

## ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОТЛОВ

Канд. техн. наук КАЧАН С. А.<sup>1)</sup>, магистр техн. наук БАРАНОВСКИЙ И. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>РУП «БелНИПИэнергопром»

В настоящее время в Белорусской энергосистеме имеет место проблема обеспечения баланса мощностей в ночные часы, что связано с большой долей мощности ТЭЦ и приводит к необходимости их разгрузки ниже теплового графика. В перспективе, при ожидаемом вводе двух крупных энергоблоков АЭС, эта проблема существенно обострится и регулирование суточного графика без применения специальных мероприятий станет невозможным [1–3].

По прогнозам, мощность АЭС составит около трети потребности энергосистемы в пики электропотребления и около половины – в часы его спада. При этом электроснабжение потребителей почти полностью перейдет к АЭС и ТЭЦ, и на ТЭЦ ляжет несвойственная для них функция регулятора суточных графиков электрических нагрузок в больших масштабах, включая всю переменную часть этих графиков [1–3].

В таких условиях глубина снижения отпуска электроэнергии от ТЭЦ в энергосистему станет определяющим фактором при выборе способа повышения маневренности турбоустановок [2, 3]. В большой степени этому условию соответствует разгрузка турбоустановок в ночные часы с передачей нагрузки теплофикационных отборов на специально устанавливаемые электрокотлы (ЭК), расходующие на нагрев сетевой воды электроэнергию, вырабатываемую теми же турбоустановками ТЭЦ.

В [3] приведены результаты исследований по определению требуемой мощности электрокотлов  $N_{эк}$  в зависимости от спроса на маневренную полупиковую мощность ТЭЦ и оценена сравнительная энергетическая и экономическая эффективность применения ЭК на паротурбинных ТЭЦ, использующих крупные теплофикационные паротурбинные установки (ПТУ) типа «Т». Снижение выдачи мощности  $\Delta P_{рг}$  от турбоустановки в энергосистему, согласно [3], находится как сумма фактического снижения ее мощности  $\Delta N_{тф}$  ниже теплового графика и потребления электроэнергии электрокотлами  $N_{эк}$

$$\Delta P_{рг} = \Delta N_{тф} + N_{эк}. \quad (1)$$

Величины  $\Delta N_{тф}$  и  $N_{эк}$  можно выразить через снижение нагрузки отопительных отборов  $\Delta Q_{отб}$ , которое соответствует теплопроизводительности электрокотлов  $Q_{эк}$  ( $Q_{эк} = \Delta Q_{отб}$ ):

$$\Delta N_{тф} = W_{тф} Q_{эк}; \quad (2)$$

$$N_{\text{эк}} = Q_{\text{эк}} / \eta_{\text{эк}}, \quad (3)$$

где  $W_{\text{тф}}$  – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении отборов турбоустановок;  $\eta_{\text{эк}}$  – КПД электродкотлов.

С учетом (1)–(3) мощность, потребляемая электродкотлами, составит:

$$N_{\text{эк}} = \frac{\Delta P_{\text{рг}}}{\eta_{\text{эк}} W_{\text{тф}} + 1}. \quad (4)$$

Из анализа (4) видно, что необходимая мощность электродкотлов будет тем выше, чем больше задаваемое энергосистемой снижение выдачи турбоагрегата  $\Delta P_{\text{рг}}$  и чем ниже удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении на данном турбоагрегате  $W_{\text{тф}}$ .

Парогазовые установки (ПГУ), как конденсационные, так и теплофикационные, получают все большее распространение в Белорусской энергосистеме. Рассмотрим эффективность разгрузки теплофикационной ПГУ утилизационного типа (УПГУ) на примере блока ПГУ-230 МВт Минской ТЭЦ-3. В состав блока входит энергетическая газотурбинная установка (ГТУ) мощностью около 160 МВт, теплота сбросных газов которой используется в двухконтурном котле-утилизаторе (КУ) для выработки пара для ПГУ. Отпуск теплоты осуществляется преимущественно из отборов паровой турбины (до ~150 МВт), а также в небольшом количестве (около 10–25 МВт) – от КУ.

