

## Математическое моделирование и оптимальное управление энергопотреблением микросети комбинированной выработки тепла и электроэнергии\*

М. А. К. Яхья, А. Г. Головкина

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** Яхья М. А. К., Головкина А. Г. Математическое моделирование и оптимальное управление энергопотреблением микросети комбинированной выработки тепла и электроэнергии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2024. Т. 20. Вып. 4. С. 446–466.

<https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.402>

Производство и интеграция возобновляемых источников энергии в системы микросетей в последнее время продемонстрировали значительный рост, благодаря их способности удовлетворять растущие потребности в электроэнергии, при этом не оказывая существенного влияния на загрязнение окружающей среды. Комбинированные системы охлаждения, обогрева и электроснабжения (ССНР), известные как системы тригенерации, являются наиболее эффективным и стабильным способом использования энергии, который имеет широкую перспективу применения. Тем не менее для повышения энергоэффективности и снижения общих затрат функционирования таких систем требуется разработка математической модели и модели оптимального управления ССНР. В работе представлен обзор известных математических моделей и моделей оптимального управления, обеспечивающих снижение затрат при удовлетворении потребностей в электроэнергии, обогреве и охлаждении. Рассмотрена задача совместной оптимизации нескольких критериев эффективности: потребление электроэнергии из сети, годовые общие затраты и выбросы углекислого газа. Проведено сравнение полученных характеристик систем ССНР с учетом различных стратегий их эксплуатации с системами раздельного охлаждения, обогрева и электроснабжения.

*Ключевые слова:* комбинированные системы охлаждения, тепла и энергии, энергогенерирующий блок, разделительное производство, многокритериальная оптимизация, критерии оценки, следование электрической нагрузке, следование тепловой нагрузке.

**1. Введение.** Быстрый рост населения и развитие промышленности, возрастание потребления электроэнергии и ограниченная доступность источников энергии относятся к ключевым проблемам, стоящим перед современной энергетикой. Экспоненциальное увеличение спроса на электроэнергию требует большего количества источников энергии [1]. Однако, в силу проблем, связанных с нехваткой ископаемого топлива, а также риска загрязнения окружающей среды с использованием традиционных источников энергии, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становятся все более привлекательными. Кроме того, благодаря более низкой общей стоимости производства возобновляемой энергии, они применяются в качестве ключевого элемента в комбинированных системах охлаждения, обогрева и электроснабжения (ССНР) [2]. Наиболее распространенным типом возобновляемой энергии являются

\* Исследование частично выполнено за счет гранта Санкт-Петербургского государственного университета, проект ID № 95438429.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

фотоэлектрические панели (PhotoVoltaic — PV) [3, 4], поэтому в данной работе рассматривается ССНР с возобновляемым блоком данного типа.

Для того чтобы компенсировать нерегулярную и ограниченную доступность возобновляемой энергии, в системах ССНР действуют аккумуляторные системы хранения энергии (BESS). Замещение в энергосистеме традиционных источников энергии на ВИЭ требует наличия системы управления, для того чтобы максимально использовать возобновляемый потенциал с целью снижения общей стоимости функционирования энергосистемы. Разработка такой системы управления — относительно новая и актуальная тема исследования, которая привлекает много внимания в последнее время [5].

Эффективность конверсии энергии на электростанциях традиционных типов составляет от 30 до 50 % [6]. Низкие значения коэффициента полезного действия (КПД) обуславливаются потерями энергии при передаче и распределении электроэнергии [7], а также, например, как в случае с тепловыми электростанциями, выбросом большого количества тепла в атмосферу. Утилизация даже части этого тепла может повысить общую энергоэффективность электростанций.

Распределенная генерация, описываемая как производство электроэнергии вблизи конечного потребителя, может минимизировать потери при передаче [8]. Таким образом, система ССНР из первичного источника энергии, называемая также тригенерацией, рассматривается как перспективное решение обозначенных выше проблем, которая, кроме того, обладает высокими техническими, экономическими и экологическими преимуществами [9].

Комбинированная теплоэнергетика (СНР), или «когенерация», представляет собой высокоэффективный процесс сжигания газа для одновременной выработки электрической и тепловой энергий. Побочное тепло, получаемое в процессе выработки электроэнергии, улавливается модулем рекуперации и может быть повторно применено для производства горячего воздуха, горячей воды или пара.

Система ССНР, или «тригенерация», — это процесс, при котором тепло, производимое СНР, используется для питания абсорбционного охладителя или охладителя прямого нагрева, чтобы охлаждать воду для кондиционирования или охлаждения воздуха в дополнение к производству электроэнергии и тепла.

По сравнению с традиционной системой раздельного производства энергии, в которой потребность в электроэнергии удовлетворяется за счет приобретения в сети и/или потребность на обогрев — благодаря сжиганию топлива в котле (первичная энергия), система ССНР имеет преимущества, связанные с более высокой энергоэффективностью и низкими выбросами загрязняющих веществ в атмосферу [10]. В связи с этим главной целью при проектировании систем ССНР является совместная минимизация потребления первичной энергии, годовых затрат и выбросов парниковых газов. Для достижения такой цели при проектировании ССНР необходимо учитывать предполагаемую стратегию работы системы, оценки эффективности каждой компоненты и оценки потребления электроэнергии, тепла и охлаждения изучаемого объекта [11].

Существуют две классические стратегии работы системы ССНР: удовлетворение в первую очередь потребности в электроэнергии (Following the Thermal Load — FEL) и в тепле (Following the Electric Load — FTL). Оценки и анализ каждой из них рассмотрены в [12–15], где показано, что стратегия FEL позволяет достичь лучших энергетических и экологических показателей, чем стратегия FTL.

Как правило, в системах ССНР для удовлетворения потребности в охлаждении

применяется абсорбционный охладитель. Поэтому из-за относительно низкого КПД абсорбционной охладительной машины потребление энергии в системах ССНР может быть выше, чем в обычных [16]. Однако этот недостаток может быть нивелирован за счет использования гибридной системы абсорбционного и электрического охладителя [17]. Тем не менее, учитывая высокие тарифы на электроэнергию, необходимо разработать стратегию работы для определения оптимального соотношения электрического и абсорбционного охлаждения. Например, авторы работы [18] применили алгоритм оптимизации роя частиц для проектирования и эксплуатации системы ССНР, оптимизируя мощность энергогенерирующего блока, резервуара для хранения и скорость электрического охлаждения к общей нагрузке охлаждения для достижения наивысших энергетических, экономических и экологических показателей системы ССНР. В [19] рассмотрена стратегия переменного соотношения электрического и абсорбционного охлаждения с постоянной стратегией соотношения электрического и абсорбционного охлаждения для нескольких климатических зон, и было установлено, что стратегия переменного соотношения электрического и абсорбционного охлаждения обеспечивает больше преимуществ во всех исследованных климатических зонах. В [20] оптимизированы энергетические, экономические и экологические показатели системы ССНР с гибридным охладителем и обнаружено, что, если система ССНР сочетается с системами теплового хранения и ВИЭ, производительность системы ССНР значительно возрастает.

Для того чтобы максимально увеличить выгоду от системы ССНР, важно, с одной стороны, оптимизировать проектные параметры систем ССНР, например мощность. В случае системы разделенного производства (Separation Production — SP) эту мощность легко определить, поскольку ее размер напрямую зависит от энергетической нагрузки здания. С другой стороны, в результате сложной стратегии эксплуатации систем ССНР ее мощность трудно вычислить. Учитывая цены на установки, стоимость электроэнергии в сети и тарифы на топливо, был сделан обзор методов многокритериальной оптимизации для расчета оптимальной мощности установок с целью максимизации энергетических, экономических и экологических преимуществ системы ССНР.

Некоторые исследователи применяют традиционные методы многокритериальной оптимизации, такие как метод весов [21–23] и метод  $\epsilon$ -ограничений [24–26]. Первый широко используется благодаря своей простой процедуре. Однако нелегко определить вес каждой цели, и при применении весового метода будет получено недостаточное количество решений Парето, что затрудняет точное достижение фронта Парето. Методу  $\epsilon$ -ограничений свойственна вычислительная сложность, которая значительно выше, чем у весового метода, при использовании которого достигается только локальный оптимум. Это означает, что глобальный оптимум зависит от начального предположения [27].

