

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СТАНЦИЙ С КОГЕНЕРАЦИОННЫМ ПРИВОДОМ

Предложен подход по комплексному оцениванию энергетической эффективности парокомпрессионных теплонасосных станций (ТНС) с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Ключевые слова: комплексная оценка, энергетическая эффективность, теплонасосная станция, безразмерный критерий энергетической эффективности, когенерационный привод.

Введение

В условиях высокой стоимости топливно-энергетических ресурсов, повышенного спроса на электрическую энергию в часы пикового потребления (особенно в отопительный период) при недостаточности существующих электрогенерирующих мощностей в Украине и периодической несогласованности графиков выработки и потребления электрической энергии с целью уменьшения нагрузки на энергосистему Украины чрезвычайно актуальной в современных условиях становится технология создания энергогенерирующих мощностей на основе комбинированных когенерационных и теплонасосных установок (ТНУ). Эта технология предусматривает применение комбинированных когенерационно-теплонасосных установок, что позволит снизить потребление природного или альтернативного газа на 30 – 45 % по сравнению с котельными установками эквивалентной мощности [1], а также получить более дешевую по себестоимости электроэнергию по сравнению с сетевой (на 30 – 40 %). Значительно больший эффект может быть достигнут при условии применения комбинированных когенерационно-теплонасосных установок на базе существующих муниципальных и промышленных котельных – создание теплонасосных станций с когенерационным приводом компрессоров тепловых насосов. Когенерационный привод компрессоров тепловых насосов может быть обеспечен на основе газовых двигателей-генераторов, которые выпускают украинские предприятия: «Первомайскдизельмаш» и ГП «Завод им. В. А. Малышева».

Учитывая актуальность поставленной задачи, за последние годы проведен ряд исследований эффективности применения теплонасосных установок в тепловых схемах источников энергоснабжения [1 – 12]. В работе [1] авторами выполнены исследования по повышению энергоэффективности источников теплоснабжения путем использования ТНУ с электрическим и когенерационным приводами с учетом влияния схемных решений и режимов работы. В работе [2] выполнен сравнительный анализ перспективных направлений по повышению эффективности систем энергоснабжения на базе установок когенерации малой мощности, предложены тепловые схемы интегрированных систем комплексного энергоснабжения. Исследования интегрированных систем комплексного энергоснабжения [2], которые были реализованы на основе гелиоколлекторов, геотермальных источников теплоты, тепловых насосов компрессорного и абсорбционного типов, позволили на основе численного анализа определить оптимальные условия их работы. В исследовании [3] авторами оценена экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями. Однако в исследовании [3] предложен упрощенный подход к оцениванию энергетической эффективности ТНУ (только по коэффици-

енту преобразования), который не учитывает всех потерь энергии, связанных с выработкой теплоты в ТНУ. В работе [4] автором проведен сравнительный анализ технико-экономической эффективности воздушных тепловых насосов с приводом от газопоршневых когенерационных установок и газовых водогрейных котлов в системах горячего водоснабжения. В публикации [5] приведены результаты исследования схемы источника теплоэлектроснабжения (мини-ТЭЦ) с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов. В исследовании [5] проанализированы три варианта тепловых схем: схема с когенерационной и теплонасосной установками с отпуском электроэнергии в сеть, схема с когенерационной и теплонасосной установками и баком-аккумулятором с отпуском электроэнергии в сеть, схема с когенерационной и теплонасосной установками без отпуски электроэнергии в сеть. Как источник теплоты для ТНУ в этом исследовании предусмотрено использовать неочищенные канализационные стоки. Авторами в исследовании [5] предложен упрощенный подход к оцениванию энергетической эффективности ТНУ, который не учитывает всех потерь энергии, связанных с выработкой теплоты в ТНУ. Тепловые схемы, предложенные в исследовании [5], могут быть использованы лишь для обеспечения нужд горячего водоснабжения, а мощность отопления эти схемы могут обеспечивать лишь частично.

В работе [6] определены эффективные действительные режимы работы ТНУ с электрическим и когенерационным приводами с учетом влияния источников приводной энергии парокompрессионных тепловых насосов и потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ. Энергетические преимущества применения парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами проанализированы в исследовании [7].

В публикациях [8, 9] определены энергетические и экономические предпосылки к эффективной интеграции ТНС в системы теплоснабжения промышленных предприятий и предприятий муниципальной энергетики в Украине. В работе [10] оценена энергетическая, экологическая и экономическая эффективность ТНС с разными видами привода компрессора на природных и промышленных источниках низкотемпературной теплоты с учетом переменных режимов работы систем теплоснабжения в широком диапазоне изменения мощности ТНУ. Результаты исследований энергетической эффективности ТНС с разными источниками теплоты для условий переменных режимов работы приведены в работе [11]. В работе [12] оценена энергоэкологическая эффективность ТНС с разными видами привода компрессора на природных и промышленных источниках низкотемпературной теплоты для условий переменных режимов работы систем теплоснабжения.

В работах [1 – 12] авторами не проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Целью исследования является разработка методических основ и проведение комплексной оценки энергетической эффективности парокompрессионных теплонасосных станций с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Основная часть

В исследовании проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с ТНУ малой (до 1 МВт) и большой мощностей с когенерационным приводом от газопоршневого двигателя-генератора (ГПД). Когенерационный привод тепловых насосов имеет преимущества по сравнению с электрическим, поскольку позволяет избежать

дополнительных потерь электроэнергии при транспортировке и предусматривает утилизацию теплоты уходящих газов после газового двигателя, что обеспечивает лучшую энергетическую эффективность. ТНС с когенерационным приводом может полностью или частично обеспечивать собственные нужды в электрической энергии. Схемы указанных ТНС приведены в работе [1].

Энергетическую эффективность ТНС в значительной степени определяют оптимальным распределением нагрузки между теплонасосной установкой и пиковым источником теплоты (например, водогрейным топливным котлом, электродкотлом, солнечными коллекторами и т. п.) в составе ТНС. Это распределение характеризуется долей нагрузки ТНУ в составе ТНС β , которую определяют как отношение тепловой мощности ТНУ к мощности ТНС $\beta = Q_{ТНУ}/Q_{ТНС}$. Для ТНС с когенерационным приводом значение тепловой мощности ТНУ определяют с учетом мощности утилизационного оборудования когенерационного привода $Q_{ТНУ} = Q_k + \Sigma Q_{ум}$, где Q_k – мощность конденсатора ТНУ, $\Sigma Q_{ум}$ – мощность утилизационного оборудования когенерационного привода ТНУ.

