

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

ОБЛАСТИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С КОГЕНЕРАЦИОННО-ТЕПЛОАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ И ПИКОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Предложен подход по определению областей энергоэффективной работы систем энергоснабжения (СЭ) с когенерационно-теплонасосными установками (КТНУ) и пиковыми источниками теплоты (ПИТ) в системах теплоснабжения при условиях оптимальных режимов работы КТНУ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокомпрессионных теплонасосных установок (ТНУ) разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Ключевые слова: область энергоэффективной работы, энергоэффективность, система энергоснабжения, когенерационно-теплонасосная установка, пиковый источник теплоты, система теплоснабжения, безразмерный критерий энергетической эффективности.

Введение

Исследования режимов энергоэффективной работы систем энергоснабжения с когенерационно-теплонасосными установками проведены в ряде публикаций [1 – 13]. В исследованиях [8 – 9] на основе разработанных научных основ проведена комплексная оценка энергоэффективности парокомпрессионных теплонасосных станций (ТНС) с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокомпрессионных ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии. Энергоэффективность СЭ на основе комбинированных КТНУ исследована и оценена в работе [10], определены эффективные режимы работы СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокомпрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии. Исследования и оценка энергоэффективности СЭ на основе комбинированных КТНУ и ПИТ проведены в работе [11], определены эффективные режимы работы этих СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокомпрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии. В исследовании [12] на основе разработанных методических основ проведена оценка энергоэффективности систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ при условиях оптимальных режимов работы КТНУ для систем теплоснабжения, определены энергоэффективные режимы работы СЭ с КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокомпрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии. В исследовании [13] разработаны методические основы и определены области энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ при условиях оптимальных режимов работы КТНУ; определены энергоэффективные режимы работы СЭ с КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокомпрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Согласно [11 – 13], оптимальное распределение нагрузки между КТНУ и ПИТ (например, водогрейным топливным котлом, электрокотлом, солнечными коллекторами и тому подобное) в составе СЭ в значительной степени определяет энергетическую эффективность указанных СЭ. Такое распределение характеризуется долей нагрузки КТНУ в составе СЭ β , которую определяют как отношение тепловой мощности КТНУ к тепловой мощности СЭ $\beta = Q_{КТНУ}/Q_{СЭ}$. Оптимальные значения показателя β для СЭ с разными источниками теплоты для КТНУ при переменных режимах работы тепловой сети были определены на основе анализа результатов проведенных исследований [14 – 16].

В работе [11] предложено проводить комплексную оценку энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ по комплексному безразмерному критерию энергоэффективности:

$$K_{СЭ} = (1 - \beta) \cdot K_{ПИТ} + \beta \cdot K_{КТНУ}, \quad (1)$$

где $K_{ПИТ}$ – безразмерный критерий энергоэффективности пикового источника теплоты в составе СЭ (водогрейного топливного котла (ТК), электрокотла (ЭК), солнечных коллекторов и тому подобное), $K_{КТНУ}$ – безразмерный критерий энергоэффективности комбинированных КТНУ в составе СЭ.

В исследованиях [5, 10, 11] предложен безразмерный критерий энергоэффективности пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом $K_{КТНУ}$. Он получен на основе уравнения энергетического баланса для системы «Источник приводной энергии ТНУ – ТНУ – потребитель теплоты от ТНУ» с учетом влияния источников приводной энергии пароконденсационных ТНУ и с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ. С учетом такого подхода безразмерный критерий энергетической эффективности комбинированных КТНУ, согласно [5, 10], имеет вид:

$$K_{КТНУ} = Q_{КТНУ} / Q_m = \eta_{ЭД} \cdot \eta_{ЭП} \cdot \varphi^{КТНУ} \cdot \eta_{mn}, \quad (2)$$

где Q_m – мощность, затраченная газопоршневым двигателем-генератором (ГПД) для выработки электрической энергии для привода ТНУ, $\eta_{ЭД}$ – эффективный КПД газопоршневого двигателя, $\eta_{ЭП}$ – КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем из [5], $\varphi^{КТНУ}$ – действительный коэффициент преобразования КТНУ из исследования [10], который определяют как: $\varphi^{КТНУ} = (\varphi_m + K_{ГПД}^m) \cdot \eta_{mn}$, где φ_m – теоретическое значение коэффициента преобразования ТНУ без учета мощности утилизационного оборудования ГПД, $K_{ГПД}^m$ – тепловой коэффициент ГПД, равный отношению тепловой утилизационной мощности ГПД к его электрической мощности, η_{mn} – энергетический КПД ТНУ, который учитывает все потери энергии в тепловом насосе из [5 – 6]; η_{mn} – КПД теплового потока, который учитывает потери энергии и рабочего агента в трубопроводах и оборудовании ТНУ.

При условии $K_{КТНУ} = 1$ комбинированная КТНУ передает в СЭ такую же тепловую мощность, затраченную для выработки электроэнергии для привода ТНУ. Чем больше значение этого показателя, тем более эффективной и конкурентоспособной будет СЭ с КТНУ.

В исследовании [11] определены области энергоэффективной работы КТНУ разных уровней мощности, которые были получены на основе исследования [10] и определены по безразмерному критерию энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ}$ в зависимости от действительных значений коэффициента преобразования ТНУ φ_0 и эффективного КПД ГПД $\eta_{ЭД}$. Энергоэффективные режимы работы КТНУ соответствуют условию $K_{КТНУ} > 1$. Полученные в [11] высокие значения безразмерного критерия энергоэффективности для СЭ с КТНУ свидетельствуют о высокой энергетической эффективности таких комбинированных систем энергоснабжения.

Безразмерный критерий энергоэффективности пикового источника теплоты – электродкотла – в составе СЭ $K_{\text{ПИТ}}$, согласно [11], получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источник электрической энергии – электрический котел – потребитель теплоты от СЭ» с учетом влияния источников энергии для пикового электродкотла и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергией электродкотла. В исследовании [11] проведена оценка энергоэффективности пикового электродкотла в СЭ в случае использования электроэнергии от КТНУ и для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы на основе традиционных или альтернативных источников электрической энергии на основе парогазовых установок, газотурбинных установок, солнечных электростанций термодинамического цикла, ветроэнергетических электростанций.

Безразмерный критерий энергоэффективности пикового источника теплоты – водогрейного топливного котла – в составе СЭ $K_{\text{ПИТ}}$, согласно [11], получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источники электрической энергии и топлива – топливный котел – потребитель теплоты от СЭ» с учетом влияния источников энергии для пикового топливного котла и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергией котла (котельной). В этом случае потребление электрической энергии пиковым источником теплоты в СЭ – топливным котлом – непосредственно не связано с процессом генерирования теплоты в котле, а доля потребления электрической энергии на собственные нужды является незначительной, поэтому существенно не влияет на значение показателя $K_{\text{ПИТ}}$.