Чтобы справиться с ограничениями классических методов, для оптимизации системы ССНР были приняты алгоритмы, основанные на эволюции. Наиболее распространенным эволюционным алгоритмом, используемым в системе ССНР, является генетический с недоминирующей сортировкой-II (NSGA-II) [28–31], который, как было доказано, относится к наиболее эффективным алгоритмам многокритериальной оптимизации, способным искать более широкий диапазон решений и лучше сходиться к Парето-оптимальному фронту по сравнению с другими многокритериальными эволюционными алгоритмами [32]. Поэтому в настоящей статье проведен обзор NSGA-II алгоритма.

Данная статья построена следующим образом. Сначала в п. 2 представлены характеристики систем ССНР и традиционной системы SP, где были созданы математические модели стратегий, основанных на потоке энергии. Многокритериальному оптимизационному подходу к решению задачи оптимизации, где описаны алгоритм NSGA-II и подходы к принятию решений, посвящен п. 3. В п. 4 обсуждается процесс принятия решений по оптимальной стратегии переключения для системы ССНР на основе двух режимов работы. В п. 5 приведены итоги исследования и даны рекомендации в области проектирования и эксплуатации систем ССНР.

## 2. Описание конструкции и стратегии гибридной системы ССНР.

**2.1. Разделенная производственная система (SP).** Поток энергии в SP показан на рис. 1. Для этой системы общее потребление электроэнергии из электросети  $E_{grid}^{SP}$  равно

$$E_{grid}^{SP} = E_{user} + E_{BC}^{SP}.$$

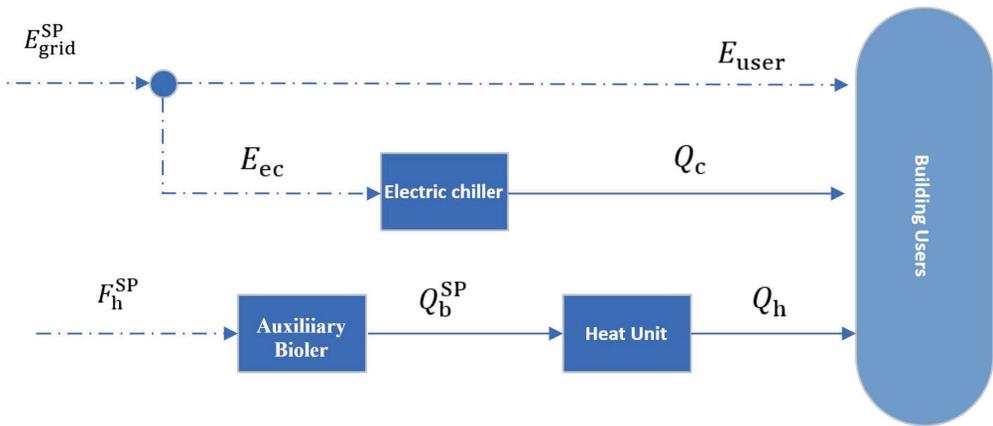


Рис. 1. Схема разделенной производственной системы

Статическая зависимость  $E_{BC}^{SP}$  между входом и выходом электрического охладителя может быть выражена как

$$E_{BC}^{SP} = Q_c / COP_{BC},$$

где  $COP_{BC}$  — КПД электрического охладителя.

Расход топлива системы отопления определяется следующим образом:

$$F_b^{SP} = \frac{Q_b^{SP}}{\eta_b} = \frac{Q_h}{\eta_b \eta_h}.$$

**2.2. Система ССНР.** Основное различие между этой системой и системой SP заключается в том, что отработанное тепло, отводимое от первичного двигателя системы, рекупируется для производства охлаждения и нагрева для удовлетворения потребностей. В состав системы ССНР входят энергоблок с газовой турбиной (Gas Turbine — GT) и PV, система рекуперации тепла, вспомогательный котел, абсорбционный охладитель, отопительный агрегат. Гибридная система ССНР представлена на рис. 2.

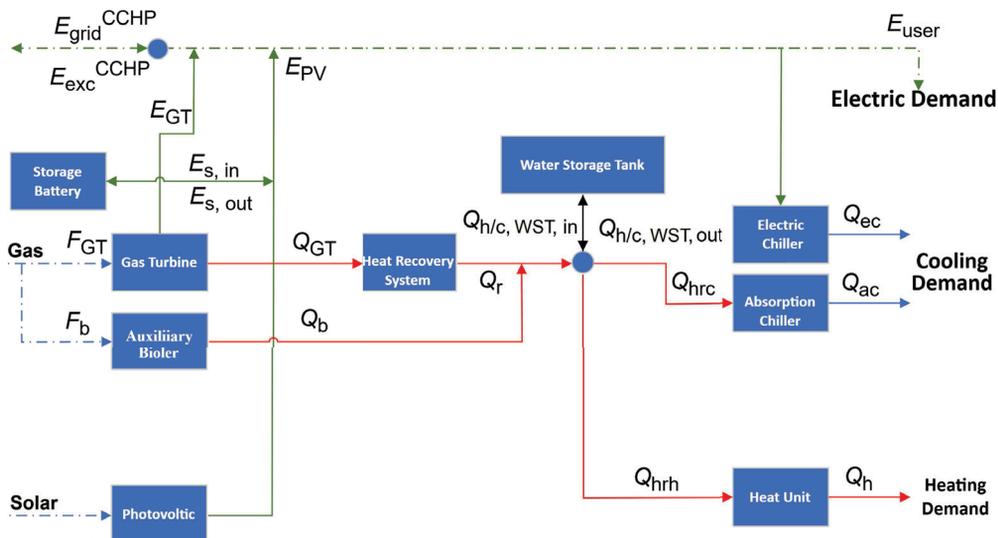


Рис. 2. Конфигурация ССНП системы

Опишем энергетические принципы работы компонентов гибридной системы ССНП:

PV	$E_{PV}(t) = f N_{PV} [G_p / G_{STC}] [1 + \alpha (T_{PV,p}(t) - T_{PV,STC})],$ $G_{STC} = 1000 / \text{м}^2, T_{PV,STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$
GT	$E_{GT} = F_{GT}(t) \eta_{e,GT}, Q_{GT} = F_{GT}(t) (1 - \eta_{e,GT} - \eta_{h,los}).$
WST	$Q_{h/c,WST}^1(t) = \eta_{WST} Q_{h/c,WST}^0(t) + Q_{h/c,WST,in}(t) - Q_{h/c,WST,out}(t),$ $\eta_{WST} = (1 - 20) \text{ лет}.$
Battery	$E_s^1(t) = E_s^0(t) (1 - \eta_{s,los}) + [\varepsilon E_{s,in}(t) \eta_{s,ch} - (1 - \varepsilon) E_{s,out}(t) / \eta_{s,disch}] \Delta t.$
Balance	$E_{grid}^{CCHP}(t) + E_{PV}(t) + E_{GT}(t) + \varepsilon E_{s,out}(t) = E_{user}(t) + E_{ec}(t) + (1 - \varepsilon) E_{s,in}(t),$ $E_{grid}^{CCHP} = (E_{user} + E_{ec}) - (E_{PV} + E_{GT} + E_{s,out}),$ <p>если <math>E_{PV} + E_{GT} + E_{s,out} &lt; E_{user}</math>,</p> $E_{exc}^{CCHP} = (E_{PV} + E_{GT}) - (E_{user} + E_{ec} + E_{s,in}),$ <p>если <math>(E_{user} + E_{ec} + E_{s,in}) &lt; (E_{PV} + E_{GT})</math>,</p> $Q_r + Q_{h,WST,out} + Q_b - Q_{h,WST,in} = Q_h,$ $Q_{hrc} + Q_{c,WST,out} + Q_{ec} - Q_{c,WST,in} = Q_c.$

### 2.3. Режимы работы.

2.3.1. Режим следования электрической нагрузки (FEL). Режим FEL означает, что энергогенерирующий блок (Power Generation Unit – PGU) загружается для удовлетворения электрических потребностей пользователей. В то же время отработанное тепло от этой нагрузки рекуперировано для обеспечения потребностей в охлаждении и обогреве. К сожалению, в большинстве случаев рекуперированное тепло не может точно удовлетворить потребность в тепле.

Таким образом, вспомогательный котел и при определенных обстоятельствах теплоаккумулирующее оборудование должны быть внедрены в систему ССНР, чтобы сбалансировать спрос и потребность в энергии.

Основная идея стратегии эксплуатации FEL заключается в том, что GT не вырабатывает избыточной электроэнергии.

