

ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОТЛОВ

Канд. техн. наук КАЧАН С. А.¹⁾, магистр техн. наук БАРАНОВСКИЙ И. Н.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾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 электродкотлы (ЭК), расходующие на нагрев сетевой воды электроэнергию, вырабатываемую теми же турбоустановками ТЭЦ.

В [3] приведены результаты исследований по определению требуемой мощности электродкотлов $N_{эк}$ 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 электродкотлами $N_{эк}$

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

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

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

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

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 противодействующей 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

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

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

После несложных преобразований получим:

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

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

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 $N_{\text{ПГУ}}$, $N_{\text{ГТУ}}$, $N_{\text{ТУ}}$ (сплошные линии), а также $W_{\text{ПГУ}}$ (штриховая линия) от нагрузки $Q_{\text{отб}}$ отопительных отборов паровой турбины (при $t_{\text{нв}} = -15^\circ\text{C}$).

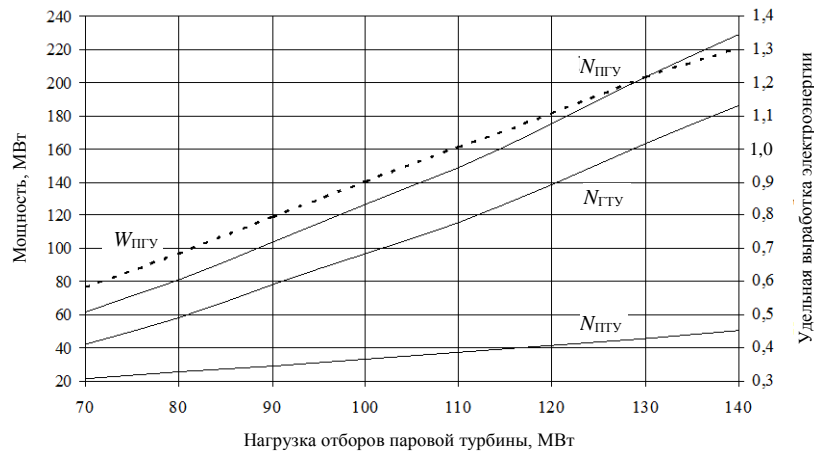


Рис. 1. Зависимость показателей ПГУ от нагрузки отопительных отборов паровой турбины

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 $W_{\text{ПТ}}$ 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 электродоты, 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 электродоты 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 электродотов 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 электродотов $N_{\text{эк}}^{\text{ПГУ-230}}$, $N_{\text{эк}}^{\text{T-250}}$, $N_{\text{эк}}^{\text{T-180}}$, $N_{\text{эк}}^{\text{T-100}}$ 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 электродотов $N_{\text{эк}}$ 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 электродотов 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 электродоты – $\Delta B_{\text{сут}}^{\text{эк}}$)

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

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.

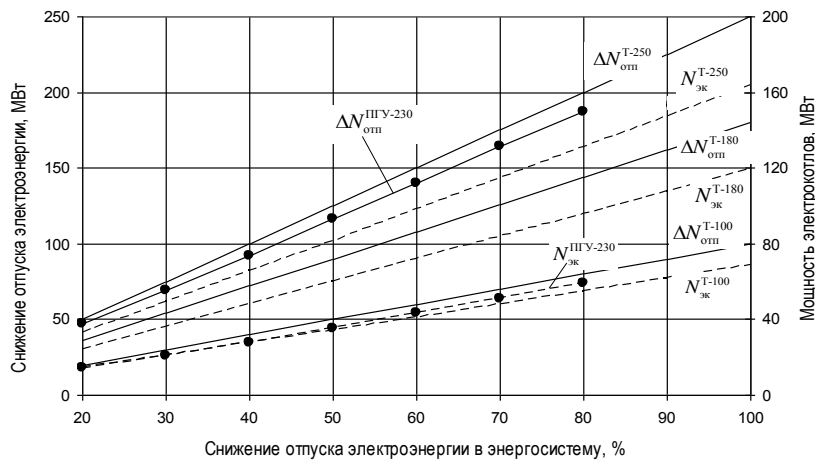


Рис. 2. Зависимость снижения отпуска электроэнергии (сплошные линии) и требуемая мощность электродвигателей (штриховые линии) от относительного снижения отпуска электроэнергии в энергосистему от установок различного типа

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.¹⁾, инж. ВОРОНОВ Е. О.²⁾,
магистр техн. наук КАЩЕЕВА О. В.³⁾, докт. техн. наук ГАШЕНКО В. А.⁴⁾,
инж. УЛАСЮК Н. Н.¹⁾, канд. техн. наук СОРОКИН В. В.¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾РУП «МИНСКЭНЕРГО»,

³⁾Университет Штутгарта (IGE),

⁴⁾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-