В исследовании [11] отмечено, что для случаев использования альтернативных пиковых источников теплоты в СЭ (например, солнечных коллекторов для СЭ небольшой мощности) значение безразмерного критерия энергетической эффективности пикового источника теплоты для СЭ $K_{\text{ПИТ}}$ будет равно КПД альтернативного пикового источника теплоты $\eta_{\text{АПИТ}}$ или КПД дополнительной системы с альтернативным пиковым источником теплоты $\eta_{\text{АПИТ}}^c$.

В исследовании [11] определено, что для случаев $K_{\text{КТНУ}} < K_{\text{ПИТ}}$ значение безразмерного критерия энергоэффективности СЭ $K_{\text{СЭ}}$ будет уменьшаться с увеличением доли нагрузки КТНУ β . Для других случаев значение безразмерного критерия энергоэффективности СЭ $K_{\text{СЭ}}$ будет возрастать с увеличением доли нагрузки КТНУ β . В работах [11 – 12] отмечено, что комплексный безразмерный критерий энергоэффективности СЭ $K_{\text{СЭ}}$ из формулы (1) может быть использован для выбора наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида СЭ и эффективных режимов работы СЭ.

Более детально методические основы по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ изложены в исследовании [11].

Предложенные в исследовании [12] СЭ с КТНУ и пиковыми электродкотлами будут энергоэффективными в системах теплоснабжения, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,4$. При этом условии современные высокоэффективные электрические и топливные котлы будут уступать по энергоэффективности указанным СЭ. В [12] определено, что энергоэффективность СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами почти в два раза превышает энергоэффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов для работы в системах теплоснабжения.

В работе [13] определено, что предложенные в исследовании СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,4$. В случае выполнения этого условия, современные высокоэффективные электрические и топливные котлы будут уступать по энергоэффективности указанным СЭ. При этих условиях указанные СЭ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, поскольку их эффективность более, чем в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективных электрических и топливных котлов. Определено, что

предложенные в исследовании [13] СЭ с КТНУ и пиковыми электродкотлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,7$. При этих условиях указанные СЭ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, поскольку даже при минимальной эффективности ГПД и котла энергоэффективность системы энергоснабжения почти в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективных электрических и топливных котлов.

В работах [1 – 13] авторами не определены области энергоэффективной работы систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ в системах теплоснабжения при условиях оптимальных режимов работы КТНУ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Целью исследования является определение областей энергоэффективной работы систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ в системах теплоснабжения при условиях оптимальных режимов работы КТНУ, определение энергоэффективных режимов работы СЭ с КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Основная часть

В исследовании проведена оценка энергоэффективных режимов работы систем энергоснабжения с комбинированными когенерационно-теплонасосными установками и пиковыми источниками теплоты при работе в системах теплоснабжения. Исследована энергоэффективность систем энергоснабжения с парокompрессионными ТНУ малой (до 1 МВт) и большой мощностей с когенерационным приводом от газопоршневого двигателя-генератора. Пиковыми источниками теплоты в СЭ были предусмотрены электрические и топливные котлы (топливные котельные для СЭ больших мощностей). Исследуемые СЭ с комбинированными КТНУ и ПИТ могут полностью или частично обеспечивать собственные нужды в электрической энергии и обеспечивать потребности отопления и горячего водоснабжения потребителей. Схемы систем энергоснабжения с комбинированными КТНУ и ПИТ приведены в работах [1, 17]. Методические основы по оцениванию энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения изложены в исследовании [11].

В нашем исследовании проанализирована энергетическая эффективность системы «Источник приводной энергии КТНУ – СЭ с КТНУ и ПИТ – потребитель теплоты от СЭ» на примере СЭ с парокompрессионными КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения. Преимуществом этого подхода является учет потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии в КТНУ и ПИТ с целью определения энергоэффективных режимов работы СЭ для теплоснабжения.

В исследовании [11] определено, что для СЭ с КТНУ и ПИТ для значений доли нагрузки КТНУ $\beta < 0,7$ энергоэффективность и конкурентоспособность СЭ в значительной степени определяют вид и эффективность ПИТ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ. Это условие соответствует оптимальным значениям доли нагрузки КТНУ в диапазоне $\beta = 0,16 \dots 0,63$ для работы систем теплоснабжения, поэтому вид и эффективность ПИТ при условии энергоэффективных режимов работы КТНУ в СЭ в значительной степени будут определять энергоэффективность СЭ для систем теплоснабжения.

В исследовании [11] определены значения безразмерного показателя энергоэффективности ПИТ для СЭ, которые составляют [11]: $K_{ПИТ}^{ЭС} = 0,302 \dots 0,318$ для электродкотла при условии использования электроэнергии из энергосистемы, $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,223 \dots 0,319$ для электродкотла для СЭ малых мощностей при условии использования электроэнергии от КТНУ,

$K_{ПИТ}^{ТК} = 0,8...0,9$ для пикового топливного котла в составе СЭ. На основе анализа этих показателей можно сделать вывод, что использование топливного котла как пикового источника теплоты в СЭ для систем теплоснабжения является более эффективным, чем использование пикового электрокотла с разными вариантами источников электроэнергии.

При условиях $K_{КТНУ} > 1$ и $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$ (или $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$) [11] из предложенных в исследованиях [11 – 12] зависимостей могут быть определены области энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ. В случае выполнения вышеуказанных условий исследуемые СЭ с КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

Для режимов энергоэффективной работы КТНУ в СЭ и при условиях $K_{КТНУ} > 1$ и $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$ (или $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$) [11] в нашем исследовании определены области энергоэффективной работы и энергоэффективные режимы работы СЭ с КТНУ и пиковыми электрическими и топливными котлами в системах теплоснабжения для разных уровней мощности и энергоэффективности элементов СЭ. Области энергоэффективной работы СЭ с комбинированными КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения в нашем исследовании определены при условиях оптимальных режимов работы КТНУ на основе исследований [10 – 13].