Известно, что величина удельной выработки электроэнергии для ПГУ  $W_{\text{ПГУ}}$  на номинальном режиме существенно превышает значения этого показателя для ПТУ, но при этом более резко снижается при разгрузке. Это объясняется тем, что в теплофикационных УПГУ выработка электроэнергии на тепловом потреблении складывается из выработки как ПТУ, так и ГТУ, а разгрузка УПГУ осуществляется за счет уменьшения подачи топлива в камеру сгорания ГТУ и сопровождается достаточно резким снижением экономичности ее работы.

Для теплофикационной УПГУ с противоаварийной паровой турбиной (ПТ) и отпуском теплоты только отработавшим паром ПТ

$$W_{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{ПГУ}}}{Q_{\text{ПГУ}}} = \frac{N_{\text{ГТУ}} + N_{\text{ПТУ}}}{Q_{\text{отб}}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{Q_{\text{отб}}} + W_{\text{ПТ}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{ПГУ}}$ ,  $N_{\text{ПТУ}}$ ,  $N_{\text{ГТУ}}$  – электрическая мощность ПГУ, а также ПТУ и ГТУ в ее составе;  $Q_{\text{ПГУ}} = Q_{\text{отб}}$  – отпуск теплоты от ПГУ, равный отпуску теплоты из отборов паровой турбины;  $W_{\text{ПТ}}$  – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении ПТ.

Расход теплоты в свежем паре  $Q_0$  на паровую турбину из уравнения ее теплового баланса можно приближенно оценить по формуле

$$Q_0 \approx Q_{\text{отб}} (W_{\text{ПТ}} / \eta_{\text{эм}} + 1), \quad (6)$$

а из уравнения теплового баланса котла-утилизатора как

$$Q_0 = N_{ГТУ} \left( \frac{1}{\eta_{ГТУ}^3} - \frac{1}{\eta_{эм}} \right) \eta_{КУ}^n \eta_{тп}, \quad (7)$$

где  $\eta_{КУ}^n$  – КПД котла-утилизатора, показывающий долю полезно используемой теплоты уходящих газов ГТУ в парогенерирующих поверхностях (без учета отпуска теплоты от «хвостовой» поверхности газодводяного сетевого подогревателя);  $\eta_{тп}$  – КПД теплового потока, учитывающий потери теплоты при транспорте пара от КУ к паровой турбине;  $\eta_{эм}$  – электромеханический КПД.

После несложных преобразований получим:

$$N_{ГТУ} = \frac{\frac{Q_0}{\eta_{КУ}^n \eta_{тп}}}{\frac{1}{\eta_{ГТУ}^3} - \frac{1}{\eta_{эм}}}; \quad (8)$$

$$W_{ПГУ} = \frac{\frac{W_{ПТ} + 1}{\eta_{эм}}}{\left( \frac{1}{\eta_{ГТУ}^3} - \frac{1}{\eta_{эм}} \right) \eta_{КУ} \eta_{тп}} + W_{ПТ}. \quad (9)$$

При расчете реальной УПГУ дополнительно необходимо учесть наличие отпуска теплоты с сетевой водой непосредственно от КУ, а также величину конденсационной выработки паровой турбины и пр.

С использованием данных энергетических характеристик оборудования ПГУ-230 Минской ТЭЦ-3 и формул (5)–(9) произведены расчеты, по результатам которых на рис. 1 построены зависимости  $N_{ПГУ}$ ,  $N_{ГТУ}$ ,  $N_{ТУ}$  (сплошные линии), а также  $W_{ПГУ}$  (штриховая линия) от нагрузки  $Q_{отб}$  отопительных отборов паровой турбины (при  $t_{нв} = -15$  °С).