Во-первых, общий объем электроэнергии, вырабатываемой PGU, должен удовлетворять требованию потребителей:

$$E_{\text{pgu-FEL}} = E_{\text{user}}.$$

Расход топлива PGU можно оценить как

$$F_{\text{pgu-FEL}} = \frac{E_{\text{pgu-FEL}}}{\eta_{\text{pgu}}}. \quad (1)$$

Следовательно, тепловая энергия, преобразованная системой рекуперации тепла, определяется так:

$$Q_r = (F_{\text{pgu-FEL}} - E_{\text{pgu-FEL}})\eta_{\text{hrs}} = F_{\text{pgu-FEL}}(1 - \eta_{\text{pgu}})\eta_{\text{hrs}}. \quad (2)$$

Если  $Q_{r\text{-FEL}} \leq Q_{\text{hrc}} + Q_{\text{hrh}}$ , тогда  $Q_{b\text{-FEL}} = Q_{\text{hrc}} + Q_{\text{hrh}} - Q_{r\text{-FEL}}$ . В противном случае  $Q_{b\text{-FEL}} = 0$ , где  $Q_{\text{hrc}} = Q_c / COP_{\text{ac}}$ ,  $Q_{\text{hrh}} = Q_h / \eta_h$ .

Тогда расход топлива вспомогательного котла можно рассчитать следующим образом:

$$F_{b\text{-FEL}} = \frac{Q_{b\text{-FEL}}}{\eta_b},$$

а общий расход топлива как

$$F_{m\text{-FEL}} = F_{\text{pgu-FEL}} + F_{b\text{-FEL}}.$$

Так как система еще содержит другие источники энергии помимо PGU, то конкретная операция подразделяется на три случая.

*Случай 1:* когда  $E_{\text{user}} \leq E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}} + E_{\text{min}}$ , где  $E_{\text{min}}$  — минимальная генерирующая мощность GT (кВт); это значит, что GT не работает. Такое рабочее состояние можно разделить на следующие типы:

а)  $E_{\text{user}} \leq E_{\text{PV}}$ : необходимая электроэнергия удовлетворяется только PV, а избыточная энергия будет храниться в аккумуляторной батарее или продаваться в сеть;

б)  $E_{\text{PV}} < E_{\text{user}} \leq E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}}$ : необходимая энергия поставляется PV и аккумуляторной батареей;

в)  $E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}} < E_{\text{user}} \leq E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}} + E_{\text{min}}$ : необходимая энергия поставляется PV, аккумуляторной батареей и сетью.

*Случай 2:* когда  $E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}} + E_{\text{min}} \leq E_{\text{user}} \leq E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}} + E_{\text{max}}$ , где  $E_{\text{max}}$  — максимальная генерирующая мощность GT (кВт); это значит, что GT работает под частичной нагрузкой для достижения электрической нагрузки и выработки определенного количества тепла.

*Случай 3:* когда  $E_{\text{PV}} + E_{s,\text{out}} + E_{\text{max}} \leq E_{\text{user}}$ ; это значит, что номинальное рабочее GT производит определенное количество электроэнергии и тепла, недостаточное количество дополняется из сети.

*2.3.2. Режим следования тепловой нагрузки (FTL).* Режим FTL означает, что PGU загружается, чтобы иметь достаточно рекуперированного отработанного тепла

для удовлетворения потребностей в охлаждении и обогреве. Между тем, если произведенная электроэнергия не соответствует запросу, расхождения должны быть импортированы из сети или отправлены обратно в сеть.

Во-первых, общая тепловая энергия, вырабатываемая системой рекуперации тепла, должна соответствовать потребности в тепловой энергии абсорбционного охладителя и отопительного агрегата:

$$Q_{r\text{-FTL}} = Q_{\text{hrc}} + Q_{\text{hrh}} + Q_{\text{hst,out}},$$

так как расход топлива PGU можно оценить как

$$F_{\text{pgu-FTL}} = \frac{Q_{r\text{-FTL}}}{(1 - \eta_{\text{pgu}})\eta_{\text{hrs}}}. \quad (3)$$

Общая электрическая мощность, поставляемая PGU, может быть определена следующим образом:

$$E_{\text{pgu-FTL}} = F_{\text{pgu-FTL}}\eta_{\text{pgu}}. \quad (4)$$

При данной стратегии работы электрическую нагрузку можно разделить на два случая.

*Случай 1:* когда  $E_{\text{PV}} + E_{\text{s,out}} + E_{\text{gt}} \leq E_{\text{user}}$ , недостаточное количество электроэнергии покупается сетью.

*Случай 2:* когда  $E_{\text{PV}} + E_{\text{s,out}} + E_{\text{gt}} \geq E_{\text{user}}$ , избыток электроэнергии либо хранится в аккумуляторе, либо продается в сеть.

Так как PGU является основным компонентом системы ССНР, то необходимо учитывать только расход топлива. Тогда рассмотрим следующие случаи, в которых не принимается во внимание вклад солнечной энергии.

*Случай 1:*  $E_{\text{grid}} = E_{\text{user}} - E_{\text{pgu-FTL}}$ , если  $E_{\text{pgu-FTL}} \leq E_{\text{user}}$ .

*Случай 2:*  $E_{\text{excess}} = E_{\text{pgu-FTL}} - E_{\text{user}}$ , если  $E_{\text{pgu-FTL}} \geq E_{\text{user}}$ .

**3. Многокритериальная оптимизация.** Как описано выше, хорошая система ССНР должна обеспечивать уменьшение экономических затрат, снижение энергопотребления, а также сокращение выбросов загрязняющих веществ. Эффективность работы системы ССНР явно зависит от стратегии ее эксплуатации и конфигурации. Для того чтобы максимално увеличить выгоду от системы ССНР, важно оптимизировать проектные параметры систем ССНР, например мощность. С одной стороны, в случае системы SP эту мощность легко установить, поскольку ее размер напрямую зависит от энергетической нагрузки здания, с другой — в результате сложности стратегий эксплуатации мощность объектов трудно определить в системах ССНР. Учитывая цены на объекты, стоимость электроэнергии в сети и тарифы на топливо, для расчета оптимальной мощности объектов с целью максимизации энергетических, экономических и экологических преимуществ системы ССНР был принят некоторый многокритериальный оптимизационный подход.

В задачах многокритериальной оптимизации обычно не существует решения, способного максимизировать или минимизировать все целевые функции одновременно. Потому внимание уделяется оптимальным решениям Парето, которые не доминируют над другими решениями и не могут быть улучшены в отношении какой-либо одной цели без ослабления хотя бы одной другой цели.

Оптимальное множество Парето — это множество всех решений без доминирования, а соответствующие значения объективной функции называются границей Парето. Оно ограничено надирным вектором цели (znadir) и идеальным вектором цели

(zideal), определяющими нижнюю и верхнюю границы целевой функции оптимального решения Парето соответственно. Все вышеперечисленные элементы проиллюстрированы на рис. 3, где показан фронт Парето многообъектной оптимизации двух целевых функций  $f_1$  и  $f_2$ .

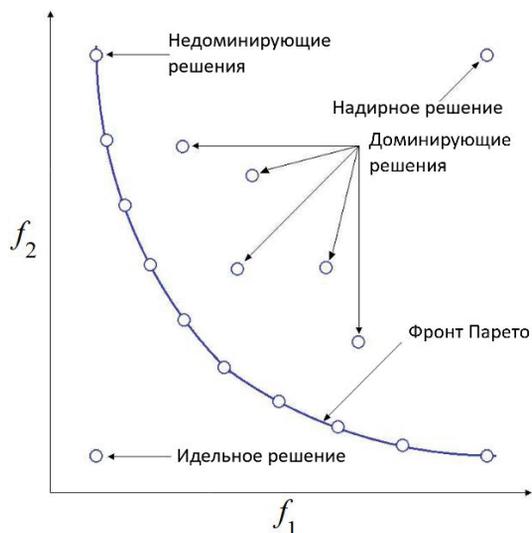


Рис. 3. Граница Парето многокритериальной оптимизации

Проблема оптимизации может быть выражена как многокритериальная оптимизация следующим образом:

$$\max_{X \in R} / \min \{y_1(X), y_2(X), \dots, y_t(X)\},$$

где  $X$  — вектор переменной решения;  $R$  — пространство решений  $X$ ;  $y_z(X)$  — целевая функция,  $z = 1, 2, \dots, t$ .

Ограничения при оптимизации системы ССНР включают ограничения на мощность оборудования, энергетические балансы и стратегию работы (см. п. 2).

**3.1. Переменные решения.** Переменные решения в гибридной системе ССНР включают проектные и эксплуатационные переменные.