Предложенный подход по определению областей энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения имеет ряд преимуществ:

- учитывает переменные режимы работы СЭ для теплоснабжения на протяжении года с изменением распределения нагрузки между парокompрессионными КТНУ и пиковым источником теплоты в СЭ;

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы СЭ, пиковых источников теплоты СЭ, источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;

- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии в КТНУ и СЭ;

- учитывает влияние пиковых источников теплоты для СЭ и вида потребляемой ими энергии с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении энергии к пиковым источникам теплоты;

- в результате комплексного подхода к оцениванию энергоэффективности СЭ можно осуществить выбор наиболее эффективного ПИТ для определенного вида СЭ при работе в системах теплоснабжения;

- предложенные в [11] методические основы и приведенные в настоящей статье результаты исследований могут быть использованы для определения областей энергоэффективной работы СЭ на основе парокompрессионных КТНУ с различными хладагентами, источниками низкотемпературной теплоты и схемными решениями в системах теплоснабжения;

- позволяет определить области и режимы энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ для теплоснабжения, при которых энергоэффективность исследуемых СЭ почти в два раза превышает энергоэффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов;

- позволяет комплексно оценивать энергоэффективность значительного количества вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения;

- позволяет разработать рекомендации по энергоэффективной эксплуатации СЭ с КТНУ и ПИТ с разными схемными решениями для систем теплоснабжения.

Применение предложенных подходов по определению областей энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения продемонстрируем на конкретных приме-

рах.

На рис. 1 – 8 показаны результаты исследований по определению областей энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ в системах теплоснабжения для случаев переменной нагрузки КТНУ в составе СЭ и оптимальных значений доли нагрузки КТНУ β , для режимов энергоэффективной работы КТНУ на основе результатов исследований [10 – 13]. Исследованы значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ с КТНУ и ПИТ для случаев сезонной переменной нагрузки КТНУ в составе СЭ для оптимальных значений доли нагрузки КТНУ в диапазоне $\beta = 0,16...0,63$ [14 – 16], что соответствует температурным режимам работы системы теплоснабжения. Исследование проведено для режимов энергоэффективной работы КТНУ с $K_{КТНУ} = 1,1...2,1$ (при условиях максимальной эффективности ГПД) и с $K_{КТНУ} = 1,1...1,6$ (при условиях минимальной эффективности ГПД) на основе результатов исследований [10 – 11]. Указанные значения критериев энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ}$ соответствуют значениям действительного коэффициента преобразования КТНУ в пределах $\varphi_{\partial} = 3,0...5,4$ для КТНУ малых мощностей и $\varphi_{\partial} = 2,7...5,4$ для КТНУ больших мощностей, согласно [11].

На рис. 1 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности и ПИТ для теплоснабжения при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [5], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине $\eta_{ЭС} = 0,383$ и значение КПД распределительных электрических сетей в Украине $\eta_{ЛЭП} = 0,875$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена электрическая котельная с $\eta_{ЭК} = 0,95$. Следует отметить, что в случае изменения КПД электрической котельной в диапазоне $\eta_{ЭК} = 0,9...0,95$ значения безразмерного критерия энергоэффективности электродвигателя для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы составляют $K_{ПИТ}^{ЭС} = 0,302...0,318$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,87...1,441$ при условии $\beta = 0,47...0,63$ и могут составлять $K_{СЭ} = 2,1$ [11] при условии $\beta = 1$.

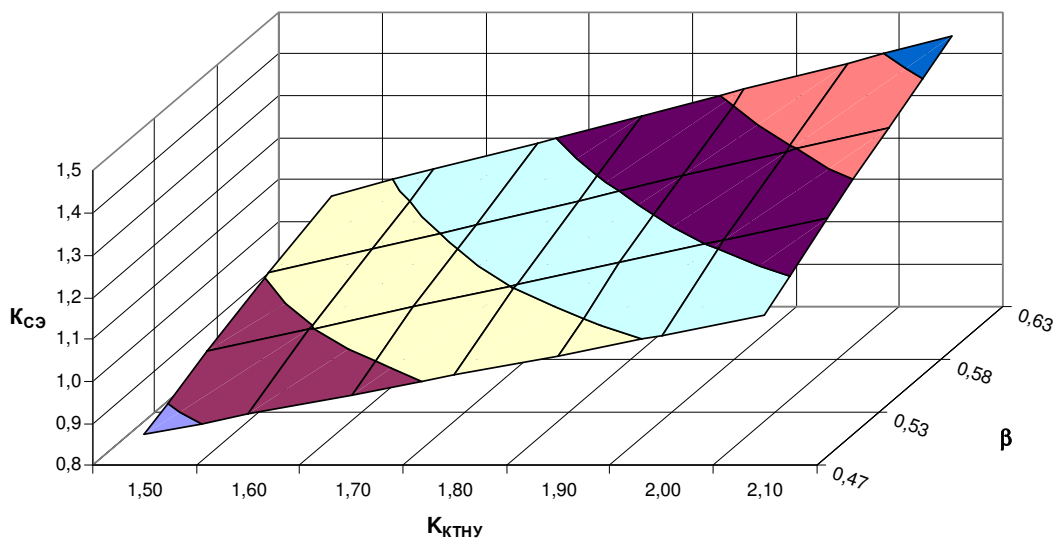


Рис. 1. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условии потребления электроэнергии пиковым электрическим котлом из энергосистемы Украины

Как видно из рис. 1, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,87 \dots 1,06$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,5$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,5$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,92 \dots 1,441$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечивают при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,5 \dots 2,1$.

При условиях $K_{КТНУ} > 1$ и $K_{СЭ} > 1$ предложенные в этом исследовании зависимости определяют области высокоэффективной работы исследуемых СЭ для теплоснабжения. На рис. 2 показана область высокоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности при условии потребления электроэнергии пиковым электрическим котлом из энергосистемы Украины при работе в системах теплоснабжения.

Как видно из рис. 2, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 1,02 \dots 1,25$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,8$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,8$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 1,06 \dots 1,44$. Высокоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,8 \dots 2,1$. Исследуемые СЭ с КТНУ и ПИТ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, которые могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения, поскольку их энергоэффективность почти в два раза превышает энергоэффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов.

