

## УДК 620.9

КАЧАН С.А., к.т.н., доцент (БНТУ)  
г. Минск

### ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Цель ограничения глобального потепления значительно ниже  $2^{\circ}\text{C}$  может быть достигнута только в том случае, если энергетические системы будут почти полностью освобождены от выбросов  $\text{CO}_2$  в долгосрочной перспективе. Декарбонизация энергетики имеет важное значение, поскольку ископаемые виды топлива остаются доминирующими при производстве электроэнергии во всем мире а, значит, именно они ответственны за большую долю глобальных выбросов парниковых газов.

Возобновляемые источники энергии, использующие энергию ветра и солнечного излучения, играют важную роль в декарбонизации энергосистем. В последние годы эти технологии значительно снизили свою стоимость и стали экономически конкурентоспособными. Однако для возобновляемых источников энергии характерна переменная, нестабильная генерация, зависящая от погодных условий, суточных и сезонных изменений. Так, по данным [1], изменение мощности, выдаваемой ветроэлектрическими и фотоэлектрическими установками, может составить до 50% за 15 минут и до 90% за 2 минуты соответственно.

Сказанное повышает требования к маневренности тепловых электростанций (ТЭС), работающих на органическом топливе. ТЭС должны эксплуатироваться в переменном режиме: повышать и снижать мощность чаще и быстрее, работать с частичными нагрузками, вводиться и выводиться из работы с большей регулярностью.

Большинство существующих угольных электростанций были спроектированы для продолжительной работы при полной нагрузке, чтобы максимизировать эффективность, надежность и прибыль. Угольные электростанции в большинстве случаев менее гибки по сравнению с энергоблоками, работающими на природном газе. Однако, как показывает опыт Германии и Дании, даже устаревшие электростанции, работающие на каменном угле (и даже некоторые электростанции, работающие на буром угле), уже сегодня обеспечивают довольно высокую эксплуатационную гибкость. При этом современные угольные энергоблоки обладают значительно улучшенными показателями маневренности.

В таблице 1 приводится сравнение показателей маневренности ТЭС, работающих на органическом топливе: одноцелевых газотурбинных установок (ГТУ), комбинированных парогазовых установок (ПГУ) с котлами-утилизаторами и паротурбинных угольных энергоблоков, работающих на каменном и буром угле [2].

Таблица 1. Сравнение показателей маневренности наиболее распространенных (в числителе) и современных (в знаменателе) электростанций разного типа [2]

Показатель	ГТУ	ПГУ	ТЭС на ка- менном угле	ТЭС на бу- ром угле
Минимальная нагрузка, %N <sub>НОМ</sub>	$\frac{40 - 50}{20^* - 50}$	$\frac{40 - 50}{(20^*)30 - 40}$	$\frac{25 - 40}{25 - 40}$	$\frac{50 - 60}{35 - 50}$
Средняя скорость по- вышения нагрузки, %N <sub>НОМ</sub> /мин	$\frac{8 - 12}{10 - 15}$	$\frac{2 - 4}{4 - 8}$	$\frac{1,5 - 4}{3 - 6}$	$\frac{1 - 2}{2 - 6}$
Время пуска из горя- чего состояния, ми- нут или часов	$\frac{5 - 11 \text{ мин}}{5 - 10 \text{ мин}}$	$\frac{60 - 90 \text{ мин}}{30 - 40 \text{ мин}}$	$\frac{2,5 - 3 \text{ ч}}{1,3 - 2,5 \text{ ч}}$	$\frac{4 - 6 \text{ ч}}{1,25 - 4 \text{ ч}}$
Время пуска из хо- лодного состояния, минут или часов	$\frac{5 - 11 \text{ мин}}{5 - 10 \text{ мин}}$	$\frac{3 - 4 \text{ ч}}{2 - 3 \text{ ч}}$	$\frac{5 - 10 \text{ ч}}{3 - 6 \text{ ч}}$	$\frac{8 - 10 \text{ ч}}{5 - 8 \text{ ч}}$

\* для с ГТУ последовательного сжигания

Повышение маневренности обычно не снижает эффективность электростанции, но увеличивает нагрузку на компоненты, сокращая их срок службы, снижая производительность и увеличивая затраты.