Мощность GT как основного компонента системы ССНР напрямую влияет на мощность и рабочее состояние другого оборудования. Когда GT большой, его пусковая мощность соответственно увеличивается, и системе может потребоваться больше электроэнергии из сети, когда GT не работает. Интеграция оборудования для использования солнечной энергии может снизить потребление природного газа и выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду. Но его высокая стоимость может привести к уменьшению экономических показателей. Накопители энергии, такие как аккумулятор и резервуар для хранения воды, могут реализовать развязку производства и потребления энергии, тем самым повышая гибкость и надежность работы системы. Таким образом, размеры GT, PV, WST и аккумулятора ( $N_{GT}$ ,  $N_{PV}$ ,  $N_{WST}$  и  $N_s$  соответственно) выбраны в качестве основных переменных.

**3.2. Определение целевых функций.** В данной многокритериальной оптимизации рассматриваются три целевые функции: потребление первичной энергии,

годовые общие затраты и выбросы углекислого газа, они все должны быть минимизированы. Таким образом, целевые функции были сформулированы следующим образом:

$$\min f_{\text{PEC}} = \sum_{t \rightarrow 1}^T \sum_i (F_{\text{fuel},i,t}) = \sum_{t \rightarrow 1}^T \{k_e E_{\text{grid}}(t) + k_f F_{\text{pgu}}(t) + k_f F_b(t)\},$$

$$\min f_{\text{CDE}} = \sum_{t \rightarrow 1}^T \sum_i (E_{\text{CO}_2,i,t}) = \sum_{t \rightarrow 1}^T \{\mu_e E_{\text{grid}}(t) + \mu_f F_{\text{pgu}}(t) + \mu_f F_b(t)\},$$

$$\min f_{\text{cost}} = \sum_{t \rightarrow 1}^T \sum_i (C_{\text{fuel},i,t}) = \sum_{t \rightarrow 1}^T \{C_e E_{\text{grid}}(t) + C_f F_{\text{pgu}}(t) + C_f F_b(t)\}.$$

*3.2.1. Энергетический критерий.* Потребление первичной энергии (PEC) является наиболее важным и последовательным показателем, отражающим эффективность работы системы ССНР:

$$F^{\text{CCHP}} = F_{\text{pgu}} + F_b + F_{\text{grid}} = \frac{E_{\text{pgu}}}{\eta_{\text{pgu}}} + \frac{Q_b}{\eta_b} + \frac{E_{\text{grid}}}{\eta_{\text{pgu}} \eta_e}.$$

Критерии PEC для режимов FEL и FTL можно выразить так:

$$\text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} = F_{\text{m-FEL}} k_f = (F_{\text{pgu-FEL}} + F_{\text{b-FEL}}) k_f,$$

$$\text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = E_{\text{grid}} k_e + E_{\text{m-FTL}} k_f.$$

Система SP обеспечивает охлаждение и отопление потребителей путем преобразования электроэнергии и топлива. Ее значение PEC определяется таким образом:

$$\text{PEC}^{\text{SP}} = E_{\text{grid}}^{\text{SP}} k_e + F_b^{\text{SP}} k_f.$$

В обычных условиях коэффициенты преобразования  $k_e$  и  $k_f$  основаны на отдельных величинах: количестве исходной энергии для производства топлива и электроэнергии; количестве топлива и электроэнергии, потерянной при передаче и распределении. Предположим, что системы SP и ССНР расположены в одном и том же или в смежном районе, тогда  $k_e$  одинаков для обеих систем, как и  $k_f$ .

*3.2.2. Экологический критерий.* Многие научные данные показывают, что  $\text{CO}_2$ , выделяемый при сжигании ископаемого топлива, способствует глобальному потеплению. Поэтому снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в системе ССНР является важным вопросом; критерии выбросов углекислого газа (CDE) для режимов FEL и FTL задаются следующим образом:

$$\text{CDE}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} = F_{\text{m-FEL}} \mu_f,$$

$$\text{CDE}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = E_{\text{grid}} \mu_e + F_{\text{m-FTL}} \mu_f.$$

Значение CDE для системы SP может быть рассчитано так:

$$\text{CDE}^{\text{SP}} = E_{\text{grid}}^{\text{SP}} \mu_e + F_b^{\text{SP}} \mu_f.$$

3.2.3. *Экономический критерий.* Определим годовую общую стоимость (АТС), включающую годовую стоимость капитала, годовую стоимость эксплуатации и обслуживания, а также годовую стоимость энергии:

$$АТС = C_{\text{cap}} + C_{\text{o,m}} + C_{\text{ng}} + C_{\text{grid}},$$

здесь  $C_{\text{cap}}$  — годовая стоимость инвестиций в оборудование;  $C_{\text{o,m}}$  — годовая стоимость эксплуатации и обслуживания;  $C_{\text{ng}}$  — годовая стоимость топлива;  $C_{\text{grid}}$  — годовая стоимость энергии. Тогда имеем, что

$$АТС = R \sum_{m=1}^l N_m C_m + \epsilon \sum_{m=1}^l N_m C_m + \sum_{j=1}^O F_{m,j} C_{f,j} + \sum_{j=1}^O E_{\text{grid},j} C_{e,j} - \sum_{j=1}^O E_{\text{exc},j} C_{\text{sell},j},$$

где  $N_m$  — установленная мощность (кВт)  $m$ -го оборудования;  $C_m$  — удельная инвестиционная стоимость (долл./кВт)  $m$ -го оборудования;  $l$  — количество оборудования;  $O$  — годовые часы работы;  $C_f$  — стоимость природного газа (долл./кВт);  $C_e$  и  $C_{\text{sell}}$  — стоимость покупаемой и продаваемой электроэнергии соответственно (долл./кВт); годовая стоимость эксплуатации и обслуживания оборудования считается равной 6% (коэффициент пропорциональности  $\epsilon = 0.06$ ) от его инвестиционной стоимости [33];  $R$  — коэффициент возврата капитала:

$$R = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1},$$

здесь  $i$  — ставка дисконтирования,  $n$  — срок службы оборудования ( $i = 6\%$  и  $n = 20$  лет для всего оборудования, а для аккумулятора  $n = 9$ ) [34].

Поэтому затраты на электроэнергию, топливо и налог на выбросы углерода могут быть отдельно включены в критерий COST:

$$\text{COST}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} = F_{\text{m-FEL}} C_f + F_{\text{m-FEL}} \mu_f C_{\text{ca}},$$

$$\text{COST}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = E_{\text{grid}} C_e + F_{\text{m-FTL}} C_f + F_{\text{m-FTL}} \mu_f C_{\text{ca}} - E_{\text{excess}} C_{\text{sell}}.$$

**3.3. Показатели эффективности.** Для оценки энергетических, экономических и экологических показателей системы ССНР по сравнению с системой SP применяются следующие критерии оценки:

- Primary Energy Saving Ratio (PESR):

$$\text{PESR} = \frac{\text{PEC}^{\text{SP}} - \text{PEC}^{\text{CCHP}}}{\text{PEC}^{\text{SP}}} = \frac{\sum_{t=1}^O F^{\text{SP}}(t) - \sum_{t=1}^O F^{\text{CCHP}}(t)}{\sum_{t=1}^O F^{\text{SP}}(t)} \cdot 100 \%.$$

PESR обычно используется для оценки экономии энергии топлива, достигаемой системой ССНР по сравнению с системой SP.

Энергетическая эффективность гибридной системы ССНР выражается показателем PESR топлива, в котором не учитывается вклад солнечной энергии.

- Annual Total Cost Saving Ratio (ATCSR):

$$\text{ATCSR} = \frac{\text{ATC}^{\text{SP}} - \text{ATC}^{\text{CCHP}}}{\text{ATC}^{\text{SP}}} \cdot 100 \%.$$

Соотношение между годовой общей стоимостью системы ССНП и годовой общей стоимостью системы SP определяется как коэффициент ATCSR.

- Carbon Dioxide Emission Reduction Ratio (CDERR):

$$\text{CDERR} = \frac{\sum_{t=1}^O \text{CDE}^{\text{SP}}(t) - \sum_{t=1}^O \text{CDE}^{\text{ССНП}}(t)}{\sum_{t=1}^O \text{CDE}^{\text{SP}}(t)} \cdot 100 \%.$$

CDERR иллюстрирует экологические преимущества, полученные при использовании системы ССНП по сравнению с системой SP.