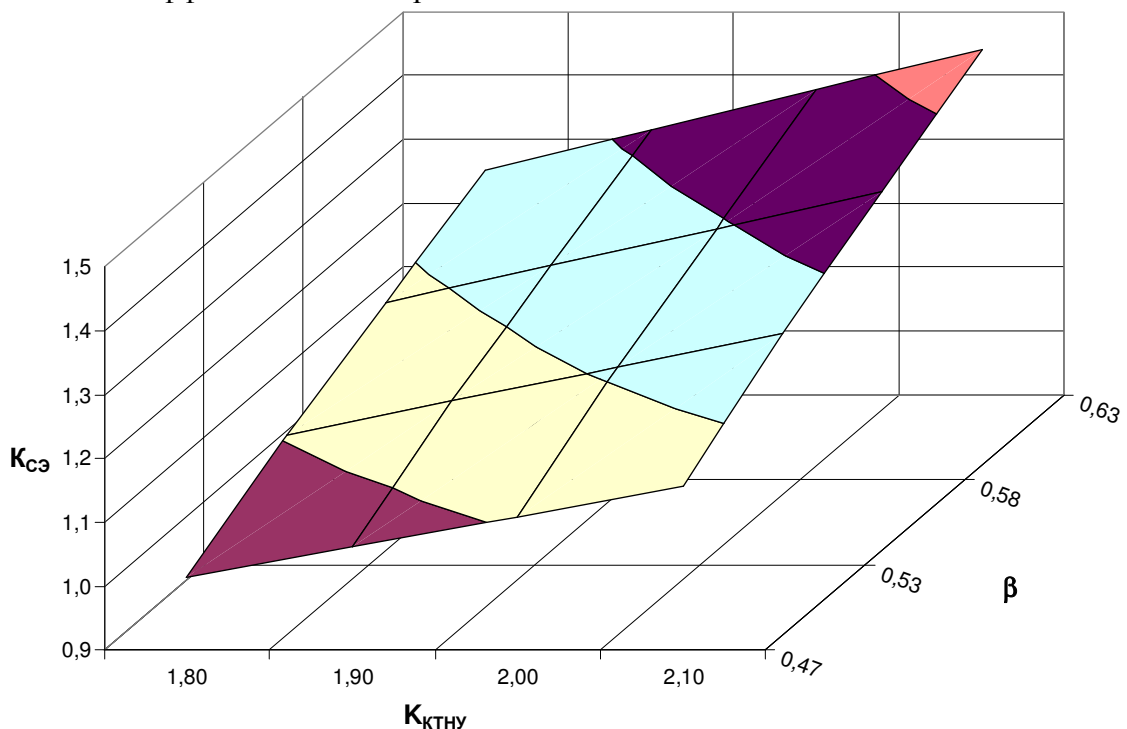


Рис. 2. Область высокоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условии потребления электроэнергии пиковым электрическим котлом из энергосистемы Украины

На рис. 3 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и ПИТ с потреблением электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от КТНУ. В этом ис-

следовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД $\eta_{ЭД} = 0,31$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем $\eta_{ЭП} = 0,8$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена электрическая котельная с $\eta_{ЭК} = 0,9$. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности электрокотла для случаев потребления электрической энергии от КТНУ будет составлять $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,223$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,85...1,09$ при условии $\beta = 0,58...0,63$ и могут составлять $K_{СЭ} = 1,6$ [12 – 13] при условии $\beta = 1$.

Как видно из рис. 3, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,85...0,9$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,3$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,3$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,91...1,09$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,3...1,6$.

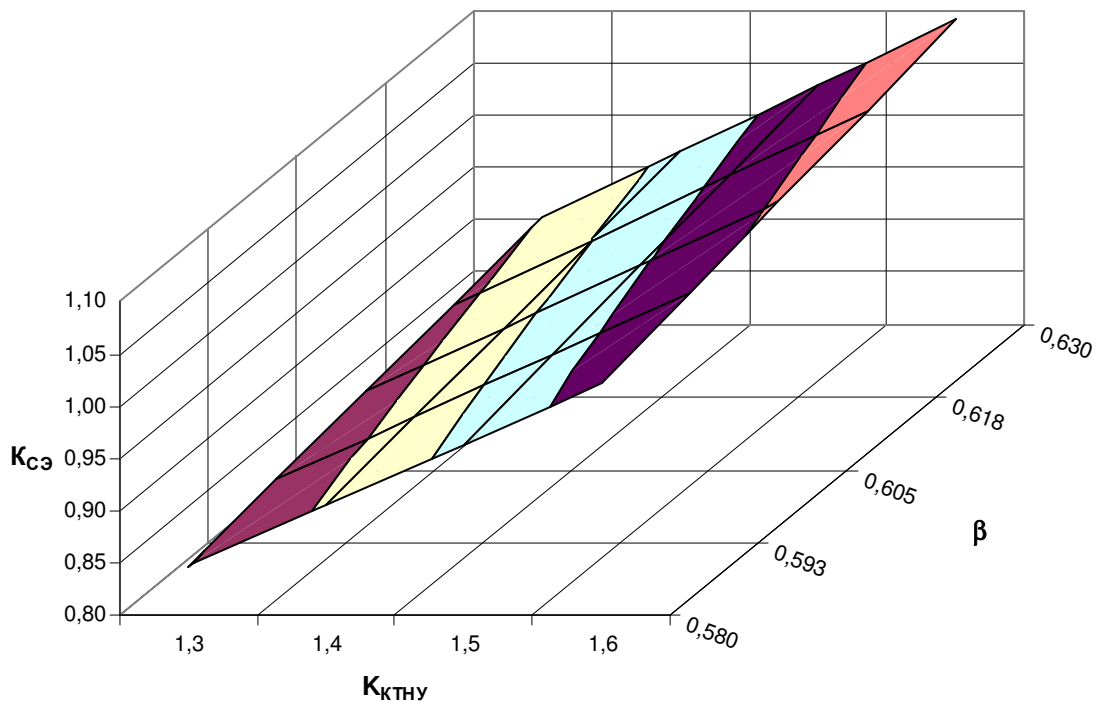


Рис. 3. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и пикового электрокотла с потреблением электроэнергии котлом от КТНУ

На рис. 4 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности и пиковым топливным котлом для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и ПИТ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД $\eta_{ЭД} = 0,31$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем $\eta_{ЭП} = 0,8$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,8$. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности топливного котла будет составлять $K_{ПИТ}^{ТК} = 0,8$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,91...1,304$ при условии $\beta = 0,37...0,63$ и

могут составлять $K_{СЭ} = 1,6$ [12 – 13] при условии $\beta = 1$.

Как видно из рис. 4, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,91 \dots 0,99$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,1$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,1$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,95 \dots 1,304$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$.