На основе анализа результатов проведенных исследований [10 – 12] определены оптимальные значения показателя β для ТНС с когенерационным приводом на разных источниках теплоты при переменных режимах работы тепловой сети. Каждому из этих режимов соответствует определенное значение тепловых мощностей ТНС, ТНУ и доли нагрузки ТНУ β . Результаты исследований энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом при условии переменных режимов работы для разных источников низкотемпературной теплоты приведены в работе [11].

В нашем исследовании проанализирована энергетическая эффективность системы «Источник приводной энергии ТНС – ТНС – потребитель теплоты от ТНС» на примере пароконденсационных тепловых насосов с когенерационным приводом. Преимуществом такого подхода является учитывание потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ и пиковому источнику теплоты с целью определения эффективных режимов работы ТНС с когенерационным приводом.

Предлагаем проводить комплексную оценку энергетической эффективности пароконденсационных ТНС с когенерационным приводом по комплексному безразмерному критерию энергетической эффективности ТНС:

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

где $K_{ПИТ}$ – безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты в составе ТНС (водогрейного топливного котла, электродкотла, солнечных коллекторов и т. п.), $K_{ТНУ}$ – безразмерный критерий энергетической эффективности пароконденсационной ТНУ с когенерационным приводом в составе ТНС.

Безразмерный критерий энергетической эффективности пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом $K_{ТНУ}$ предложен в исследовании [6]. 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.

Для пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид [6]:

$$K_{ТНУ} = Q_{ТНУ} / Q_m = \eta_{эл} \cdot \varphi \cdot \eta_{м}, \quad (2)$$

где Q_m – мощность, затраченная газопоршневым двигателем-генератором для выработки электрической энергии для привода ТНУ, $\eta_{эл}$ – общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии из [6], φ – коэффициент преобразования парокон-

прессионных ТНУ, η_{mn} – КПД теплового потока, который учитывает потери энергии и рабочего агента в трубопроводах и оборудовании ТНУ.

Для ТНУ с когенерационным приводом общий КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии согласно [6] может быть определен:

$$\eta_{эл} = \eta_{эд} \cdot \eta_{эл}, \quad (3)$$

где $\eta_{эд}$ – эффективный КПД газопоршневого двигателя; $\eta_{эл}$ – КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем из [6].

Для пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид [6]:

$$K_{ТНУ} = Q_{ТНУ} / Q_m = \eta_{эл} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn} = \eta_{эд} \cdot \eta_{эл} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn}. \quad (4)$$

При условии $K_{ТНУ} = 1$ теплонасосная установка передает к потребителю такую же тепловую мощность, которая была затрачена для выработки электроэнергии для привода ТНУ. Чем больше значение этого показателя, тем более эффективным и конкурентоспособным будет тепловой насос.

В исследовании [6] предложен метод определения областей эффективного использования пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом по безразмерному показателю энергетической эффективности ТНУ $K_{ТНУ}$ с учетом влияния источников приводной энергии пароконденсационных ТНУ и учитыванием потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНУ.

Безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты – электрокотла – в составе ТНС $K_{ПИТ}$ может быть получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источник электрической энергии – электрический котел – потребитель теплоты от ТНС» с учетом влияния источников энергии для пикового источника теплоты (электрокотла) и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергии к электрокотлу.

В общем случае для электрокотла как пикового источника теплоты для ТНС безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид:

$$K_{ПИТ} = Q_{ЭК} / Q_m = \eta_{эл}^k \cdot \eta_{ЭК}, \quad (5)$$

где $Q_{ЭК}$ – тепловая мощность водогрейного электрокотла, которая может быть определена как: $Q_{ЭК} = Q_{ТНС} - Q_{ТНУ}$; Q_m – мощность, затраченная электростанцией для выработки электрической энергии, $\eta_{эл}^k$ – общий КПД генерирования и снабжения электрической энергии к электрокотлу, который определяют по формуле: $\eta_{эл}^k = \eta_{эс} \cdot \eta_{лэл}$, где $\eta_{эс}$ – усредненное значение КПД электростанций в Украине или альтернативных источников электрической энергии для ТНУ (на базе парогазовых установок (ПГУ), газотурбинных установок (ГТУ), солнечных электростанций термодинамического цикла (СЭС), ветроэнергетических электростанций (ВЭС)), из исследования [6]; $\eta_{лэл}$ – КПД распределительных электрических сетей в Украине из [6], $\eta_{ЭК}$ – КПД электрического котла.

Для случаев применения пароконденсационных ТНС с когенерационным приводом и пиковым электрокотлом общий КПД генерирования и снабжения электрической энергии к электрокотлу можно определять как $\eta_{эл}^k = \eta_{эд} \cdot \eta_{эл}$ в случае использования электроэнергии от когенерационного привода ТНУ или по указанной выше формуле для случаев потребления электрической энергии из энергосистемы на основе традиционных или альтернативных источников электрической энергии.

Тогда безразмерный критерий энергетической эффективности электрокотла как пикового источника теплоты для ТНС для случаев потребления электрической энергии из энергосис-

темы определяем:

$$K_{\text{ПИТ}}^{\text{ЭС}} = \eta_{\text{ЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \eta_{\text{ЭК}} \quad (6)$$

В случае использования в электрическом котле электроэнергии от когенерационного привода ТНУ безразмерный критерий энергетической эффективности электродвигателя как пикового источника теплоты для ТНС определяем:

$$K_{\text{ПИТ}}^{\text{ЭК}} = \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{ЭП}} \cdot \eta_{\text{ЭК}} = \eta_{\text{ЭЛ}} \cdot \eta_{\text{ЭК}} \quad (7)$$

Безразмерный критерий энергетической эффективности пикового источника теплоты – водогрейного топливного котла – в составе ТНС $K_{\text{ПИТ}}$ может быть получен на основе уравнения энергетического баланса для систем «Источник электрической энергии и топлива – топливный котел – потребитель теплоты от ТНС» с учетом влияния источников энергии для пикового источника теплоты (топливного котла) и с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении электрической энергии к котлу (котельной). В этом случае потребление электрической энергии пиковым источником теплоты ТНС – 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 $K_{\text{ПИТ}}$.