**3.4. Метод решения.** При оптимизации многокритериальных задач каждая целевая функция может быть оптимизирована отдельно; однако трудно найти оптимальное решение, удовлетворяющее всем целям, особенно если они противоречат друг другу. Существенное отличие многокритериальной оптимизации от однокритериальной заключается в том, что решение может быть не единственным, однако существует множество оптимальных решений, состоящее из нескольких Парето-оптимальных решений. Каждый элемент этого множества называется или Парето-оптимальным решением, или неидеальным оптимальным решением. Для эффективного получения оптимальных результатов используется алгоритм NSGA-II, предложенный в 2002 г. [32].

Генетический алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) часто применяется для оптимизации систем ССНП, благодаря своей способности решать многокритериальные задачи оптимизации. Системы ССНП имеют несколько целей, таких как минимизация затрат на энергию, снижение выбросов и максимизация эффективности системы, которые могут противоречить друг другу. Алгоритм NSGA-II является популярным выбором для решения данных задач, поскольку он разработан для поиска набора Парето-оптимальных решений, которые представляют собой наилучшие возможные компромиссы между конфликтующими целями.

В NSGA-II используется генетический алгоритм, который генерирует популяцию решений-кандидатов и итеративно улучшает их с помощью операций выбора, кроссинговера и мутации. Он ранжирует решения на основе их доминирования, которое определяется путем сравнения объективных значений решений. Затем решения объединяются для создания новой популяции, и этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут критерий остановки.

В контексте систем ССНП NSGA-II может использоваться для оптимизации рабочих параметров системы, таких как уставки охладителей, котлов и генераторов, чтобы достичь желаемого компромисса между стоимостью энергии, выбросами и эффективностью. Алгоритм также может быть выбран для оптимизации размера и конфигурации системы, например количества и типа оборудования, для дальнейшего повышения ее производительности.

В целом NSGA-II является мощным инструментом для оптимизации систем ССНП благодаря своей способности решать многокритериальные задачи оптимизации и гибкости в оптимизации различных аспектов проектирования и эксплуатации системы. Схема оптимизации гибридной системы ССНП представлена на рис. 4. Основные процедуры поиска оптимальных результатов включают следующие шаги.

*Шаг 1.* Установить начальные параметры. К ним относятся параметры системы и NSGA-II. Параметры системы ССНП — это типы оборудования, технические параметры, экономические параметры, стратегии работы гибридных систем ССНП и SP и энергетические нагрузки зданий; т. е. это основные параметры для моделирования энергетического баланса. Параметры NSGA-II включают *pop*, *gen*, *p<sub>c</sub>*, *p<sub>m</sub>*, *mu* и *mit*; они определяют эффективность результатов поиска. Эти параметры обозна-

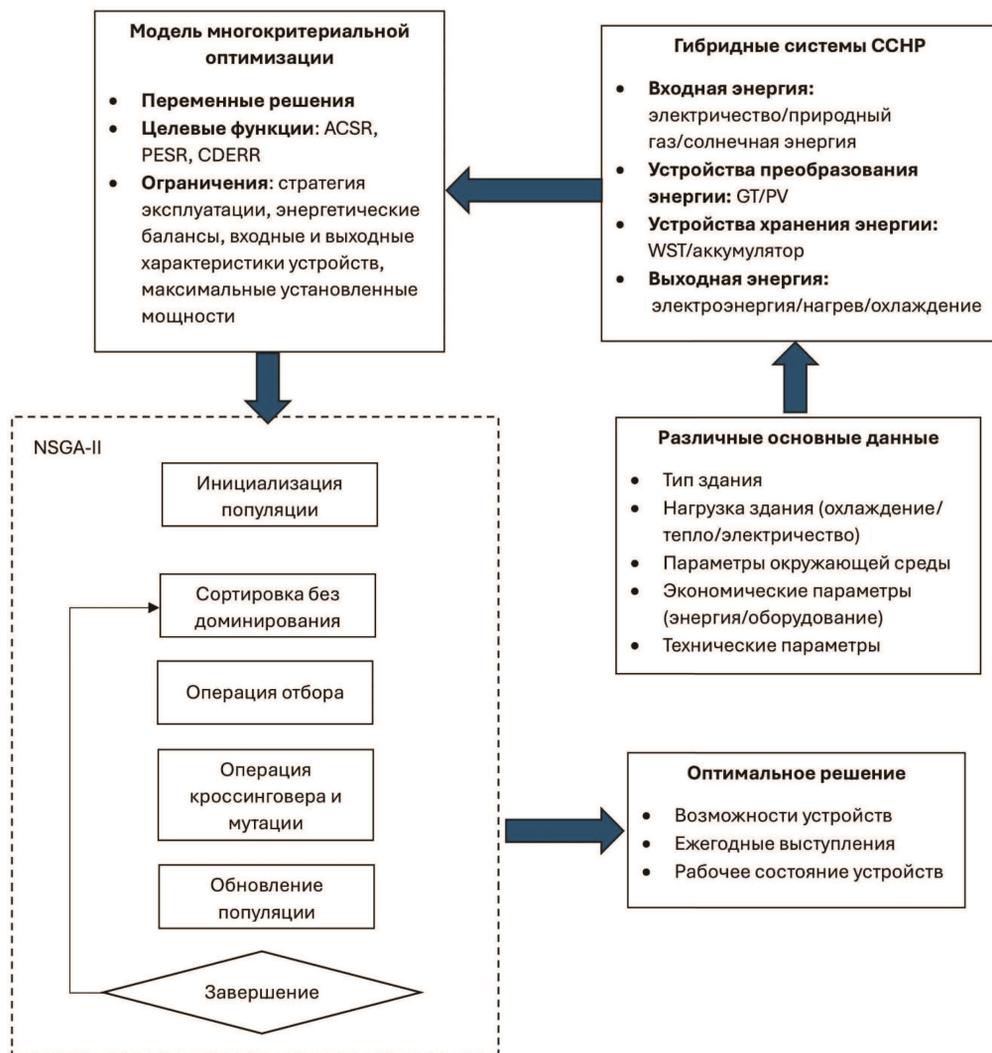


Рис. 4. Схема оптимизации гибридной системы ССНП

чают размер популяции, количество итераций, вероятности кроссинговера и мутации и индексы распределения операций кроссинговера и мутации соответственно.

*Шаг 2.* Инициализация популяции. На основе входных параметров на предыдущем этапе генерируется  $Y$  наборов переменных принятия решений, где  $Y$  — размер популяции, и эта популяция обозначается  $P$ .

*Шаг 3.* Вычисление значений фитнес-функции каждой особи в популяции  $P$ . Они могут быть рассчитаны в соответствии с операционной стратегией и целевыми функциями. При этом величина фитнес-функций равна значению целевых функций, умноженному на отрицательный знак.

*Шаг 4.* Определение ранга и расстояния вытеснения каждой особи в популяции  $P$  в соответствии с функцией приспособленности. Процедура выглядит следующим образом:

а) определение ранга каждой особи, используя быструю сортировку без доминирования, и классифицирование популяции на  $v$  групп  $(R_1, \dots, R_v)$ , согласно ранговому значению каждой особи по максимальному ранговому значению  $v$ ;

б) определение расстояния вытеснения каждой особи в  $R_\omega$  ( $1 \leq \omega \leq v$ ).

*Шаг 5.* Завершение операции отбора. На этом этапе из родительской популяции  $P$  выбирается конкретное количество особей для последующих операций кроссингвера и мутации. Отобранные особи помещаются в новую популяцию  $P_1$ . Для отбора особей на основе значения ранга и расстояния вытеснения используется бинарное первенство.

*Шаг 6.* Выполнение операций кроссингвера и мутации. Используя популяцию  $P_1$ , выполняются операции кроссингвера и мутации путем имитации бинарного кроссингвера и мутации для получения новой популяции  $P_2$ . После этого рассчитывается фитнес-функция каждой особи в популяции  $P_2$ .

*Шаг 7.* Определить ранг и расстояние вытеснения каждой особи в популяции  $\{P, P_2\}$  в соответствии с функцией приспособленности.

*Шаг 8.* Получение новой популяции из популяции  $\{P, P_2\}$ , согласно ранговому значению и расстоянию вытеснения.

*Шаг 9.* Завершение операции. Если максимальная генерация операции удовлетворена, то операция завершается. В противном случае следует вернуться к шагу 5 и перейти к процедуре поиска. Как только NSGA-II завершит обработку, приближенный фронт Парето многоцелевого пространства будет сформирован недоминируемыми решениями финальной популяции.

