УДК 621.577

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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Энергетическая эффективность применения парокомпрессионных теплонасосных установок (ТНУ) в качестве источников теплоснабжения и теплохладоснабжения доказана давно. Однако практическое использование в государствах СНГ ТНУ получили только в последние годы в дефицитных по топливу регионах и на объектах, где применению тепловых насосов оказывается государственная поддержка.

Утилизация сбросной низкопотенциальной теплотыопределяет энергетические, экономические и экологические преимущества ТНУ, однакопотреблениеэлектроэнергии компрессором ТНУ существенно эти преимущества ограничивает, и прежде всего из-за двойной трансформации энергии: преобразование теплоты в электроэнергию на тепловых электростанциях и обратное её преобразование в теплоту в тепловом насосе.

Проведенный в [1] системный анализ энергетической эффективности ТНУ показывает, что энергетическая и экономическая целесообразность применения этих установок в теплоснабжении зависит от состояния и технического уровня развития энергетики страны, в которой они применяются.

Энергетический баланс ТНУ можно представить в виде

$$Q_{отп}^{ТНУ} = Q_{исх}^{ТНУ} + N_{э}^{ТНУ}, \quad (1)$$

где $Q_{отп}^{ТНУ}, Q_{исх}^{ТНУ}$ – отпущенная потребителю теплота и исходная низкопотенциальная утилизируемая теплота;

$N_{э}^{ТНУ}$ – мощность, потребляемая ТНУ, включая мощность компрессора ТНУ, и затраты электроэнергии на собственные нужды ТНУ.

При этом коэффициент преобразования энергии в ТНУ

$$\varepsilon = \frac{Q_{отп}^{ТНУ}}{N_{э}^{ТНУ}} = \frac{Q_{исх}^{ТНУ} + N_{э}^{ТНУ}}{N_{э}^{ТНУ}} \quad (2)$$

зависит от уровня температур низкопотенциальной и отпускаемой теплоты и технологической схемы установки.

Коэффициент системной эффективности теплогенерирующих установок должен учитывать весь расход первичного энергоресурса, в том числе расход теплоты топлива на производство электроэнергии на замыкающей КЭС энергосистемы.

При расчете системной эффективности ТНУ возможны разные подходы учёта потока утилизируемого низкопотенциального тепла: от его учёта в полном объёме (что обуславливает самое низкое значение системного КПД ТНУ) до полного его исключения. Последнее оправдывается тем, что сбросное тепло технологических процессов и тем более низкопотенциальное тепло природного происхождения не входит в приходную часть топливно-энергетического баланса и по существующей терминологии в значительной своей части относится к невозвратным потерям энергии [1].

Однако даже в случае использования тепла природного происхождения (вода и воздух с температурой окружающей среды, геотермальное тепло) его надо очистить, собрать и доставить к ТНУ, на что необходимы определённые затраты. Утилизации низкопотенциальных тепловых отходов промышленности в ТНУ могут противостоять альтернативные варианты их использования в целях энергосбережения, в том числе и на предприятии, на котором они образованы, поэтому на эти отходы может устанавливаться цена, увеличивающая затраты на их утилизацию в ТНУ [1].

В [1] предлагается учитывать стоимость низкопотенциальной теплоты коэффициентом $\xi_{исх}$, тогда формула для расчёта коэффициента системной эффективности ТНУ с учётом (1)–(2) принимает вид:

$$K_{ТНУ}=\frac{Q_{отп}^{ТНУ}}{Q_{исх}^{ТНУ}\xi_{исх}+Q_{топл}^{КЭС}}=¿\frac{Q_{отп}^{ТНУ}}{N_{э}^{ТНУ}(1-\varepsilon)\xi_{исх}+N_{э}^{ТНУ}(1+\alpha_{сн}^{ТНУ})(1+\alpha_{ЛЭП})/\eta_{зам}^{КЭС}}=¿\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)\xi_{исх}+(1+\alpha_{сн}^{ТНУ})(1+\alpha_{ЛЭП}$$