Меры по модернизации были реализованы на целом ряде существующих электростанций, что привело к улучшению основных показателей маневренности: более высоким скоростям изменения нагрузки, снижению технического минимума и более короткому времени пуска. Так, в Германии, где электроэнергетическая сеть уже испытывает существенные колебания в выработке электроэнергии из-за большой доли мощности возобновляемых источников, Ассоциация инженеров по энергетике, окружающей среде и процессам разработала план действий по повышению гибкости национальных угольных электростанций.

Рассмотрим некоторые из технических возможностей повышения маневренности действующих угольных электростанций. Так, непрямо́е сжигание предполагает установку пылеугольного бункера, расположенного между угольными мельницами и горелками вместе с дополнительными трубопроводами и клапанами. При использовании такого устройства мгновенная скорость горения не определяется производительностью мельницы в данный момент. Такое разделение скорости измельчения угля и скорости подачи его к горелкам приводит к значительному снижению инерции системы зажигания. Непрямо́е сжигание может обеспечить скорость изменения нагрузки до 10% N<sub>НОМ</sub>/мин (по сравнению с обычными скоростями изменения нагрузки 2 – 5 % N<sub>НОМ</sub>/мин) [3].

Использование предварительной сушки бурого угля, хотя оно в первую очередь и предназначено для повышения эффективности, также может обеспечить метод непрямо́го сжигания, поскольку высушенное топливо будет подаваться в бункеры перед сжиганием. Таким образом, эта система обеспечивает возможность увеличения скорости изменения нагрузки и снижения минимальной мощности, равно как и использование угля для пуска и стабилизации горения без

необходимости сжигания природного газа или мазута в качестве пускового топлива.

Вспомогательный розжиг запальной горелки на сухом буром угле вместо использования природного газа или мазута исследован на буроугольной электростанции Janschwalde, Германия, где запальные горелки (сжигающие мазут и природный газ) были заменены на горелки, работающие на осушенном буром угле. Согласно [2], работа запальной горелки на осушенном буром угле для вспомогательного сжигания снизила минимальную нагрузку с  $36\%N_{\text{ном}}$  до  $26\%N_{\text{ном}}$ . При этом снижается потребность в более дорогом топливе, таком как мазут или природный газ; повышается общая эффективность энергоблока, а также может быть увеличена полезная мощность и скорость изменения нагрузки.

Работа мельниц с номинальной нагрузкой при снижении мощности энергоблока позволяет снизить полезную мощность, выдаваемую в сеть в периоды низкого потребления электроэнергии (например, ночью).

Переход с работы с несколькими мельницами на работу с одной мельницей позволяет оставшейся в эксплуатации мельнице работать с нагрузкой, близкой к расчетной. Это значительно снижает минимальную нагрузку при одновременном повышении стабильности работы горелок (при условии установки дополнительных регуляторов пламени) [2]. Так, эксперименты на энергоблоке №7 Heilbronn (800 МВт) и Vexbach (721 МВт), электростанциях, работающих на каменном угле в Германии (начало эксплуатации в 1985 и 1983 годах соответственно), показали, что переход с двухмельничного на одномельничный режим позволил снизить минимальную нагрузку до  $12,5\%N_{\text{ном}}$  [2].

Модернизация системы управления повышает точность, надежность и скорость управления, что позволяет эксплуатировать оборудование ближе к технологическим ограничениям: например, возможна работа при высоких температурах без существенного сокращения срока службы материалов. Модернизация системы управления обычно сочетается с модернизацией оборудования: котла, турбины и их вспомогательного оборудования. Например, блоки G и H буроугольной электростанции Weisweiler, Германия, каждый номинальной мощностью 600 МВт, в результате модернизации снизили минимальную нагрузку на 110-170 МВт и увеличили скорость изменения мощности на порядка 10 МВт/мин. Стоимость модернизации каждого энергоблока составила 60-65 миллионов евро [2].