Для топливного котла как пикового источника теплоты для ТНС безразмерный критерий энергетической эффективности будет иметь вид:

$$K_{\text{ПИТ}}^{\text{ТК}} = Q_{\text{ТК}} / Q_{\text{мон}} = \eta_{\text{ТК}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{ТК}}$ – тепловая мощность водогрейного топливного котла, которая может быть определена как: $Q_{\text{ТК}} = Q_{\text{ТНС}} - Q_{\text{ТНУ}}$; $Q_{\text{мон}}$ – мощность, затраченная для выработки тепловой энергии от сжигания топлива в котле, $\eta_{\text{ТК}}$ – КПД водогрейного топливного котла или топливной котельной (для ТНС больших мощностей).

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

Следует отметить, что комплексный безразмерный критерий энергетической эффективности ТНС $K_{\text{ТНС}}$ может быть использован также и для выбора наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида парокompрессионных ТНС.

Предложенный комплексный подход по оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом имеет ряд преимуществ:

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

- учитывает режимы работы парокompрессионных ТНУ;

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

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

— учитывает энергетическую эффективность парокомпрессионных ТНС разных уровней мощностей с когенерационным приводом;

— учитывает влияние пиковых источников теплоты парокомпрессионных ТНС и вида потребляемой ими энергии с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении энергии к пиковым источникам теплоты;

— в результате комплексного подхода к оцениванию энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом можно осуществить выбор наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида парокомпрессионных ТНС;

— предложенные методические основы могут быть использованы для оценивания энергетической эффективности парокомпрессионных ТНС с разными хладагентами и схемными решениями ТНУ;

— позволяет комплексно оценивать энергетическую эффективность значительного количества вариантов парокомпрессионных ТНС с когенерационным приводом.

Применение предложенных методических основ по комплексному оцениванию энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом продемонстрируем на конкретных примерах.

На рис. 1 – 4 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом. Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС со значениями доли нагрузки ТНУ в диапазоне $\beta = 0,1 \dots 1,0$. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности парокомпрессионных ТНУ с когенерационным приводом $K_{ТНУ}$, согласно исследованию [6], определены для значений действительного коэффициента преобразования ТНУ в диапазоне $\varphi_{\partial} = 0,83 \dots 6,23$. Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрены электрическая котельная с $\eta_{ЭК} = 0,95$ (рис. 1 – 3) и водогрейная топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,85$ (рис. 4). По формуле (3), согласно [6], для ТНУ малых уровней мощности с когенерационным приводом значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ составляет $\eta_{эл} = 0,28$.

На рис. 1 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [6], учтены усредненное значение КПД электростанций в Украине $\eta_{ЭС} = 0,383$ и значение КПД распределительных электрических сетей в Украине $\eta_{ЛЭП} = 0,875$.

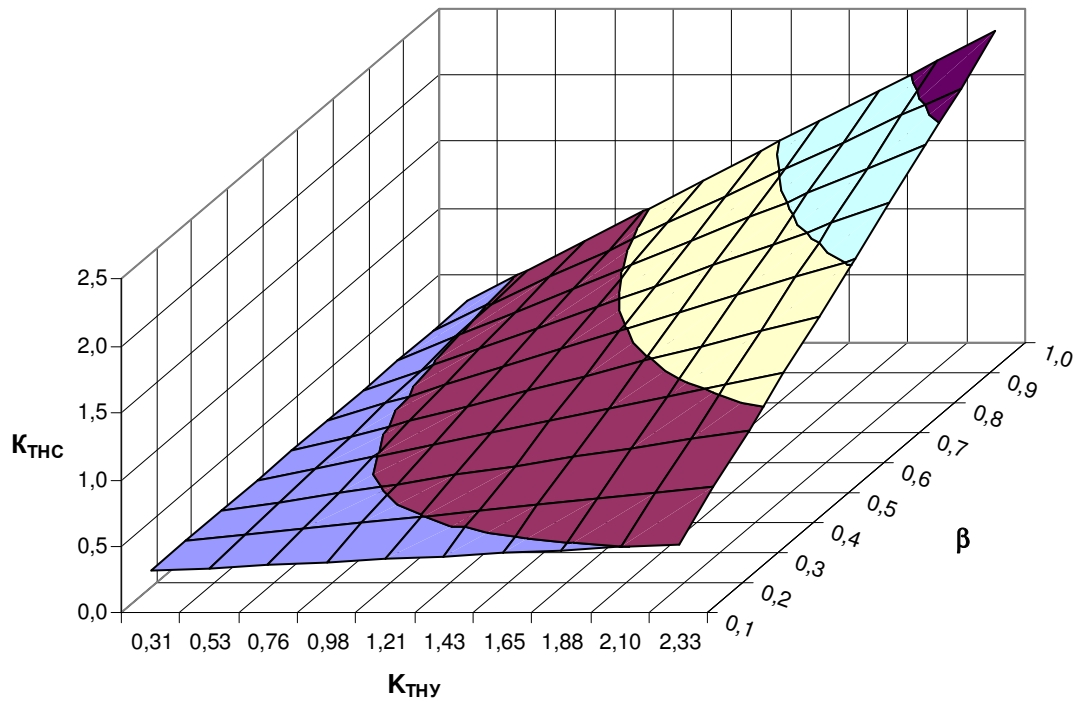


Рис. 1. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) из энергосистемы Украины

На рис. 2 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от ПГУ. Согласно [6], в этом исследовании учтены: значение КПД ПГУ $\eta_{ЭС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$ и значение КПД распределительных электрических сетей в Украине $\eta_{ЛЭП} = 0,875$.