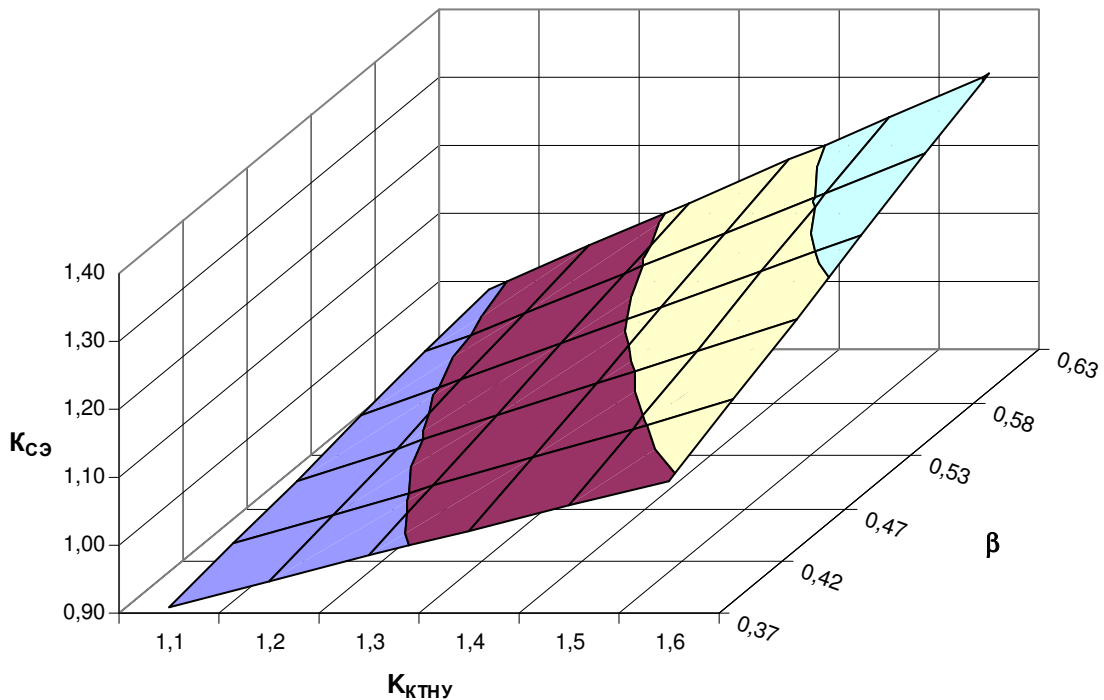


Рис. 4. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и пикового топливного котла

На рис. 5 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и ПИТ с потреблением электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от КТНУ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД $\eta_{ЭД} = 0,42$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем $\eta_{ЭД} = 0,8$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена электрическая котельная с $\eta_{ЭК} = 0,95$. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности электрокотла для случаев потребления электрической энергии от КТНУ будет составлять $K_{ПИТ}^{ЭК} = 0,319$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,83 \dots 1,44$ при условии $\beta = 0,47 \dots 0,63$ и могут составлять $K_{СЭ} = 2,1$ [11] при условии $\beta = 1$.

Как видно из рис. 5, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,83 \dots 1,0$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,4$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,4$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,87 \dots 1,44$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных

режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,4 \dots 2,1$.

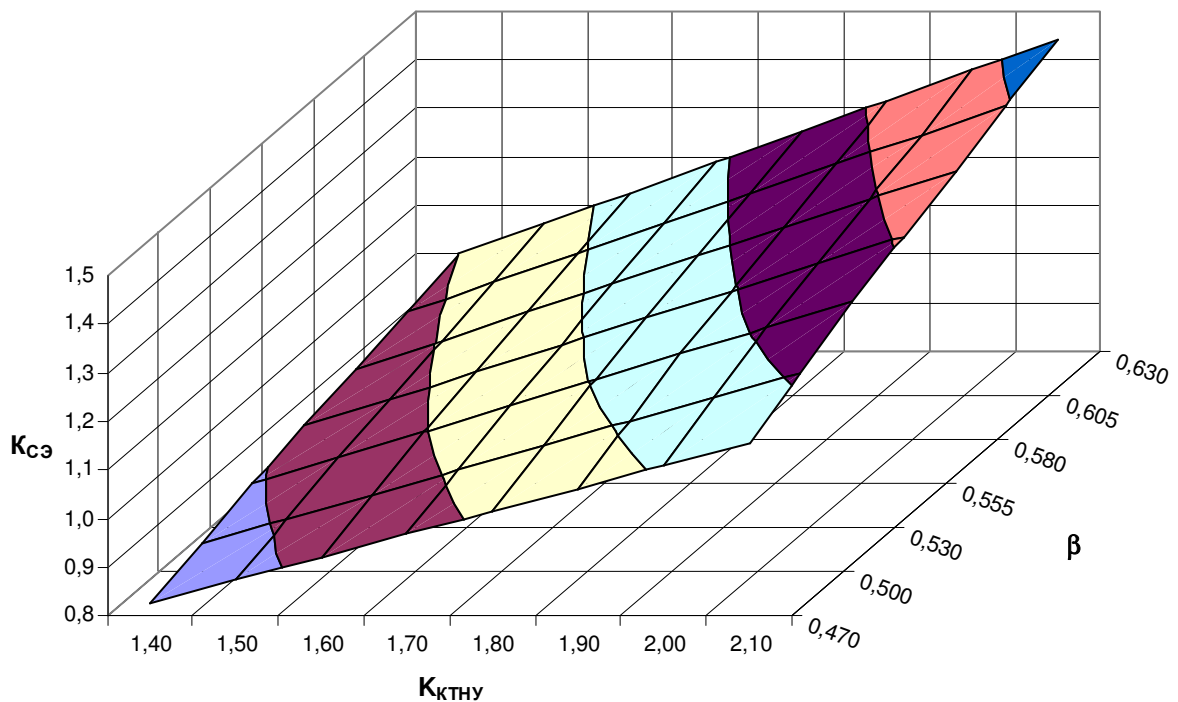


Рис. 5. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и ПИТ и потреблением электроэнергии электродвигателем от КТНУ

На рис. 6 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности и пиковым топливным котлом для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и ПИТ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД $\eta_{ГД} = 0,42$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем $\eta_{ЭД} = 0,8$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,9$. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности топливного котла будет составлять $K_{ПИТ}^{ТК} = 0,9$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,95 \dots 1,656$ при условии $\beta = 0,26 \dots 0,63$ и могут составлять $K_{СЭ} = 2,1$ [11] при условии $\beta = 1$.

Как видно из рис. 6, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,95 \dots 1,03$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,1$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,1$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,98 \dots 1,656$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$.