Коэффициент системной эффективности альтернативной котельной определяется формулой:

$$K_{кот}=\frac{Q_{отп}^{кот}}{Q_{топл}^{кот}+Q_{топл}^{КЭС}}=\frac{Q_{отп}^{кот}}{Q_{отп}^{кот}/\eta_{кот}+Q_{отп}^{кот}\alpha_{сн}^{кот}(1+\alpha_{ЛЭП})/\eta_{зам}^{КЭС}}=¿\frac{1}{1/\eta_{кот}+\alpha_{сн}^{кот}(1+\alpha_{ЛЭП})/\eta_{зам}^{КЭС}}(4)$$

В формулах (3) – (4):

$\alpha_{ЛЭП}$ – доля потерь электроэнергии в магистральных и распределительных сетях энергосистемы;

$\alpha_{сн}^{ТНУ}$ – доля расхода электроэнергии на собственные нужды ТНУ, исчисляемая от расхода электроэнергии на тепловой насос;

$\eta_{кот}$, $\alpha_{сн}^{кот}$ – КПД котлов альтернативной котельной и доля расхода электроэнергии по котельной на собственные нужды;

$\eta_{зам}^{КЭС}$ – КПД замыкающей КЭС энергосистемы.

В расчетах значения коэффициента преобразования энергии в ТНУ и экономического коэффициента низкопотенциального сбросного тепла принимались вариантно в диапазоне ε = 2,5…5; $\xi_{исх}$ = 0…0,3.

Анализ расчетов показывает, что значение $К_{ТНУ}$ сильно зависит от варьируемых показателей: снижаясь при понижении ε и росте $\xi_{исх}$ [1]; существенно также влияние $\eta_{зам}^{КЭС}$.

Для ТНУ с наиболее характерными значениями ε = 3,0…4,0 в зависимости от $\xi_{исх}$ величина $К_{ТНУ}$ превышает $К_{кот}$:

– в 1,15…1,5 раза при $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,4;

– в 1,4…1,9 раза при $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,5;

– в 1,5…2,0 раза при $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,55.

В [1] отмечается, что в середине прошлого столетия при КПД КЭС на начальные параметры пара 90 ата и 500°С порядка $\eta_{зам}^{КЭС}$ ≈ 25% $К_{ТНУ}$ во всём указанном диапазоне изменения ε даже при $\xi_{исх}$ = 0 оказывался ниже $К_{кот}$ в 1,05…1,4 раза. Другими словами в тот период ТНУ не имели системного энергетического преимущества перед котельными, что не могло не сказаться на формировании негативного к ним отношения у части специалистов-энергетиков.

Рассмотрим, как меняется значение коэффициента системной эффективности ТЭЦ при переходе от паротурбинных к парогазовым технологиям, как на самих ТЭЦ, так и на замыкающих КЭС энергосистемы.

Коэффициент системной эффективности ТЭЦ можно представить в виде

$$К_{ТЭЦ} = \frac{Q_{отп}^{ТЭЦ}}{Q_{топл}^{ТЭЦ} - Q_{топл}^{э}}, \quad (5)$$

где $Q_{топл}^{ТЭЦ}, Q_{топл}^{э}$ – полный расход теплоты топлива на ТЭЦ и часть этого расхода теплоты, относимая на выработку электроэнергии.

Если отнести весь эффект от теплофикации на отпуск теплоты $Q_{отп}^{ТЭЦ}$, то есть принять расход теплоты топлива, относимый на производство электроэнергии теплофикационной паротурбинной установкой (ПТУ-ТЭЦ), равным расходу топлива на производство такого же количества электроэнергии на замыкающей КЭС с КПД $\eta_{зам}^{КЭС}$, то

$$W_{тф}\left(¿¿\eta_{тф}^{ТЭЦ}-1/\eta_{зам}^{КЭС}\right)$$
$$¿$$
$$¿$$
$$1$$
$$¿$$

$$K_{ПТУ-ТЭЦ}=\frac{Q_{отп}^{ТЭЦ}}{\left(N_{тф}/\eta_{тф}^{ТЭЦ}+N_{к}/\eta_{к}^{ТЭЦ}+Q_{отп}^{ТЭЦ}/\eta_{Q}^{ТЭЦ}\right)-\left(N_{тф}+N_{к}\right)/\eta_{зам}^{КЭС}}=¿\frac{Q_{отп}^{ТЭЦ}}{\left(W_{тф}/\eta_{тф}^{ТЭЦ}+\acute{N}_{к}/\eta_{к}^{ТЭЦ}+1/\eta_{Q}^{ТЭЦ}\right)-(}$$