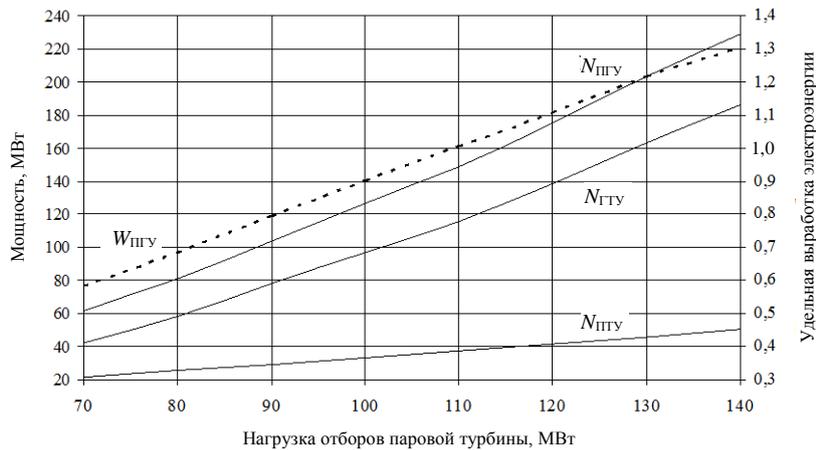


Рис. 1. Зависимость показателей ПГУ от нагрузки отопительных отборов паровой турбины

Как видно из рис. 1, при снижении нагрузки отборов от номинальной величины в два раза (с ~140 до ~70 МВт) теплофикационная мощность паровой турбины уменьшается также примерно вдвое, так как  $W_{ПТ}$  снижает-

ся незначительно. При этом мощность ГТУ падает почти в 4,5 раза (до ~22,5 % исходной, т. е. на ~145 МВт), мощность ПГУ в целом снижается примерно в 3,7 раза (до ~27 % исходной, т. е. на ~170 МВт), соответственно величина  $W_{\text{ПГУ}}$  уменьшается примерно в два раза. Если при этом нагрузку отборов полностью передать на электрокотлы, то снижение отпуска электроэнергии от ПГУ в сеть составит ~252,5 МВт, что означает потребление электроэнергии из энергосистемы около ~20 МВт.

На рис. 1 минимальная нагрузка ГТУ принята равной ~22,5 % номинальной. Такие режимы глубокой разгрузки ГТУ сопровождаются резким ухудшением их экономических и экологических показателей.

Если ограничить разгрузку ГТУ на уровне 50 % (~95 МВт) из условия сохранения удовлетворительных экологических и экономических ее показателей, то минимальная нагрузка отопительных отборов составит ~100 МВт (~70 %), теплофикационная мощность ПТУ – около 33 МВт, а мощность ПГУ-230 – около 125 МВт.

В этом случае при передаче на электрокотлы 40 МВт теплоты отпуск электроэнергии в энергосистему составит ~85 МВт, т. е. выдача мощности от ПГУ в энергосистему снизится примерно на 145 МВт (~65 % номинальной).  $W_{\text{ПГУ}}$  в этом случае снизится с ~1,3 до ~0,9, т. е. примерно на 30 %.

Поскольку величина удельной выработки электроэнергии на теплофикационных ПТУ примерно в два раза ниже ( $W_{\text{ПТУ}} \approx 0,5-0,6$ ), для снижения выдачи электроэнергии от паротурбинных блоков на такую же величину потребуются уменьшение нагрузки отопительных отборов и соответственно увеличение мощности электрокотлов почти в два раза.

По данным [3], при снижении отпуска электроэнергии в энергосистему от блока 180 МВт на  $\Delta N_{\text{отп}} \approx 145$  МВт требуется  $N_{\text{эк}} \approx 95$  МВт, а при снижении отпуска электроэнергии в энергосистему от блока 250 МВт на  $\Delta N_{\text{отп}} \approx 250$  МВт требуется  $N_{\text{эк}} \approx 163$  МВт. Для наглядности на рис. 2 приведены зависимости необходимой мощности электрокотлов  $N_{\text{эк}}^{\text{ПГУ-230}}$ ,  $N_{\text{эк}}^{\text{T-250}}$ ,  $N_{\text{эк}}^{\text{T-180}}$ ,  $N_{\text{эк}}^{\text{T-100}}$  и снижения мощности  $\Delta N_{\text{отп}}^{\text{ПГУ-230}}$ ,  $\Delta N_{\text{отп}}^{\text{T-250}}$ ,  $\Delta N_{\text{отп}}^{\text{T-180}}$ ,  $\Delta N_{\text{отп}}^{\text{T-100}}$  ПГУ-230 и ПТУ типа Т-250-240, Т-180-130, Т-100-130 (по данным [3]) соответственно от величины снижения отпуска электроэнергии в энергосистему.