#### 4. Функция критерия оценки и оптимальная стратегия переключения.

Оптимизируем стратегию работы существующей системы ССНР. Цель — использовать все преимущества различных критериев эффективности и улучшить комплексные характеристики системы ССНР. Для этой цели представлена оптимальная стратегия работы с переключением. Каждый из вышеупомянутых трех критериев может использоваться отдельно для определения режима работы системы ССНР. Однако в то же время в соответствии с различными критериями результат выбора режима может быть разным, что вносит путаницу в работу оператора системы. Поэтому необходимо сформулировать критерии оценки (Evaluation Criteria — EC) для получения комплексного и уникального оптимального результата:

$$EC = \omega_1 \frac{PEC^{CCHP}}{PEC^{SP}} + \omega_2 \frac{CDE^{CCHP}}{CDE^{SP}} + \omega_3 \frac{COST^{CCHP}}{COST^{SP}}, \quad (5)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  и  $\omega_3$  — веса соотношений PEC, CDE и COST соответственно. Граничными условиями являются  $0 \leq \omega_1, \omega_2, \omega_3 \leq 1$  и  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ . Эти три веса могут быть назначены для отражения относительной важности каждого подкритерия, и они будут непосредственно влиять на результаты оптимизации. Отметим, что метод равных весов применяется во многих проблемах принятия решений, поскольку Доуз и Корриган [35] утверждали, что этот метод в большинстве случаев может дать результаты почти такие же хорошие, как и методы неравных весов.

Очевидно, что чем ниже EC, тем лучше производительность системы ССНР. Исходя из (5),  $EC_{FEL}$  и  $EC_{FTL}$  могут быть получены для двух типичных режимов работы соответственно:

$$EC_{FEL} = \frac{1}{3} \left( \frac{PEC_{FEL}^{CCHP}}{PEC^{SP}} + \frac{CDE_{FEL}^{CCHP}}{CDE^{SP}} + \frac{COST_{FEL}^{CCHP}}{COST^{SP}} \right), \quad (6)$$

$$EC_{FTL} = \frac{1}{3} \left( \frac{PEC_{FTL}^{CCHP}}{PEC^{SP}} + \frac{CDE_{FTL}^{CCHP}}{CDE^{SP}} + \frac{COST_{FTL}^{CCHP}}{COST^{SP}} \right), \quad (7)$$

где  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$ .

Согласно (6) и (7), предположим оптимальную стратегию переключения в виде следующего алгоритма.

Если  $EC_{FEL} \geq EC_{FTL}$ , тогда выбираем режим FTL. В противном случае выбираем режим FEL. Блок-схема процесса принятия решений по оптимальной стратегии на основе двух режимов работы представлена на рис. 5.

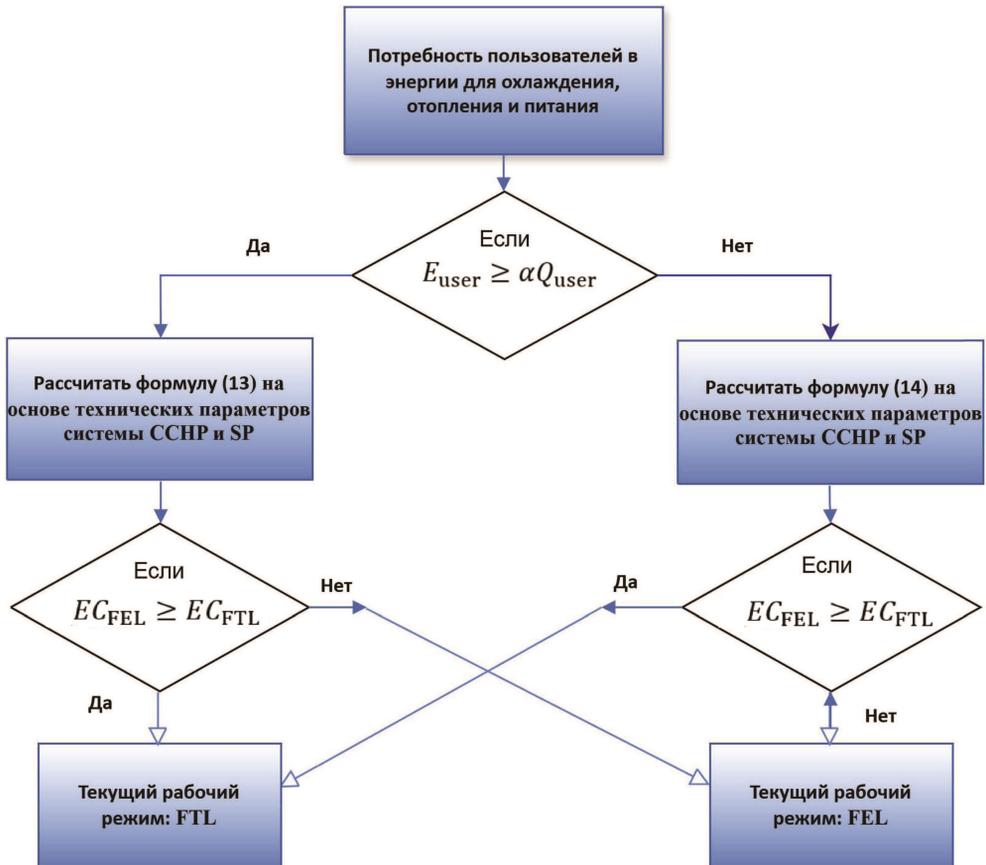


Рис. 5. Блок-схема процесса принятия решений по оптимальной стратегии переключения для системы ССНР на основе двух режимов работы

**Анализ и обсуждение.** Объединив (1) и (2) или (3) и (4), связь между  $E_{pgu}$  и  $Q_r$  в обоих режимах работы можно переписать так:

$$E_{pgu} = \frac{\eta_{pgu}}{\eta_{hrs}(1 - \eta_{pgu})} Q_r = \alpha Q_r, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — отношение мощности к теплу системы ССНР. Согласно (8), электроэнергия  $E_{pgu}$ , вырабатываемая PGU, может быть приближенно определена как линейная

функция рекуперированного тепла  $Q_r$ . Как правило, условием максимальной эффективности системы ССНР является то, что соотношение мощности и тепла запросов на энергию должно быть равно соотношению мощности и тепла системы ССНР (т. е.  $E_{\text{user}} = \alpha Q_{\text{user}}$ ). В этом случае назовем электрические и тепловые запросы системы ССНР сбалансированными или согласованными. Однако такая ситуация возникает редко. Поэтому необходимо проанализировать условия переключения режимов работы и их производительность на основе предложенной стратегии, когда электрические и тепловые требования не совпадают.

*Случай 1:* когда  $E_{\text{user}} = \alpha Q_{\text{user}}$ , тепловой запрос пользователей может быть определен как  $Q_{\text{user}} = Q_{\text{hrc}} + Q_{\text{hrh}} = Q_c / \text{COP}_{\text{ac}} + Q_h / \eta_h$ . Если режим FEL выбран в качестве текущего рабочего режима, будет генерироваться избыточная тепловая энергия; если выбран режим FTL, то недостаточное количество электроэнергии будет обеспечено электросетью. Чтобы сравнить  $\text{EC}_{\text{FEL}}$  с  $\text{EC}_{\text{FTL}}$ , сформулируем следующее соотношение:

$$\text{EC}_{\text{FEL}} - \text{EC}_{\text{FTL}} = \frac{1}{3} \left( \frac{\text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}}}{\text{PEC}^{\text{SP}}} + \frac{\text{CDE}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{CDE}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}}}{\text{CDE}^{\text{SP}}} + \frac{\text{COST}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{COST}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}}}{\text{COST}^{\text{SP}}} \right). \quad (9)$$

Рассчитаем разницу между PEC, CDE и COST по отдельности:

$$\begin{aligned} \text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} &= F_{\text{m-FEL}} k_f - (E_{\text{grid}} k_e + F_{\text{m-FTL}} k_f) = \\ &= E_{\text{grid}} k_e + (F_{\text{pgu-FEL}} + F_{\text{b-FEL}}) k_f = \\ &= (F_{\text{pgu-FEL}} + F_{\text{b-FEL}} - F_{\text{pgu-FTL}}) k_f - E_{\text{grid}} k_e. \end{aligned}$$