где $\eta_{тф}^{ТЭЦ}, \eta_{к}^{ТЭЦ}$ – КПД производства электроэнергии в теплофикационном и конденсационном циклах на ТЭЦ;

$\eta_{Q}^{ТЭЦ}$ – КПД производства теплоты на ТЭЦ;

$N_{тф}$, $N_{к}$ – теплофикационная и конденсационная мощности турбоустановки (при этом полная мощность турбоустановки на клеммах генератора $N_{э} = N_{тф} + N_{к}$);

$W_{тф}$ – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении;

$\acute{N}_{к}$ – удельная конденсационная мощность турбоустановки, приходящаяся на единицу отпускаемой от ТЭЦ теплоты.

Расчеты показывают, что на режиме теплового графика коэффициент системной эффективности паротурбинных ТЭЦпревышает значение коэффициента системной эффективности котельных в 2...3 раза при паротурбинной замыкающей КЭС с $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,4 и в 1,35...1,55 раза при парогазовой замещающей КЭС с $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,55. Большие значения $К_{ПТУ-ТЭЦ}$ соответствуют более высоким значениям начальных параметров пара и, соответственно, удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении $W_{тф}$ = 0,55.

Аналогично коэффициент системной эффективности газотурбинной ТЭЦ (когенерационной ГТУ) можно представить в виде

$$K_{ГТУ-ТЭЦ}=\frac{Q_{отп}^{ГТУ-ТЭЦ}}{N_{э}^{ГТУ}/\eta_{э}^{ГТУ}-N_{э}^{ГТУ}/\eta_{зам}^{КЭС}}. \quad (7)$$

Можно показать, что отпуск теплоты $Q_{отп}^{ГТУ-ТЭЦ}$ от ГТУ мощностью $N_{э}^{ГТУ}$ определяется ее КПД $\eta_{э}^{ГТУ}$ и КПД котла-утилизатора $\eta^{КУ}$

$$1-\eta_{э}^{ГТУ}/\eta_{эм}^{ГТУ}$$
$$N_{э}^{ГТУ}/\eta_{э}^{ГТУ}¿$$
$$¿$$
$$Q_{отп}^{ГТУ-ТЭЦ}=¿$$

тогда

$$K_{ГТУ-ТЭЦ} = \frac{1 - \eta_э^{ГТУ} / \eta_{эм}^{ГТУ}}{\eta^{КУ} / \eta_э^{ГТУ}}$$

При $\eta_э^{ГТУ}$ = 0,33...0,35 и $\eta^{КУ}$ = 0,75...0,85 в случае паротурбинной замыкающей КЭС с $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,4 системная эффективность ГТУ-ТЭЦ выше котельных в 3...5 раз; в случае парогазовой замыкающей КЭС с $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,55 системная эффективность ГТУ-ТЭЦ снижается и превышает системную эффективность котельных только в 1,4...1,7 раз.

В случае парогазовой замещающей КЭС с $\eta_{зам}^{КЭС}$ = 0,55 системная эффективность парогазовых ТЭЦ (ПГУ-ТЭЦ) выше котельных:

– в 1,5..2 раза для ПГУ-ТЭЦ на базе ГТУ с $\eta_э^{ГТУ}$ = 0,34 и двухконтурным котлом-утилизатором (аналог ПГУ-230 Минской ТЭЦ-3);

– примерно в 4 раза для перспективных ПГУ-ТЭЦ с трехконтурными котлами-утилизаторами на базе наиболее экономичных ГТУ с $\eta_э^{ГТУ}$ = 0,38.

Как видно из проведенного анализа, при низкой эффективности производства электроэнергии на КЭС, парокомпрессионные ТНУ не имеют энергетического преимущества перед обычными котельными ни в части эффективности использования топлива, ни в части сокращения выхода сбросного низкопотенциального тепла в окружающую среду.

С ростом эффективности тепловых электростанций, в том числе за счет применения на КЭС парогазовых технологий, энергетическая эффективность ТНУ существенно повышается, и эти установки находят все более широкоеприменение на практике.

Список литературы:

1. Трутаев, В. И. Системный анализ эффективности теплонасосных установок // Энергия и менеджмент, 2011. –№ 4(61) июль–август. – С. 2–9.