На буроугольной электростанции Neurath, Германия, за счет модернизации системы управления, а также такого оборудования как котел, конденсатор и градирня, на блоке E номинальной мощностью 600 МВт минимальная нагрузка была снижена с 440 МВт ( $73\%N_{\text{ном}}$ ) до 290 МВт ( $48\%N_{\text{ном}}$ ). Кроме того, эффективность была повышена на 0,6%, а скорость линейного изменения увеличилась на 6 МВт/мин — до 12 МВт/мин ( $2\%N_{\text{ном}}/\text{мин}$ ). Общая стоимость этой модернизации составила 70 миллионов евро [2].

Модернизация системы управления также помогает сократить время пуска или выбрать наилучшую в текущих условиях стратегию — например, повышение маневренности при повышенном износе оборудования или более щадящие

режимы эксплуатации с меньшей нагрузкой на компоненты (особенно толсто-стенные из легированных материалов). Уменьшение толщины стенок ключевых компонентов и специальная конструкция паровой турбины и котла могут улучшить маневренность энергоблока.

Детали, работающие под давлением, будут лучше выдерживать быстрые и значительные изменения температуры, связанные с включением/выключением и сильно изменяющейся нагрузкой, если температурные градиенты будут снижены. Для этого толщину металла нужно уменьшить.

Таким образом, при проектировании электростанции необходимо сделать выбор: либо обеспечить ее большую гибкость (и тогда нужно стремиться к уменьшению толщины стенок), либо стремиться к большей эффективности (тогда нужно повышать параметры пара и, соответственно, увеличивать толщину нагруженных элементов).

Выходом может стать использование новых высококачественных материалов. Так, применение материала Alloy 617 вместо P92 позволяет использовать коллекторы высокого давления со стенками на 23% тоньше. Это увеличивает допустимую скорость изменения температуры на 60% в режиме нагрузки 50-100%  $N_{\text{ном}}$  [2].

В разных источниках указываются разные скорости изменения нагрузки, но самые высокие, предлагаемые в настоящее время поставщиками, достигают 10%  $N_{\text{ном}}$  /мин [3].

Поскольку доминирующим механизмом разрушения маневренных агрегатов становится не образование пустот ползучести, а скорее взаимодействие ползучести и усталости, традиционные стандарты проектирования, основанные на допустимой ползучести в течение 200 000 часов, все чаще рассматриваются проектировщиками оборудования электростанций как менее применимые. Расчетный срок службы, основанный на 100 000 часов (или даже меньше) без потери фактического срока службы установки для циклического режима работы, становится более подходящим из-за более низкой удельной деформации ползучести [3].

Снижение минимальной нагрузки котла может быть достигнуто с помощью различных подходов. Например, в случае использования новых котлов следует уделять особое внимание конструкции испарителя, а достигнуть требуемой цели в уже существующих системах можно путем модификации экономайзера [3].

Одним из способов расчета минимальной нагрузки при проектировании новых котлов является использование в испарителе труб с внутренними нарезками или ребрами, что обеспечивает более высокую интенсивность теплопередачи при меньшем расходе воды [3].

Регулировка температуры дымовых газов котла после экономайзера для достижения проектного значения при нагрузках до 30% без пропаривания экономайзера может быть осуществлена путем добавления байпаса экономайзера со стороны воды вместе с насосами рециркуляции питательной воды и трубопроводами [3].

Использование дубль-блоков котлов, работающих на одну паровую турбину, обеспечит высокую гибкость со скоростью изменения нагрузки, аналогичной современным ГТУ и возможностью снижения мощности с 1100 МВт примерно до 175 МВт ( $16\% N_{\text{ном}}$ ) [3].