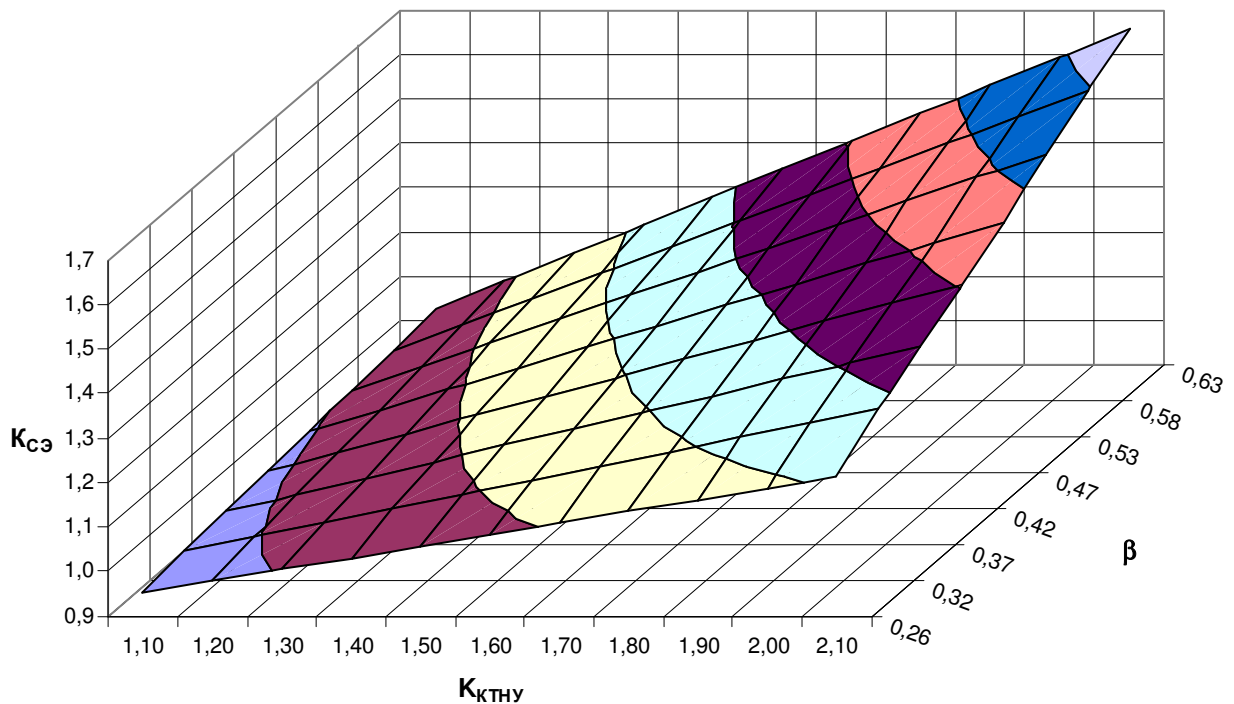


Рис. 6. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ малой мощности для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и пикового топливного котла

На рис. 7 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ большой мощности и пиковой топливной котельной для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и ПИТ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД $\eta_{ЭД} = 0,31$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем $\eta_{ЭП} = 0,9$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,8$. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности топливного котла будет составлять $K_{ПИТ}^{ТК} = \eta_{ТК} = 0,8$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,9 \dots 1,304$ при условии $\beta = 0,32 \dots 0,63$ и могут составлять $K_{СЭ} = 1,6$ [12 – 13] при условии $\beta = 1$.

Как видно из рис. 7, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,9 \dots 0,99$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,1$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,1$ значения безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,93 \dots 1,304$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$.

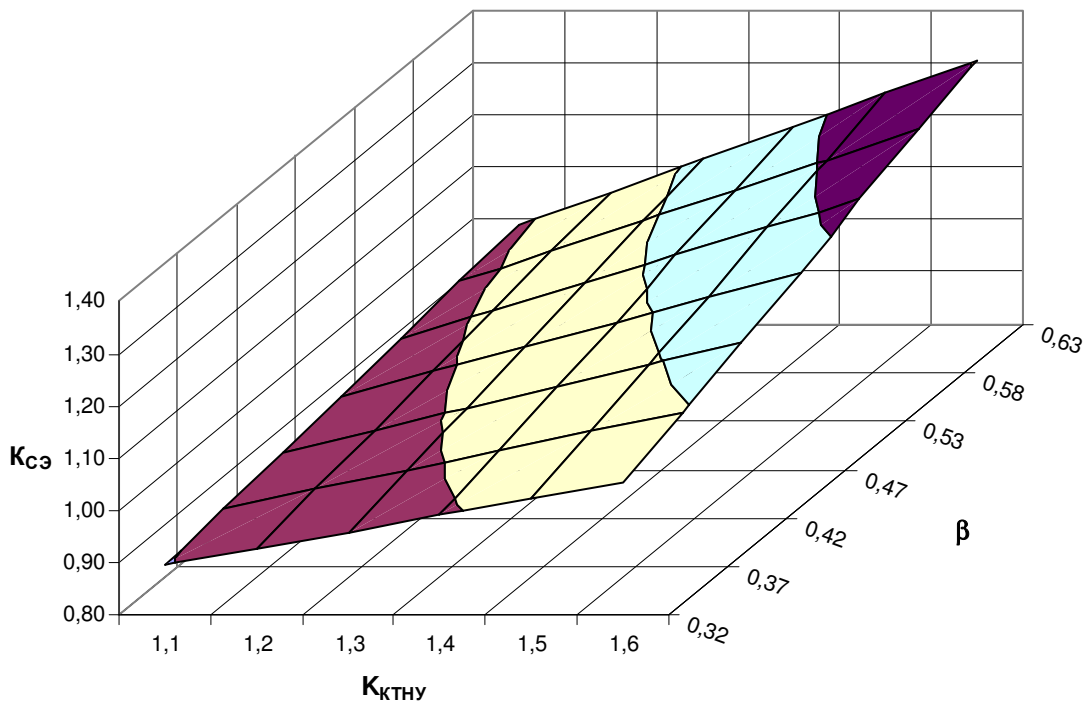


Рис. 7. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ большой мощности для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и пикового топливного котла

На рис. 8 показана область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ большой мощности и пиковым топливным котлом для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и ПИТ. В этом исследовании, согласно [5, 10], учтены: значение эффективного КПД ГПД $\eta_{ЭД} = 0,42$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем $\eta_{ЭП} = 0,9$. Пиковым источником теплоты в СЭ для этих условий предусмотрена топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,9$. Значение безразмерного критерия энергетической эффективности топливного котла будет составлять $K_{ПИТ}^{ТК} = 0,9$. Для исследованных режимов работы СЭ для систем теплоснабжения значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,93 \dots 1,656$ при условии $\beta = 0,16 \dots 0,63$ и могут составлять $K_{СЭ} = 2,1$ [11] при условии $\beta = 1$.