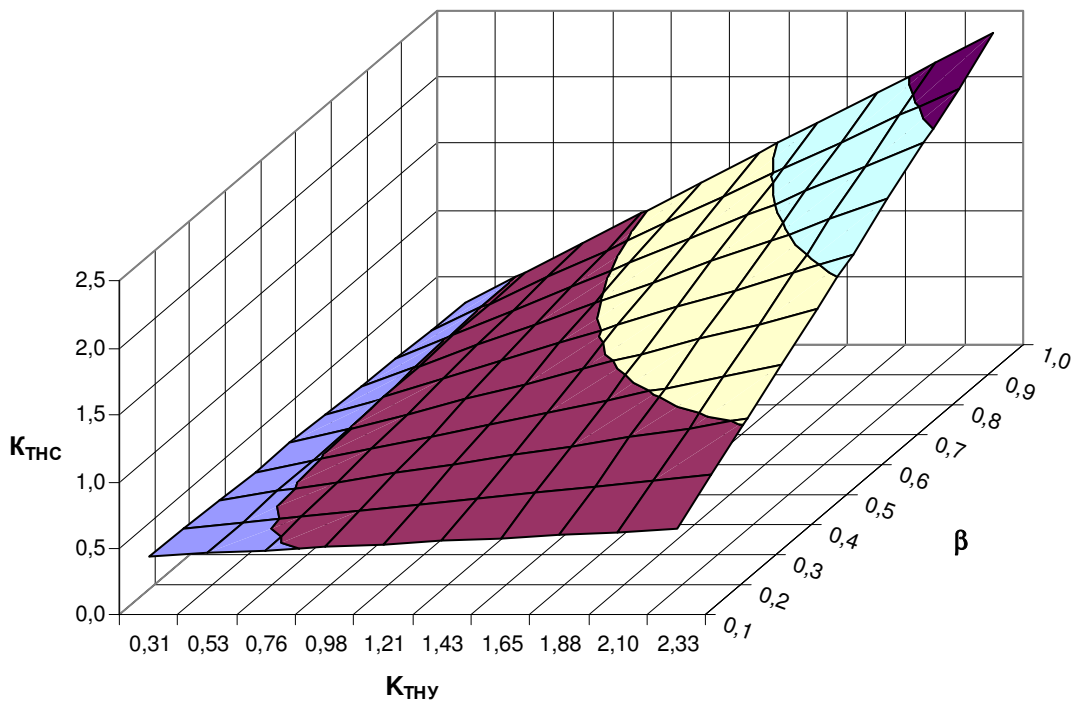


Рис. 2. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от ПГУ

На рис. 3 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от когенерационного привода ТНУ. В этом исследовании, согласно [6], учтены: значение эффективного КПД ГПД малой мощности $\eta_{эд} = 0,35$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем, согласно [6], $\eta_{эл} = 0,8$.

На рис. 4 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии использования водогрейного топливного котла как пикового источника теплоты ТНС.

На рис. 5 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС большой мощности с когенерационным приводом. Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС со значениями доли нагрузки ТНУ в диапазоне $\beta = 0,1 \dots 1,0$. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности пароконденсационных ТНУ с когенерационным приводом $K_{ТНУ}$, согласно исследованию [6], определены для значений действительного коэффициента преобразования ТНУ в диапазоне $\varphi_{\delta} = 0,93 \dots 7,01$.

Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрена водогрейная топливная котельная с $\eta_{тк} = 0,85$. По формуле (3), согласно [6], для ТНУ больших уровней мощности с когенерационным приводом значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ составляет $\eta_{эл} = 0,378$.

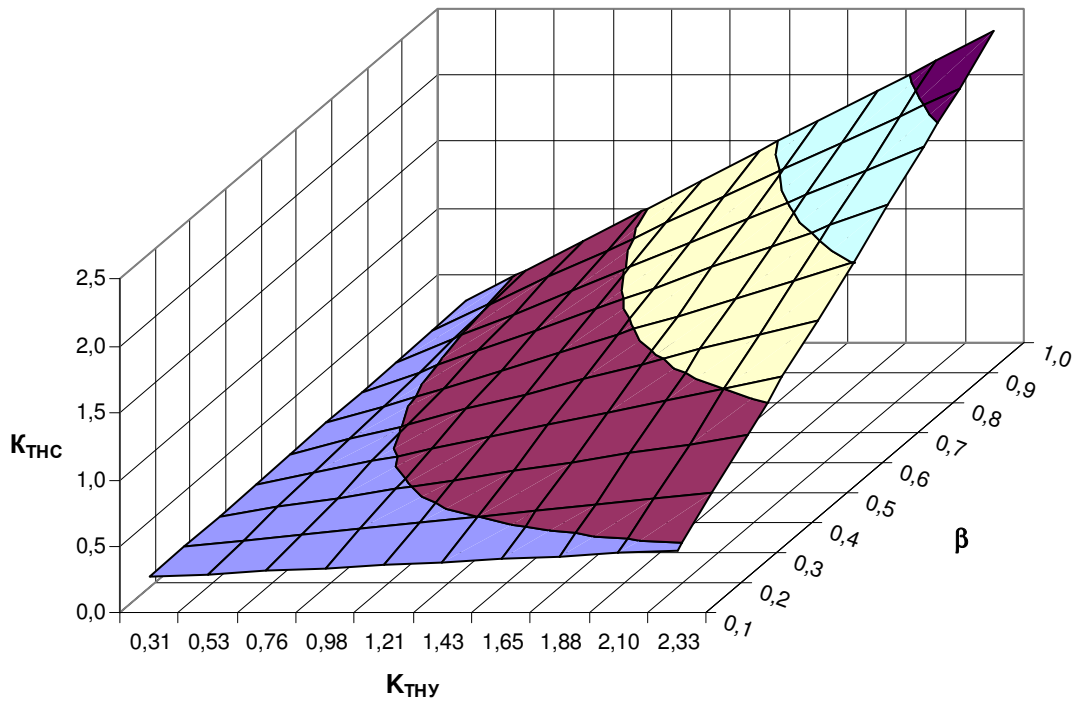


Рис. 3. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от когенерационного привода ТНУ