В случае, когда  $E_{\text{user}} \geq \alpha Q_{\text{user}}$ , тепловая энергия, предоставляемая системой ССНР, не меньше, чем требуется, и не генерируется избыточная электроэнергия, т. е.  $F_{\text{b-FEL}} = 0$  и  $E_{\text{excess}} = 0$ :

$$\text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = \left( \frac{E_{\text{pgu-FEL}}}{\eta_{\text{pgu}}} - \frac{E_{\text{pgu-FTL}}}{\eta_{\text{pgu}}} \right) k_f - E_{\text{grid}} k_e.$$

Для режима FEL  $E_{\text{pgu-FEL}} = E_{\text{user}}$  находим, что

$$\text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = E_{\text{grid}} \left( \frac{1}{\eta_{\text{pgu}}} k_f - k_e \right). \quad (10)$$

Аналогично для CDE и COST имеем выражения

$$\text{CDE}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{CDE}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = E_{\text{grid}} \left( \frac{1}{\eta_{\text{pgu}}} \mu_f - \mu_e \right), \quad (11)$$

$$\text{COST}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{COST}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = E_{\text{grid}} \left( \frac{C_f + \mu_f C_{\text{ca}}}{\eta_{\text{pgu}}} - C_e \right). \quad (12)$$

Составим формулы (10)–(12) в соотношение (9):

$$\text{EC}_{\text{FEL}} - \text{EC}_{\text{FTL}} = \frac{E_{\text{grid}}}{3} \left( \frac{k_f - \eta_{\text{pgu}} k_e}{\eta_{\text{pgu}} \text{PEC}^{\text{SP}}} + \frac{\mu_f - \eta_{\text{pgu}} \mu_e}{\eta_{\text{pgu}} \text{CDE}^{\text{SP}}} + \frac{C_f + \mu_f C_{\text{ca}} - \eta_{\text{pgu}} C_e}{\eta_{\text{pgu}} \text{COST}^{\text{SP}}} \right). \quad (13)$$

*Случай 2:* когда  $E_{\text{user}} < \alpha Q_{\text{user}}$ , если в качестве текущего режима работы выбран FEL, то для восполнения недостатка тепловой энергии будет запущен вспомогательный котел; если выбран режим FTL, то будет выработан избыток электроэнергии. Разница между  $EC_{\text{FEL}}$  и  $EC_{\text{FTL}}$  также может быть рассчитана по (9). Однако из-за изменения соотношения тепловой и электрической энергий процесс упрощения (9) и результат будут разными. Когда  $E_{\text{user}} < \alpha Q_{\text{user}}$ ,  $F_{\text{b-FEL}} \neq 0$  и  $E_{\text{grid}} = 0$ .

Согласно формулам (2) и (3), получаем, что

$$\text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = \left( \frac{Q_{\text{r-FEL}}}{\eta_{\text{hrs}}(1 - \eta_{\text{pgu}})} + F_{\text{b-FEL}} + \frac{Q_{\text{r-FTL}}}{\eta_{\text{hrs}}(1 - \eta_{\text{pgu}})} \right) k_f.$$

В режиме FTL тепловая энергия, производимая системой ССНР, равна потребности пользователей, т. е.  $Q_{\text{r-FTL}} = Q_{\text{user}} = Q_{\text{hrc}} + Q_{\text{hrh}}$ . Тогда

$$\text{PEC}_{\text{FEL}}^{\text{CCHP}} - \text{PEC}_{\text{FTL}}^{\text{CCHP}} = F_{\text{b-FEL}} \left( 1 - \frac{\eta_{\text{b}}}{\eta_{\text{hrs}}(1 - \eta_{\text{pgu}})} \right) k_f.$$

Аналогично можно вывести и другие части (9):

$$EC_{\text{FEL}} - EC_{\text{FTL}} = \frac{F_{\text{b-FEL}}}{3} \left( 1 - \frac{\eta_{\text{b}}}{\eta_{\text{hrs}}(1 - \eta_{\text{pgu}})} \right) \left( \frac{k_f}{\text{PEC}^{\text{SP}}} + \frac{\mu_f}{\text{CDE}^{\text{SP}}} + \frac{C_f + \mu_f C_{\text{ca}}}{\text{COST}^{\text{SP}}} \right) + \frac{E_{\text{excess}} C_{\text{sell}}}{3\text{COST}^{\text{SP}}}. \quad (14)$$

**5. Заключение.** Интеграция ВИЭ в микросети (в МГц) становится все более важной в последние годы благодаря способности ВИЭ удовлетворять растущие потребности в электроэнергии, снижая при этом воздействие на окружающую среду. Гибридная система ССНР является высокоэффективным и стабильным методом использования энергии. Системы ССНР могут одновременно обеспечивать охлаждение, отопление и электроэнергию, что делает их универсальными и подходящими для различных применений. В работе представлено комплексное изучение проектирования и эксплуатации гибридной системы ССНР, включающей в себя ВИЭ, аккумуляторные системы хранения энергии и многокритериальный подход к оптимизации с использованием генетического алгоритма NSGA-II.

Исследование начинается с описания ключевых проблем, связанных с интеграцией ВИЭ в ССНР, подчеркивая необходимость эффективного управления энергией для преодоления непостоянства и изменчивости ВИЭ. Затем рассматриваются преимущества систем ССНР, подчеркивается их потенциал для повышения энергоэффективности, снижения эксплуатационных расходов и смягчения воздействия на окружающую среду. Определена важность разработки комплексной математической модели для отражения сложных взаимодействий в гибридной системе ССНР с учетом потоков энергии между различными компонентами и применяемых стратегий эксплуатации.

Предлагаемая гибридная система ССНР тщательно продумана и включает в себя такие ключевые элементы как газовая турбина для выработки электроэнергии, фотоэлектрические панели для получения возобновляемой энергии, систему рекуперации тепла, вспомогательный котел, абсорбционный охладитель и тепловой блок для отопления. Система дополнительно оснащена резервуаром для хранения воды и аккумулятором для увеличения емкости и надежности системы. Тщательно проанализированы энергетические принципы каждого компонента с учетом эффективности преобразования энергии, емкости накопителя и эксплуатационных характеристик.

Суть настоящего исследования заключается в разработке и применении стратегии многоцелевой оптимизации для гибридной системы ССНР. Были определены три ключевые целевые функции, подлежащие оптимизации: потребление первичной энергии, годовая общая стоимость и выбросы углекислого газа. Эти цели отражают важнейшие соображения энергоэффективности, экономической целесообразности и экологической устойчивости. Так как принято, что оптимизация всех трех объективных функций одновременно является сложной задачей, был использован алгоритм NSGA-II — надежный и широко распространенный метод многоцелевой оптимизации. Алгоритм эффективно исследует границу Парето, определяя набор решений без доминирования, которые представляют собой оптимальный компромисс между тремя целями. Были описаны основные этапы работы алгоритма NSGA-II, включая инициализацию популяции, оценку пригодности, выбор родителей, кроссинговер, мутацию и критерии сходимости.

Для облегчения принятия практических решений разработана оптимальная стратегия переключения для гибридной системы ССНР, основанная на двух режимах работы: следование электрической нагрузке и следование тепловой нагрузке. Стратегия направлена на динамическое переключение между этими режимами в зависимости от спроса на энергию в реальном времени, обеспечивающее оптимальное использование возможностей системы и минимизацию эксплуатационных затрат.

Предлагаемая стратегия переключения включает в себя комплексную функцию оценки, которая объединяет цели PЕC, CDE и АТС. Функция ЕС присваивает веса каждой цели, что позволяет применять индивидуальный подход, основанный на конкретных приоритетах. Представлен четкий и подробный алгоритм расчета ЕС для обоих режимов работы и определения оптимальной точки переключения на основе сравнения значений ЕС. Алгоритм также учитывает такие факторы как наличие избыточной электроэнергии, потребность в дополнительном тепле и потенциал для хранения энергии.

Исследование завершается всесторонним анализом эффективности гибридной системы ССНР при различных сценариях эксплуатации. С помощью моделирования и расчетов продемонстрирована эффективность описанной стратегии проектирования и эксплуатации для достижения значительных улучшений в области энергоэффективности, экономической целесообразности и экологической устойчивости. Полученные результаты подчеркивают потенциал гибридной системы ССНР для решения критических проблем, связанных с интеграцией ВИЭ в ССНР, обеспечивающей при этом надежное и экономически эффективное энергоснабжение.