Как видно из рис. 8, значения комплексного безразмерного критерия энергоэффективности СЭ составляют $K_{СЭ} = 0,93 \dots 1,03$ при условии минимального значения критерия энергоэффективности КТНУ $K_{КТНУ} = 1,1$; для режимов работы СЭ с $K_{КТНУ} > 1,1$ значение безразмерного критерия энергоэффективности СЭ изменяются в пределах $K_{СЭ} = 0,95 \dots 1,656$. Энергоэффективные режимы работы этих СЭ обеспечиваются при условиях энергоэффективных режимов работы КТНУ со значениями показателя энергоэффективности $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$.

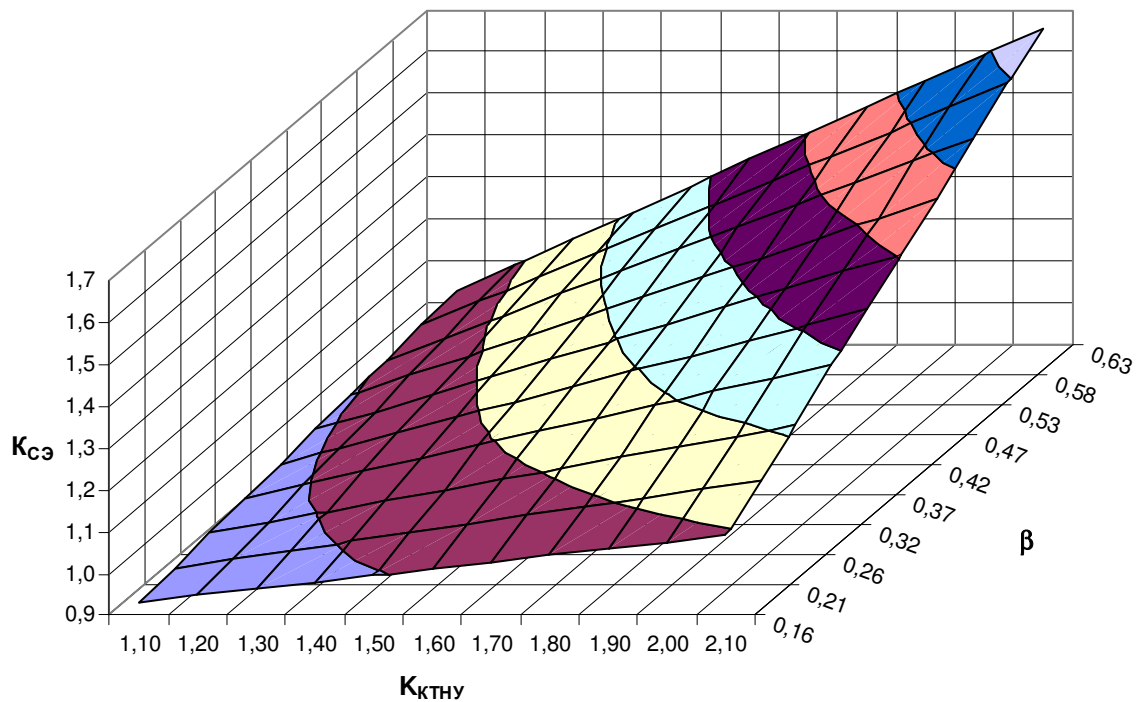


Рис. 8. Область энергоэффективной работы СЭ с КТНУ большой мощности для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и пикового топливного котла

Следует отметить, что зависимости, показанные на рис. 1 – 8, получены для режимов энергоэффективной работы КТНУ на основе результатов исследований [10 – 13].

Зависимости, показанные на рис. 4 и 7, определяют области энергоэффективной работы СЭ с КТНУ разных уровней мощности и пиковым топливным котлом (котельной) для теплоснабжения при условиях минимальной эффективности ГПД и топливного котла (котельные). При условиях $\beta = (0,32 \dots 0,37) \dots 0,63$ и $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$ указанные СЭ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, поскольку их эффективность почти в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективных электрических и топливных котлов.

Зависимости, показанные на рис. 6 и 8, определяют области энергоэффективной работы СЭ с КТНУ разных уровней мощности и пиковым топливным котлом (котельной) для теплоснабжения при условиях максимальной эффективности ГПД и топливного котла (котельной). При условиях $\beta = (0,16 \dots 0,26) \dots 0,63$ и $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$ указанные СЭ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, поскольку их эффективность более, чем в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективных электрических и топливных котлов. Исследованные СЭ могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

В работе [12] определено, что исследованные СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами будут высокоэффективными в системах теплоснабжения, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,4$, что соответствует результатам исследований, показанным на рис. 4, 6 – 8. В нашем исследовании определено, что при условии максимальной эффективности ГПД и топливного котла исследованные СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,16 \dots 0,26$ в зависимости от уровня мощности КТНУ. При условии минимальной эффективности ГПД и топливного котла исследованные СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,32 \dots 0,37$ в зависи-

мости от уровня мощности КТНУ.

Зависимости, показанные на рис. 1 – 3 и 5, определяют области энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и пиковым электрическим котлом в системах теплоснабжения с разными вариантами источников электрической энергии для пикового электрокотла и при условиях разной энергоэффективности ГПД и электрокотла. В работе [12] определено, что исследованные СЭ с КТНУ и пиковыми электрокотлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,7$. В нашем исследовании определено, что СЭ с КТНУ и пиковыми электрическими котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,47 \dots 0,58$ в зависимости от уровня мощности КТНУ. Однако такие режимы работы СЭ будут обеспечиваться при условии высокоэффективной работы КТНУ с показателями энергоэффективности $K_{КТНУ} > 1,3 \dots 1,5$ в зависимости от уровня мощности КТНУ. Эти условия соответствуют результатам исследований, показанным на рис. 1 – 3 и 5.

Предложенные подходы по определению областей энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ в системах теплоснабжения позволяют определить энергоэффективные области и режимы работы указанных СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Полученные в статье научные результаты по определению областей энергоэффективной работы СЭ позволяют разработать рекомендации по энергоэффективной эксплуатации СЭ с КТНУ и ПИТ с разными схемными решениями при работе в системах теплоснабжения. С целью оценки энергоэффективности разных вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты из исследований [1, 5 – 16].