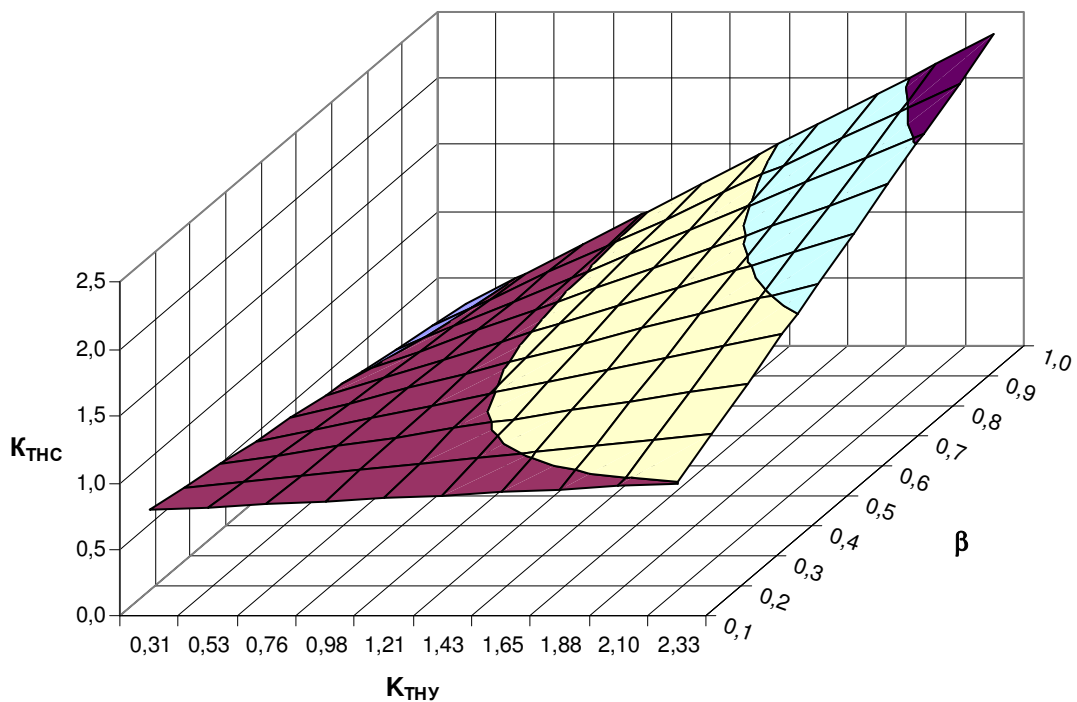


Рис. 4. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом при условии использования водогрейного топливного котла как пикового источника теплоты ТНС

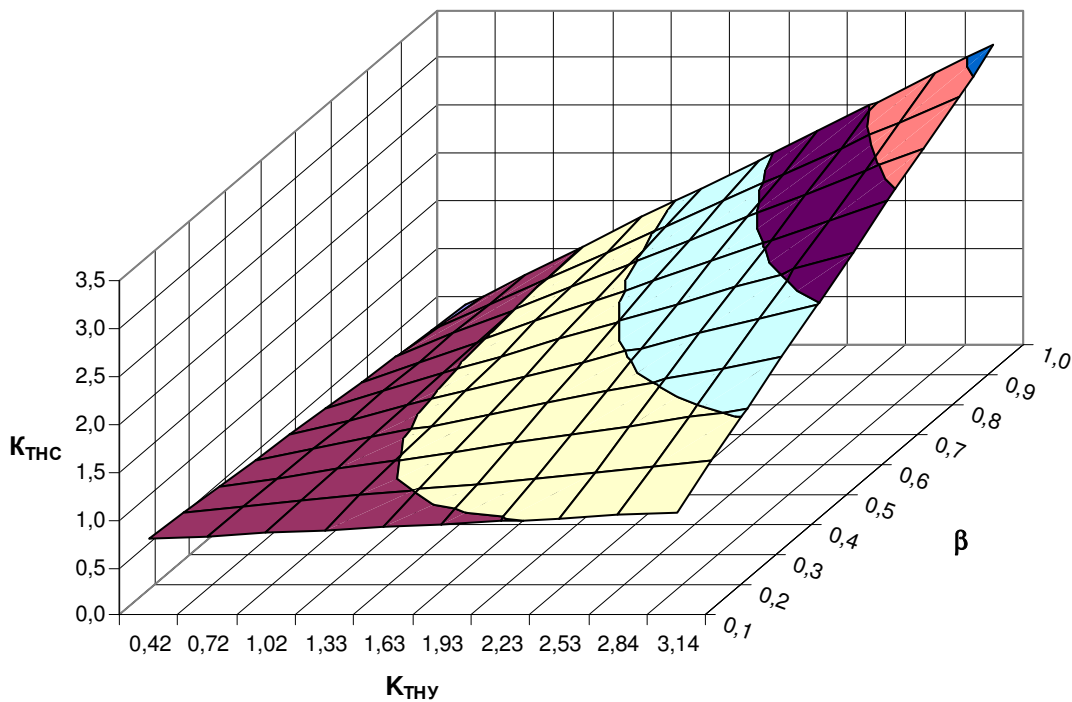


Рис. 5. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с когенерационным приводом при условии использования водогрейного топливного котла как пикового источника теплоты ТНС

Сравнивая результаты исследований, показанные на рис. 1 – 3 и рис. 4 – 5, можно сделать вывод, что использование топливного котла как пикового источника теплоты в когенерационных ТНС имеет преимущества по сравнению с использованием пикового электродвигателя с разными вариантами источников электроэнергии, что подтверждается большими значениями безразмерного критерия энергетической эффективности пикового источника теплоты в составе ТНС $K_{ПИТ}$ и безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ для разных режимов работы ТНС. На основе анализа результатов исследований (рис. 1 – 5) определено, что для ТНС большой мощности с когенерационным приводом и с пиковым топливным котлом фиксируют большие значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС $K_{ТНС}$ для всех исследованных режимов работы по сравнению с другими вариантами ТНС.

Из рис. 1 – 5 наглядно видно, что для случаев $K_{ТНУ} < K_{ПИТ}$ значение безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ будет уменьшаться с увеличением доли нагрузки ТНУ β . Для других случаев значение безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ будет расти с увеличением доли нагрузки ТНУ β .

На основе анализа результатов проведенных исследований [10 – 12] определены оптимальные значения показателя β для ТНС на разных источниках теплоты с разными видами привода компрессора ТНУ при переменных режимах работы тепловой сети.

На рис. 6 – 9 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ β . Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ для случаев переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС. Исследование проведено для случаев сезонной переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ в диапазоне $\beta = 0,16...0,63$ [10 –

12], что соответствует температурным режимам работы системы теплоснабжения. Значения критерия энергетической эффективности ТНУ с когенерационным приводом $K_{ТНУ}$ соответствуют значениям действительного коэффициента преобразования ТНУ в пределах $\varphi_{\partial} = 0,83 \dots 6,23$. Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрены: электрическая котельная с $\eta_{ЭК} = 0,95$ (рис. 6 – 8) и водогрейная топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,85$ (рис. 9). По формуле (3), согласно [6], для ТНУ малых уровней мощности с когенерационным приводом значение общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ составляет $\eta_{ЭЛ} = 0,28$.