Для повышения маневренности паровые турбины, работающие на суперсверхкритические параметры пара, разрабатываются с охлаждением высокотемпературных элементов. Так, цилиндр высокого давления турбины SST5-6000 Siemens использует перепускную систему охлаждения. Небольшое количество охлаждающего пара проходит через радиальные отверстия в узкое кольцевое пространство между внутренним и внешним корпусами цилиндра. Охлаждающий пар проходит через внутренний корпус, снижая температуру поверхности. Более низкие температуры поверхности снижают напряжение ползучести и защищают внутреннюю поверхность внешнего корпуса. Таким образом, толщина стенки внешнего корпуса может быть уменьшена для более быстрого прогрева и улучшения пусковых характеристик. К примеру, такая турбина номинальной мощностью 750 МВт была установлена на каменноугольной электростанции Lunen, Германия. Общие затраты на эту новую электростанцию составили 1,4 миллиарда евро [2].

Аккумуляция тепловой энергии в системе регенерации может использоваться для запасаения тепла в периоды спада потребности в электроэнергии и его отдачи в пиковые периоды.

Цикл зарядки теплового аккумулятора осуществляется в периоды низкой нагрузки (например, ночью) путем передачи тепла от питательной воды к системе хранения. Для поддержания постоянной температуры питательной воды из паровой турбины необходимо отбирать больше пара, что приводит к снижению ее полезной мощности (без изменения работы котла).

Согласно [2], использование аккумуляции теплоты в течение 2-8 часов может снизить минимальную мощность, подаваемую в сеть, на 5-10%. Разрядка накопленной тепловой энергии может временно увеличить полезную мощность на  $5\%N_{\text{ном}}$  без дополнительного расхода топлива [3]. Резервуары с горячей водой меньшего размера (работающие менее 30 минут) можно использовать для повышения скорости изменения нагрузки [2].

В [2] приводится сравнительная характеристика показателей маневренности трех современных угольных электростанций: Belchatyw (Польша), Walsum и Vohberg (Германия) (см. табл. 2).

Электростанция Belchatyw, Польша, является крупнейшей электростанцией в Европе и входит в список крупнейших в мире электростанций, работающих на органическом топливе. С общей установленной мощностью 5472 МВт она производит почти 20% всей вырабатываемой электроэнергии в Польше. «Belchatyw-2» мощностью 858 МВт, работающий на буром угле, был введен в эксплуатацию в 2011 году и является перспективным буроугольным энергоблоком.

«Блок 10» электростанции Walsum, Германия, был введен в эксплуатацию в 2013 году; он работает на каменном угле и имеет установленную мощность 725 МВт.

Электростанция Vohberg, Германия, работает на буром угле, и имеет общую установленную электрическую мощность 2575 МВт. «Блок Р», введенный в 2012 году, имеет электрическую мощность 675 МВт.

Таблица 2. Сравнение показателей маневренности современных угольных электростанций

Показатель	Belchatuw (Польша)	Walsum (Германия)	Vohberg (Германия)
Вид топлива	бурый уголь	каменный уголь	бурый уголь
Минимальная нагрузка, %N <sub>ном</sub>	45	35	35
Средняя скорость повышения нагрузки, %N <sub>ном</sub> /мин	2 – 6	3,5 – 6	4,6 – 6
Время пуска из горячего состояния, минут	140	66	75 – 85
Время пуска из холодного состояния, минут	360	290	290 – 330

В заключение отметим, что гибкая работа угольных электростанций имеет два противоречивых эффекта, оказываемых на выбросы CO<sub>2</sub>. С одной стороны, работа в переменном режиме может снизить общие выбросы CO<sub>2</sub>, поскольку ТЭС производит меньше электроэнергии в течение года. С другой стороны, снижение минимальной нагрузки за счет модернизации может уменьшить эффективность электростанции при низких уровнях нагрузки, увеличивая при этом удельные выбросы CO<sub>2</sub>. При этом, однако, данный эффект смягчается за счет исключения дорогостоящих остановов и пусков с интенсивным выбросом CO<sub>2</sub>.

#### Список литературы:

1. Илюшин, П.В. Возобновляемые источники энергии в составе энергосистем: вызовы и пути решения / XII международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2022» – Нижний Новгород, 16 – 20 мая 2022.
2. Flexibility in thermal power plants – With a focus on existing coal-fired power plants. / Agora Energiewende – 2017.
3. Henderson, C. Increasing the flexibility of coal-fired power plants / IEA Clean Coal Centre // September – 2014