Выводы

Разработаны методические основы и определены области энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ при условиях оптимальных режимов работы КТНУ для систем теплоснабжения; определены энергоэффективные режимы работы СЭ с КТНУ и ПИТ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для парокompрессионных ТНУ разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Предложенный подход по определению областей энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения имеет ряд преимуществ:

- учитывает переменные режимы работы СЭ для теплоснабжения на протяжении года с изменением распределения нагрузки между парокompрессионными КТНУ и пиковым источником теплоты в СЭ;

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы СЭ, пиковых источников теплоты СЭ, источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;

- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных КТНУ разных уровней мощности с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии в КТНУ и СЭ;

- учитывает влияние пиковых источников теплоты для СЭ и вида потребляемой ими энергии с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении энергии к пиковым источникам теплоты;

- в результате комплексного подхода к оцениванию энергоэффективности СЭ можно осуществить выбор наиболее эффективного ПИТ для определенного вида СЭ при работе в системах теплоснабжения;

— предложенные в [11] методические основы и приведенные в настоящей статье результаты исследований могут быть использованы для определения областей энергоэффективной работы СЭ на основе пароконденсационных КТНУ с различными хладагентами, источниками низкотемпературной теплоты и схемными решениями в системах теплоснабжения;

— позволяет определить области и режимы энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ для теплоснабжения, при которых энергоэффективность исследуемых СЭ почти в два раза превышает энергоэффективность современных высокоэффективных электрических и топливных котлов;

— позволяет комплексно оценивать энергоэффективность значительного количества вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения;

— позволяет разработать рекомендации по энергоэффективной эксплуатации СЭ с КТНУ и ПИТ с разными схемными решениями для систем теплоснабжения.

Для режимов энергоэффективной работы КТНУ в СЭ и при условиях $K_{КТНУ} > 1$ и $K_{СЭ} > \eta_{ТК}$ (или $K_{СЭ} > \eta_{ЭК}$) [11] в нашем исследовании определены области энергоэффективной работы и энергоэффективные режимы работы СЭ с КТНУ и пиковыми электрическими и топливными котлами в системах теплоснабжения для разных уровней мощности и энергоэффективности элементов СЭ.

Для СЭ с КТНУ разных уровней мощности и пиковыми топливными котлами определены области энергоэффективной работы в системах теплоснабжения, которые соответствуют энергоэффективным режимам работы СЭ и КТНУ с $\beta = (0,32...0,37)...0,63$ и $K_{КТНУ} = 1,1...1,6$ при условиях минимальной эффективности ГПД и топливного котла (котельной). При этих условиях энергоэффективность указанных СЭ почти в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективных электрических и топливных котлов.

При условиях максимальной эффективности ГПД и топливного котла (котельной) для СЭ с КТНУ разных уровней мощности и топливными котлами определены области энергоэффективной работы в системах теплоснабжения, которые соответствуют энергоэффективным режимам работы СЭ и КТНУ с $\beta = (0,16...0,26)...0,63$ и $K_{КТНУ} = 1,1...2,1$. Указанные СЭ могут быть рекомендованы как высокоэффективные системы энергоснабжения, поскольку их эффективность более, чем в два раза превышает энергоэффективность высокоэффективных электрических и топливных котлов. Исследованные СЭ могут составить конкуренцию современным высокоэффективным электрическим и топливным котлам в системах теплоснабжения и энергоснабжения.

Определено, что при условии минимальной эффективности ГПД и топливного котла исследованные СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,32...0,37$ в зависимости от уровня мощности КТНУ.

Определено, что при условии максимальной эффективности ГПД и топливного котла исследованные СЭ с КТНУ и пиковыми топливными котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,16...0,26$ в зависимости от уровня мощности КТНУ.

Определено, что СЭ с КТНУ и пиковыми электрическими котлами будут энергоэффективными, если доля нагрузки КТНУ в СЭ будет составлять $\beta > 0,47...0,58$ в зависимости от уровня мощности КТНУ. Однако такие режимы работы СЭ будут обеспечиваться при условии высокоэффективной работы КТНУ с показателями энергоэффективности $K_{КТНУ} > 1,3...1,5$ в зависимости от уровня мощности КТНУ.

Предложенные подходы по определению областей энергоэффективной работы СЭ с КТНУ и ПИТ в системах теплоснабжения позволяют определить энергоэффективные области и режимы работы указанных СЭ с учетом комплексного влияния переменных режимов работы, источников приводной энергии для пароконденсационных КТНУ разных уровней

мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Полученные в статье научные результаты по определению областей энергоэффективной работы СЭ позволяют разработать рекомендации по энергоэффективной эксплуатации СЭ с КТНУ и ПИТ с разными схемными решениями при работе в системах теплоснабжения. С целью оценки энергоэффективности разных вариантов СЭ с КТНУ и ПИТ для систем теплоснабжения, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты из исследований [1, 5 – 16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.
2. Баласанян Г. А. Ефективність перспективних інтегрованих систем енергозабезпечення на базі установок когенерації малої потужності (теоретичні основи, аналіз, оптимізація) : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Г. А. Баласанян. – Одеса, 2007. – 36 с.
3. Билека Б. Д. Экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями / Б. Д. Билека, Р. В. Сергиенко, В. Я. Кабков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – №7 (74). – С. 25 – 29.
4. Сафьянц С. М. Исследование схемы источника теплоэлектроснабжения с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов / С. М. Сафьянц, Н. В. Колесниченко, Т. Е. Веретенникова // *Промышленная теплотехника*. – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 79 – 85.
5. Енергетична ефективність парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2014. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/421/419>.
6. Енергетичні переваги застосування парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 1. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/437/435>.
7. Остапенко О. П. Методичні основи комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з електричним та когенераційним приводом / О. П. Остапенко // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2015. – Вип. 47. – Т. 2. – С. 157 – 162.
8. Ostapenko O. P. Scientific basis of evaluation energy efficiency of heat pump plants: monograph / O. P. Ostapenko. – Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 62 p.
9. Комплексна оцінка енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з когенераційним приводом [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/2/2>.
10. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/454/452>.
11. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок та пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. – № 1. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/462/460>.
12. Енергоефективність систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти в системах тепlopостачання [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. – № 2. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/472/470>.
13. Области энергоэффективной работы систем энергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/479/478>.
14. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти ефективності теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Бакум, А. В. Ющишина // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/371/369>.
15. Енергетична ефективність теплонасосних станцій з різними джерелами теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко, О. В. Бакум // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/381/379>.
16. Енергоекологічна ефективність теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, І. О. Валігура, А. Д. Коваленко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 2. – Режим доступу до журн.:

<http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/363/361>.

17. Остапенко О. П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 123 с.

Остапенко Ольга Павловна – к. т. н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: ostapenko1208@gmail.com.

Винницкий национальный технический университет.