На рис. 6 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ β при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) из энергосистемы Украины. В этом исследовании, согласно [6], учтены: усредненное значение КПД электростанций в Украине $\eta_{ЭС} = 0,383$ и значение КПД распределительных электрических сетей в Украине $\eta_{ЛЭП} = 0,875$.

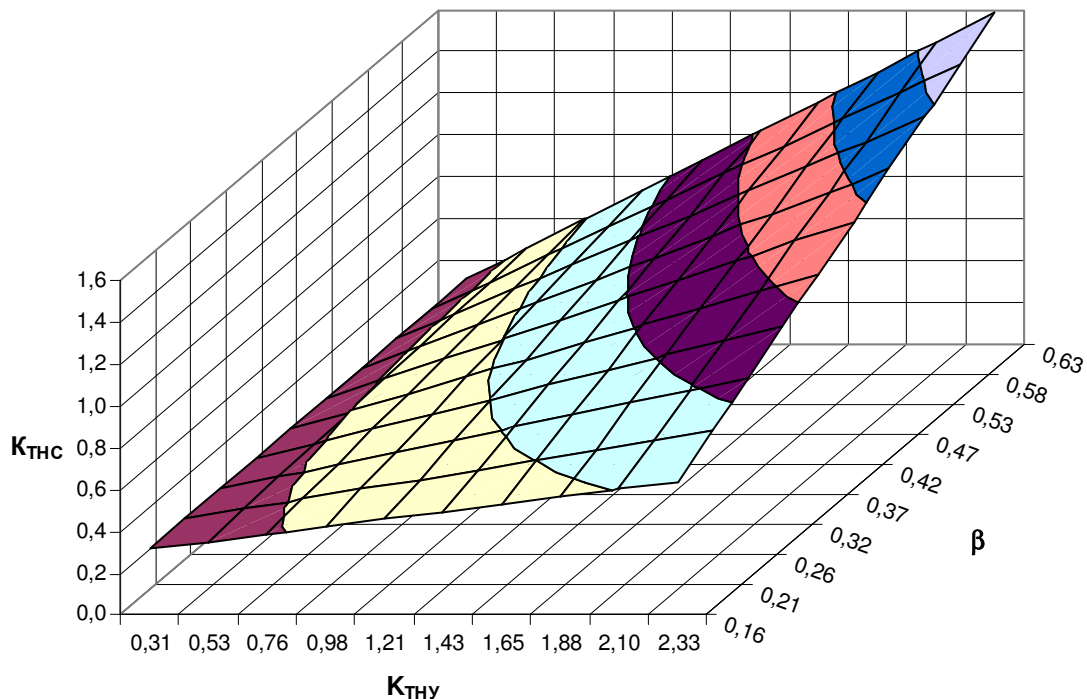


Рис. 6. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии пиковым электродотлом из энергосистемы Украины

На рис. 7 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ β при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от ПГУ. Согласно [6], в этом исследовании учтены: значение КПД ПГУ $\eta_{ЭС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$ и значение КПД распределительных электрических сетей в Украине $\eta_{ЛЭП} = 0,875$.

На рис. 8 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ β при условии потребления электроэнергии пиковым источником теплоты (электрическим котлом) от когенерационного привода ТНУ. В этом исследовании, согласно [6], учтены: значение эффективного КПД ГПД малой мощности $\eta_{ЭД} = 0,35$ и значение КПД электрического двигателя с учетом потерь энергии в блоке управления двигателем, согласно [6], $\eta_{ЭЛ} =$

0,8.

На рис. 9 показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ β при условии использования водогрейного топливного котла как пикового источника теплоты.

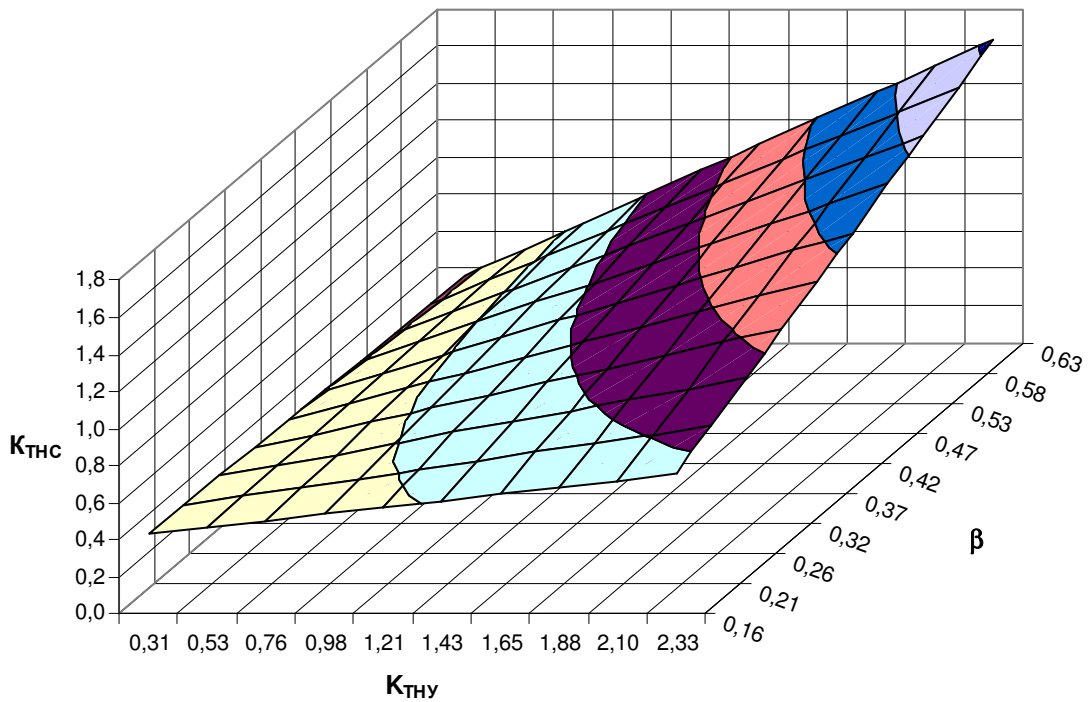


Рис. 7. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии пиковым электродкотлом от ПГУ