Как видно, доля мощности электрокотлов  $N_{\text{эк}}$  от  $\Delta P_{\text{пр}}$  составляет ~30 % для утилизационных ПГУ и ~70 % – для традиционных ПТУ. В [3] также произведена оценка сравнительной энергетической и экономической эффективности применения электрокотлов на ТЭЦ. Критерием энергетической эффективности принято суточное снижение расхода топлива теплофикационной установкой при переводе ее с базового режима работы на маневренный полупиковый (с разгрузкой в ночные часы на котлы, использующие органическое топливо, –  $\Delta B_{\text{сут}}^{\text{к}}$ , или электрокотлы –  $\Delta B_{\text{сут}}^{\text{эк}}$ )

$$\Delta B_{\text{сут}} = (B_{\text{б}} - B_{\text{пр}}) T_{\text{пр}}, \quad (10)$$

где  $B_{\text{б}}$ ,  $B_{\text{пр}}$  – часовой расход условного топлива при работе установки в базовом режиме и в режиме с разгрузкой (определяется по расходным

характеристикам установок);  $T_{\text{пр}}$  – продолжительность ночной разгрузки турбоустановок.

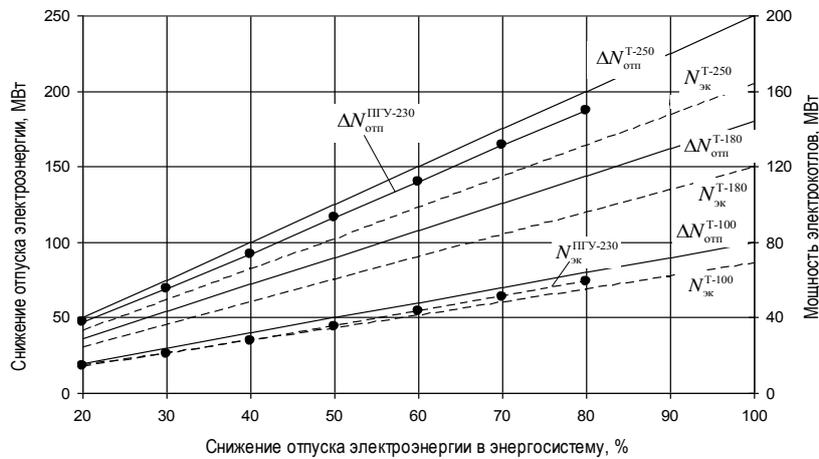


Рис. 2. Зависимость снижения отпуска электроэнергии (сплошные линии) и требуемая мощность электродвигателей (штриховые линии) от относительного снижения отпуска электроэнергии в энергосистему от установок различного типа

Расчеты маневренных режимов показали [3], что разгрузка теплофикационных отборов на электродвигатели по сравнению с их разгрузкой на топливоиспользующие котлы не дает прямого энергетического эффекта в виде экономии топлива, поскольку процесс работы электродвигателей связан с «двойной» трансформацией энергии и сопровождается дополнительными ее потерями. Основным эффектом применения электродвигателей заключается в значительном сокращении фактической глубины разгрузки теплофикационных установок по электрической мощности: от  $\sim 1/3 \Delta P_{\text{пр}}$  для паротурбинных до  $\sim 2/3 \Delta P_{\text{пр}}$  – для парогазовых установок.

