8	Коэффициент полезного действия, %	98,4	98,5
9	Допустимое количество пусков/остановок в год за время службы	500/10000	500/10000
10	Наработка на отказ, часы	27000	27000
11	Ресурс между капитальными ремонтами, годы	10	Уточняется по результатам исследований

Были проработаны варианты конструкций роторов АСТГ с концентрическими катушками, уложенными в пазы ротора различной глубины (рис. 1), и выбрано оптимальное для данного АСТГ сочетание между количеством глубоких и мелких пазов.

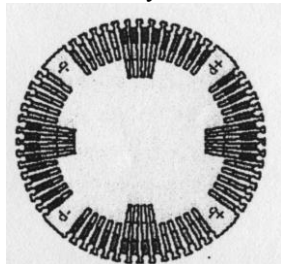


Рис. 1. Ротор ТЗФА-110-2

Были определены спектральные составы МДС и магнитной индукции в воздушном зазоре в установленном эксплуатационном режиме (обе обмотки возбуждения питаются одинаковым током) для двух вариантов выполнения числа глубоких пазов на роторе: 16 и 24, при неизменном общем числе пазов 56 и 64. Установлено, что потери в стали статора в первом варианте существенно меньше, чем во втором. В итоге выбран вариант с числом глубоких пазов 16. Трех-

контурная система охлаждения обеспечивает эффективный теплоотвод в пазовой и лобовой частях обмоток возбуждения, вызванного ростом "ампервитков" ротора из-за наличия на нем второй обмотки.

В последние годы рост единичных мощностей ТГ замедлился по причинам технического характера, которые связаны с необходимостью внедрения сложных методов охлаждения, ограничениями по механическим напряжениям ротора и вибрациям. Несмотря на заметные преимущества водородного и водо-водородного охлаждения, опыт их применения показал, что экономически целесообразно в настоящее время возобновить производство ТГ с полным воздушным охлаждением с учетом последних достижений техники и технологии. Эти машины оказываются более простыми в эксплуатации и менее пожароопасными. За рубежом освоено производство турбогенераторов с воздушным охлаждением до 300 (450) МВт, а в Украине – до 200 МВт.

В процессе исследований разработаны оптимальные схемы компоновки конструкции ТГ с воздушным охлаждением, обеспечивающие минимальный вес и габариты, высокие технологические параметры и технологичность изготовления:

- выполнять разъемный статор;
- обмотка статора с изоляцией, изготовленной по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки и вводит упругий слой в изоляцию для возможности аксиального расширения обмотки статора,
- упругое крепление сердечника в корпусе статора;
- расщиповка, склейка, запечка крайних пакетов сердечника, выполнять скос зубцов;
- применение продольных выравнивающих пазов с магнитными вставками по полю.

В последнее время развиваются различные методы диагностики состояния электрических машин, основанные, например, на выполнении мониторинга потребляемого тока с последующим выполнением специального спектрального анализа полученного сигнала, что позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов ТГ. Важным преимуществом такого подхода является то, что проведение мониторинга тока генератора может быть выполнено как непосредственно на нем, так и в электрошите управления. Все методы диагностики направлены на создание возможности реабилитации работающего электрооборудования. Для этого диагностику необходимо вести не только в момент планового или аварийного останова для ремонта, но и в режиме эксплуатации, в режиме on-line.

Применение систем функциональной диагностики совместно с испытаниями и проверками во время ревизий и осмотров позволяет максимально увеличить межремонтный период, а при необходимости проведения ремонта более точно определить место и степень повреждения, минимизировав тем самым его объем и время проведения. Для Украины, где экономическое положение не позволяет проводить замену устаревшего электрооборудования согласно срока его эксплуатации, своевременная диагностика и реабилитация является перспективной и позволяет решать вопрос дальнейшей эксплуатации электростанций.

### Выводы

1. Эксплуатационные характеристики действующих на большинстве электростанций ТГ старых типов не отвечают требованиям, обусловленным изменениями условий работы энергосистем. ТГ старых типов на ТЭС недостаточно маневренны, огра-

ничены в регулировании параметров мощности, выдаваемой в сеть.

2. При проектировании новых ТГ следует устанавливать, кроме основных, дополнительные требования: повышенную маневренность генераторов по выработке активной и реактивной энергии, установку в генераторах тиристорных пусковых устройств для обеспечения высокой маневренности частотным методом, обеспечение возможности регулирования частоты вращения генераторов при сохранении неизменной частоты их связи с сетью для повышения экономических и режимных показателей электростанций, применение АСТГ вместо классических типов ТГ. Необходимо предусмотреть высокие управляемость и контролепригодность генераторного оборудования с широкой степенью автоматизации.

3. Целесообразно повышать единичную мощность проектируемых ТГ, проводить диагностику установленных ТГ с целью их реабилитации.

### Список литературы

1. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине / В.В. Шевченко // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 7(287). – С. 11-16.
2. Шевченко В.В. Энергосбережение в энергосистемах. Анализ, проблемы, перспективы / В.В. Шевченко, Л.Н. Омельченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Вип. 3/2009 (56), частина 1. – С. 161-166.
3. Шевченко В.В. Перспективна оцінка совершенствования энергетической системы Украины / В.В. Шевченко // Електрика (Росія, Москва). – 2012. – № 9. – С. 10-15.
4. Шевченко В.В. Системний підхід до розвитку енергетики України / В.В. Шевченко, С.Н. Лунай // Вісник Кременчуцького НУ ім. М. Остроградського, № 3/2012 (74). – С. 28-32.
5. Шевченко В.В. Пути преодоления возможного энергокризиса в энергосистеме Украины / В.В. Шевченко // Збірник наукових праць Донецького Інституту залізничного транспорту. – Донецьк, 2012. – № 29. – С. 77-81.
6. Кузьмин В.В. Об оптимальном использовании материалов и снижении массогабаритных показателей торцевой зоны неактивных частей турбогенераторов / В.В. Кузьмин, В.В. Шевченко, А.Н. Минко // Вестник НТУ «ХПИ» Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2011. – № 6. – С. 106-112.

Поступила в редакцию 15.08.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Болюх, НТУ «ХПИ», Харьков.

### ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ РОБІТ ПО ЇХ РЕАБІЛІТАЦІЇ

В.В. Шевченко

*Розглядаються питання про необхідність втілення нових методів діагностики працюючого електрообладнання і проведення робіт по його реабілітації.*

**Ключові слова:** потужність, енергосистема, асинхронізований турбогенератор, охолодження, реабілітація електроустаткування.

### THE WAYS OF INCREASE POWER OF TURBOGENERATORS DURING CONDUCTING OF WORKS ON THEIR REHABILITATION

V.V. Shevchenko

*A question about the necessity of introduction new methods of diagnostics the working electrical equipment and conducting of works on his rehabilitation is examined.*

**Keywords:** power, grid, asynchronous turbogenerator, cooling, rehabilitation of electrical equipment.