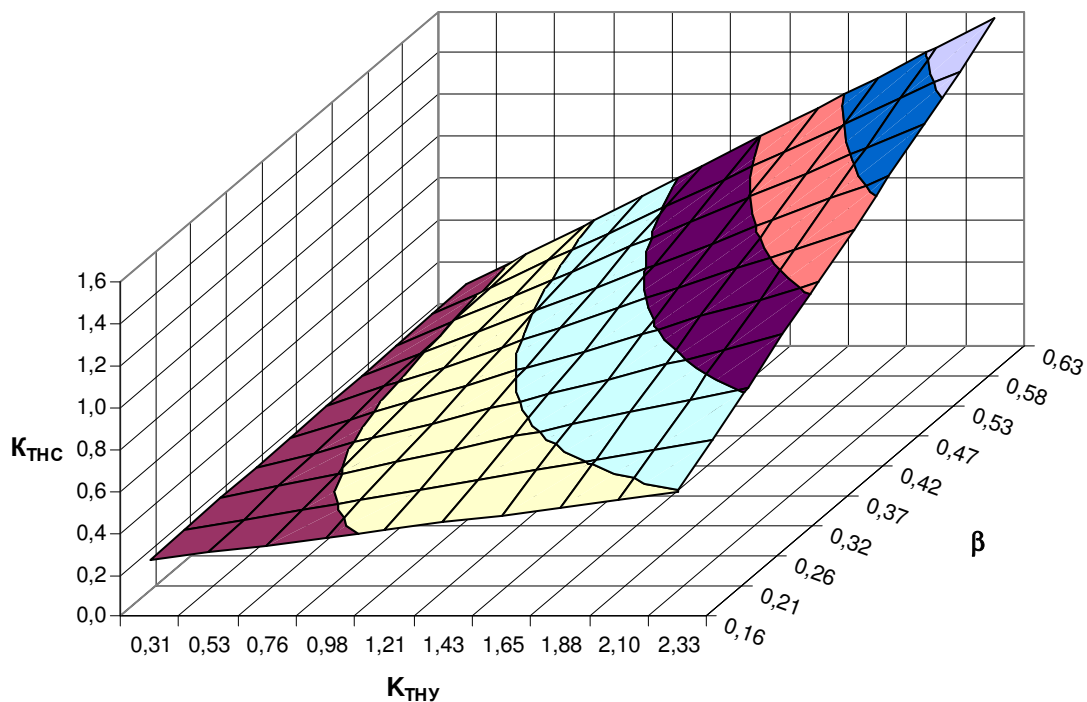


Рис. 8. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии пиковым электродкотлом от ПГУ

онным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии потребления электроэнергии пиковым электродкотлом от когенерационного привода ТНУ

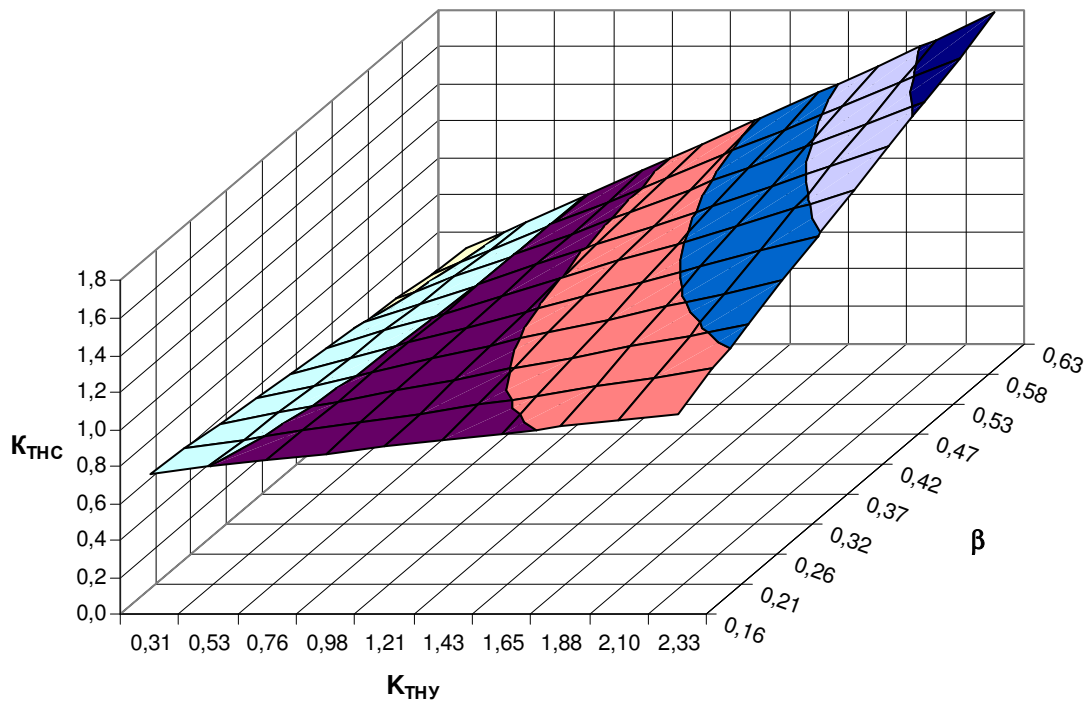


Рис. 9. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС малой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии использования водогрейного топливного котла как пикового источника теплоты ТНС

На рис. 10 показаны результаты комплексной оценки энергетической эффективности ТНС большой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ β . Здесь показаны значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом $K_{ТНС}$ для случаев сезонной переменной нагрузки ТНУ в составе ТНС для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ в диапазоне $\beta = 0,16 \dots 0,63$ [10 – 12], что соответствует температурным режимам работы системы теплоснабжения.

Согласно исследованию [6], в этом случае значения критерия энергетической эффективности ТНУ с когенерационным приводом $K_{ТНУ}$ соответствуют значениям действительного коэффициента преобразования ТНУ в пределах $\varphi_0 = 0,93 \dots 7,01$. Пиковым источником теплоты ТНС для этих условий предусмотрена водогрейная топливная котельная с $\eta_{ТК} = 0,85$. По формуле (3), согласно [6], для ТНУ больших уровней мощности с когенерационным приводом значения общего КПД генерирования, снабжения и преобразования электрической энергии к ТНУ составляет $\eta_{эл} = 0,378$.