В условиях ввода АЭС этот эффект становится особенно ценным, так как существенным образом расширяет диапазон возможной маневренной мощности на ТЭЦ, вплоть до стопроцентного снижения выдачи электрической мощности от установок в энергосистему.

Применение электродвигателей на ТЭЦ приводит к небольшому относительному перерасходу топлива, составляющему (при  $T_{\text{пр}} = 6,8$  ч) для установок различного типа

$$\Delta b_{\text{сут}} = \frac{\Delta B_{\text{сут}}^{\text{эк}} - \Delta B_{\text{сут}}^{\text{к}}}{B_0} \cdot 100 \approx 0,05 - 0,50 \%$$

Наибольшая величина перерасхода топлива соответствует применению электродвигателей на ПГУ в связи с более резким снижением их экономичности при разгрузке. Тем не менее этот перерасход может рассматриваться как приемлемая плата за повышение маневренности.

## ВЫВОДЫ

1. В условиях ввода в Белорусской энергосистеме АЭС, когда для действующих электростанций значительно сокращается зона базовой электрической нагрузки, применение электродвигателей на ТЭЦ обеспечивает эффек-

тивное использование теплофикационных турбоустановок в маневренном режиме, максимально снижая выдачу электрической мощности в энергосистему в ночные часы (вплоть до нуля).

2. Доля мощности электродвигателей  $N_{эк}$  от глубины требуемого снижения выдачи мощности в энергосистему  $\Delta P_{пр}$  существенно ниже для теплофикационных парогазовых установок (менее 30 %) по сравнению с традиционными паротурбинными установками (более 60 %).

3. В сравнении с разгрузкой отопительных отборов на топливоиспользующие котлы применение электродвигателей на ТЭЦ приводит к небольшому (менее 0,5 %) перерасходу топлива, однако достигаемое при этом снижение отпуска электроэнергии значительно выше фактической разгрузки установок: от полутора (для утилизационных парогазовых установок) до трех раз (для паротурбинных установок).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, А. М. О балансе мощностей Белорусской энергосистемы и проблемах регулирования суточного графика нагрузок: настоящее и перспективы / А. М. Короткевич, О. Г. Фоменко // Энергетическая стратегия. – 2008. – № 2. – С. 24–28.

2. Трутаев, В. И. Применение электродвигателей на ТЭЦ как эффективный способ получения маневренной электрической мощности в энергосистеме Беларуси с вводом АЭС / В. И. Трутаев, В. М. Сыропушинский // Энергетическая стратегия. – 2010. – № 4. – С. 19–24.

3. Экономическая эффективность применения электродвигателей на ТЭЦ для регулирования суточных графиков электрических нагрузок Белорусской энергосистемы после ввода АЭС: отчет о НИР (заключ.) / РУП «БелНИПИэнергопром». – Минск, 2010.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 04.05.2012

УДК 532.5, 536.2, 621.183, 621.039.5

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ВИХРЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Канд. техн. наук КАЩЕЕВ В. П.<sup>1)</sup>, инж. ВОРОНОВ Е. О.<sup>2)</sup>,  
магистр техн. наук КАЩЕЕВА О. В.<sup>3)</sup>, докт. техн. наук ГАШЕНКО В. А.<sup>4)</sup>,  
инж. УЛАСЮК Н. Н.<sup>1)</sup>, канд. техн. наук СОРОКИН В. В.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>РУП «МИНСКЭНЕРГО»,

<sup>3)</sup>Университет Штутгарта (IGE),

<sup>4)</sup>Электрогорский научно-исследовательский центр  
по безопасности атомных электростанций

**Обогащение газов парами жидкости и получение туманов.** Во всех промышленных парниково-тепличных комбинатах применяются установки для создания высокой влажности, так как без нее не укореняются черенки растений, плохо растут и дают малый выход товарной продукции посаженные растения. Существующие устройства повышения влажности в помещениях или примитивны и в недостаточной мере выполняют свое предназначение, или же являются дорогостоящими для рядового потребителя. Еще хуже положение с устройствами, которые могут мелкодисперсно рас-