На основе анализа результатов исследований (рис. 6 – 10) определено, что при оптимальных режимах работы для ТНС большой мощности с когенерационным приводом и с пиковым топливным котлом фиксируют большие значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС $K_{ТНС}$ по сравнению с другими исследованными вариантами ТНС.

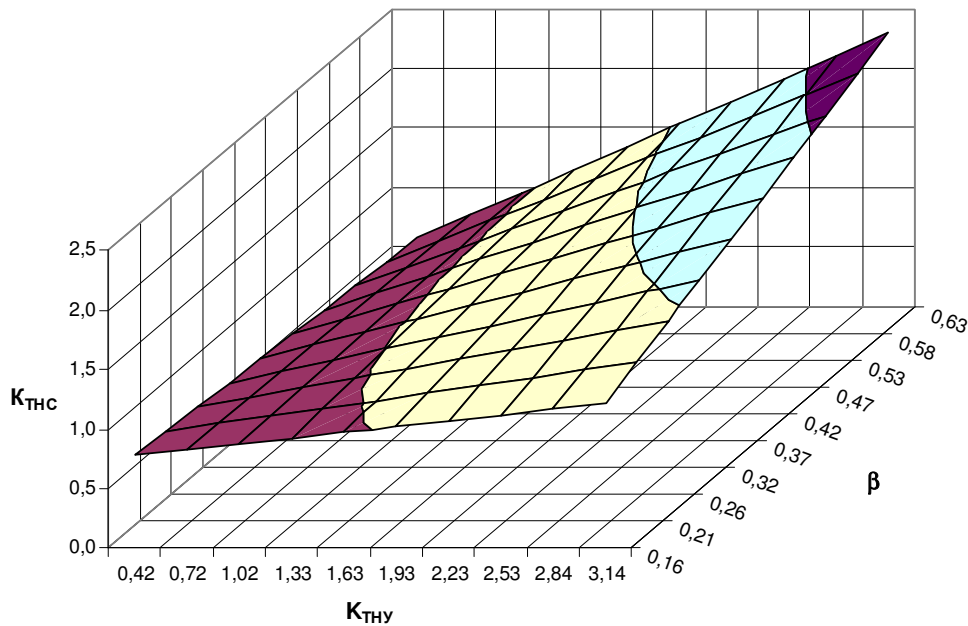


Рис. 10. Значения безразмерного критерия энергетической эффективности ТНС большой мощности с когенерационным приводом для оптимальных значений доли нагрузки ТНУ при условии использования водогрейного топливного котла как пикового источника теплоты ТНС

Для проведения комплексной оценки энергетической эффективности разных вариантов ТНС с когенерационным приводом, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [1, 6 – 12].

Выводы

Предложен подход по комплексному оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных теплонасосных станций с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Разработаны методические основы и проведена комплексная оценка энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом с учетом комплексного влияния переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС разных уровней мощности, с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии.

Предложенный комплексный подход по оцениванию энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом имеет ряд преимуществ:

- позволяет оценивать комплексное влияние переменных режимов работы ТНС, пиковых источников теплоты ТНС, источников приводной энергии парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии;
- учитывает режимы работы парокompрессионных ТНУ;
- учитывает переменные режимы работы ТНС для теплоснабжения на протяжении года с изменением распределения нагрузки между парокompрессионными ТНУ и пиковым источником теплоты ТНС;
- учитывает влияние источников приводной энергии парокompрессионных ТНС разных уровней мощности с учетом потерь энергии при генерировании, снабжении и преобразовании электрической энергии к ТНС;
- учитывает энергетическую эффективность парокompрессионных ТНС разных уровней мощностей с когенерационным приводом;

— учитывает влияние пиковых источников теплоты парокompрессионных ТНС и вида потребляемой ими энергии, с учетом потерь энергии при генерировании и снабжении энергии к пиковым источникам теплоты;

— в результате комплексного подхода к оцениванию энергетической эффективности ТНС с когенерационным приводом можно осуществить выбор наиболее эффективного пикового источника теплоты для определенного вида парокompрессионных ТНС;

— предложенные методические основы могут быть использованы для оценивания энергетической эффективности парокompрессионных ТНС с разными хладагентами и схемными решениями ТНУ;

— позволяет комплексно оценивать энергетическую эффективность значительного количества вариантов парокompрессионных ТНС с когенерационным приводом.

Для проведения комплексной оценки энергетической эффективности разных вариантов ТНС с когенерационным приводом, кроме вышеприведенных подходов, предлагаем использовать результаты исследований [1, 6 – 12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
2. Баласанян Г. А. Эффективность перспективных интегрированных систем энергозащезпечення на базі установок когенерациі малої потужності (теоретичні основи, аналіз, оптимізація) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Баласанян Геннадій Альбертович. – 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. Никитин Е. Е. Техничко-экономическая эффективность воздушных тепловых насосов с приводом от газопоршневых когенерационных установок в системах горячего водоснабжения / Е. Е. Никитин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 4. – С. 19 – 24.
5. 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.
6. Энергетическая эффективность парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тихоненко // Научные труды ВНТУ. – 2014. – № 4. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5563>.
7. Энергетические преимущества применения парокompрессионных тепловых насосов с электрическим и когенерационным приводами [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тихоненко // Научные труды ВНТУ. – 2015. – № 1. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3976/5777>.
8. Остапенко О. П. Перспективи застосування теплонасосних станцій в Україні / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2011. – № 2. – С. 132 – 139.
9. Экономическая эффективность теплонасосных станций для систем теплоснабжения [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Научные труды ВНТУ. – 2011. – №4. – Режим доступа: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1406/1005>.
10. Энергетический, экологический и экономический аспекты эффективности теплонасосных станций на природных и промышленных источниках теплоты [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, Е. В. Бакум, А. В. Ющишина // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 3. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/viewFile/3040/4627>.
11. Энергетическая эффективность теплонасосных станций с разными источниками теплоты при переменных режимах работы [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко, Е. В. Бакум // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 4. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5067>.
12. Энергоэкологическая эффективность теплонасосных станций на природных и промышленных источниках теплоты при переменных режимах работы [Электронный ресурс] / О. П. Остапенко, И. А. Валигура, А. Д. Коваленко. // Научные труды ВНТУ. – 2013. – № 2. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3033/4606>.

Остапенко Ольга Павловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики, olgaost@rambler.ru.

Винницкий национальный технический университет.