Предложены ценные идеи и даны рекомендации в области проектирования и эксплуатации системы ССНР. Подчеркнута необходимость дальнейшего изучения вопроса интеграции других ВИЭ, таких как энергия ветра и геотермальная энергия, в гибридную систему ССНР. Для дальнейшего повышения эффективности систем ССНР рекомендуется рассмотреть передовые стратегии управления энергией, например реагирование на спрос и оптимизация хранения энергии.

Тщательный анализ, практические рекомендации и инновационный подход исследования делают его значительным вкладом в развитие интеграции ВИЭ управления энергопотреблением в современных энергосистемах.

## Литература

1. Kim T. H., Shin H., Kim W. A parallel multi-period optimal scheduling algorithm in microgrids with energy storage systems using decomposed inter-temporal constraints // Energy. 2020. Vol. 202. N 1. Art. N 117669.

2. *Hemmati M., Ivatloo B.* Day-ahead profit-based reconfigurable microgrid scheduling considering uncertain renewable generation and load demand in the presence of energy storage // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 28. Art. N 101161.
3. *Naderi E., Shayeghi H.* Sustainable energy scheduling of grid-connected microgrid using Monte Carlo estimation and considering main grid penetration level // *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*. 2020. Vol. 12. N 1. P. 10–19.
4. *Hasankhani A., Hakimi S. M.* Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market // *Energy*. 2021. Vol. 219. Art. N 119668.
5. *Lekvan A. A., Habibfar R., Jermstipareset K.* Robust optimization of renewable-based multi-energy microgrid integrated with flexible energy conversion and storage devices // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 64. Art. N 102532.
6. *Fumo N., Mago P. J., Chamra L. M.* Analysis of cooling, heating, and power systems based on site energy consumption // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. P. 928–932.
7. *Ghaebi H., Yari M., Gargari S. G., Rostamzadeh H.* Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 130. P. 87–102.
8. *Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F.* Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87. P. 1325–1335.
9. *Kerr T.* Combined heat and power: Evaluating the benefits of greater global investment. IEA (International Energy Agency). 2008. URL: [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/5/5a/IEA\\_Combined\\_Heat\\_and\\_Power\\_2008.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/5/5a/IEA_Combined_Heat_and_Power_2008.pdf) (дата обращения: 30 сентября 2024 г.).
10. *Zhang J., Cao S., Yu L., Zhou Y.* Comparison of combined cooling, heating and power (CCHP) systems with different cooling modes based on energetic, environmental and economic criteria // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 160. P. 60–73.
11. *Cho H., Mago P. J., Luck R., Chamra L. M.* Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. P. 2540–2549.
12. *Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhai Z. J.* Performance comparison of combined cooling, heating and power system in different operation modes // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Art. N 462131.
13. *Mago P. J., Hueffed A. K.* Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies // *Energy Build.* 2010. Vol. 42. P. 1628–1636.
14. *Smith A., Luck R., Mago P. J.* Analysis of a combined cooling, heating and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty // *Energy Build.* 2010. Vol. 42. P. 2231–2240.
15. *Jing Y. Y., Bai H., Wang J. J., Liu L.* Life cycle assessment of a solar combined cooling, heating and power system in different operation strategies // *Applied Energy*. 2012. Vol. 92. Art. N 84353.
16. *Afzali S. F., Mahalec V.* Optimal design, operation and analytical criteria for determining optimal operating modes of a CCHP with fired HRSG, boiler, electric chiller and absorption chiller // *Energy*. 2017. Vol. 139. P. 1052–1065.
17. *Wang J., Yang Y., Mao T., Sui J., Jin H.* Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system // *Applied Energy*. 2015. Vol. 146. P. 38–52.
18. *Wang J., Zhai Z. J., Jing Y., Zhang C.* Particle swarm optimization for redundant building cooling, heating and power system // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87. P. 3668–3679.
19. *Hajabdollahi H., Ganjehkaviri A., Jaafar M. N. M.* Assessment of new operational strategy in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 75. P. 468–480.
20. *Li M., Mu H., Li N.* Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP (combined cooling, heating and power) system // *Energy*. 2016. Vol. 99. P. 202–220.
21. *Mohammadkhani N., Sedighzadeh M., Esmaili M.* Energy and emission management of CCHPs with electric and thermal energy storage and electric vehicle // *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2018. Vol. 8. P. 494–508.
22. *Khaloie H., Abdollahi A., Shafie-Khah M., Siano P., Nojavan S., Anvari-Moghaddam A., Catalao J. P. S.* Co-optimized bidding strategy of an integrated wind-thermal-photovoltaic system in deregulated electricity market under uncertainties // *Journal of Clean Production*. 2020. Vol. 242. Art. N 118434.
23. *Khaloie H., Abdollahi A., Shafie-Khah M., Siano P., Nojavan S., Anvari-Moghaddam A., Catalao J. P. S.* Coordinated wind-thermal-energy storage offering strategy in energy and spinning reserve markets using a multi-stage model // *Applied Energy*. 2020. Vol. 259. Art. N 114168.
24. *Jing R., Wang M., Wang W., Brandon N., Li N., Chen J., Zhao Y.* Economic and environmental multi-optimal design and dispatch of solid oxide fuel cell based CCHP system // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 154. P. 365–379.

25. Cao Y., Wang Q., Du J., Nojavan S., Jermisittiparsert K., Ghadimi N. Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019. Vol. 20. Art. N 100274.
26. Hou J., Wang J., Zhou Y., Lu X. Distributed energy systems: Multi-objective optimization and evaluation under different operational strategies // *Journal of Clean Production*. 2020. Art. N 124050.
27. Gao L., Hwang Y., Cao T. An overview of optimization technologies applied in combined cooling, heating and power systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 114. Art. N 109344.
28. Abbasi M. H., Sayyaadi H., Tahmasbzadebaie M. A methodology to obtain the foremost type and optimal size of the prime mover of a CCHP system for a large-scale residential application // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 135. P. 389–405.
29. Yan Y., Zhang C., Li K., Wang Z. An integrated design for hybrid combined cooling, heating and power system with compressed air energy storage // *Applied Energy*. 2018. Vol. 210. P. 1151–1166.
30. Chen X., Zhou H., Li W., Yu Zh., Gong G., Yan Y., Luo L., Wan Zh., Ding Y. Multi-criteria assessment and optimization study on 5 kW PEMFC based residential CCHP system // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 160. P. 384–395.
31. Song Z., Liu T., Lin Q. Multi-objective optimization of a solar hybrid CCHP system based on different operation modes // *Energy*. 2020. Vol. 206. Art. N 118125.
32. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II // *IEEE Transaction of Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6. P. 182–197.
33. Ren F., Wei Z., Zhai X. Multi-objective optimization and evaluation of hybrid CCHP systems for different building types // *Energy*. 2021. Vol. 215. Pt A. Art. N 119096.
34. Konak A., Coit D. W., Smith A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial // *Reliability Engineering and System Safety*. 2006. Vol. 91. P. 992–1007.
35. Dawes R., Corrigan B. Linear models in decision making // *Psychological Bulletin*. 1974. Vol. 81. N 2. P. 95–106.

Статья поступила в редакцию 18 августа 2024 г.

Статья принята к печати 4 октября 2024 г.

Контактная информация:

Яхья Мазен Абдо Касем — аспирант; st103069@student.spbu.ru, mazenyahya1994@gmail.com

Головкина Анна Геннадьевна — канд. физ.-мат. наук, доц.; a.golovkina@spbu.ru

## Mathematical modeling and optimal control of energy management in microgrids with combined heat and power\*

M. A. Q. Yahya, A. G. Golovkina

St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Yahya M. A. Q., Golovkina A. G. Mathematical modeling and optimal control of energy management in microgrids with combined heat and power. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2024, vol. 20, iss. 4, pp. 446–466. <https://doi.org/10.21638/spbu10.2024.402> (In Russian)

The production and integration of renewable energy sources into microgrid systems have recently demonstrated significant growth due to their ability to meet growing electricity needs while having minimal impact on environmental pollution. Combined cooling, heating, and power (CCHP) systems, also known as trigeneration systems, are the most efficient and stable way to use energy, which has a wide range of applications. However, to increase energy efficiency and reduce overall operating costs of such systems, the development of a mathematical model and optimal control model for CCHP is required. This paper presents a review of known mathematical models and optimal control models that ensure cost reduction while

---

\* This research was partly supported by Saint Petersburg State University, project ID N 95438429.

meeting electricity, heating, and cooling needs. The problem of joint optimization of several efficiency criteria: electricity consumption from the grid, annual total costs, and carbon dioxide emissions is considered. The characteristics of CCHP systems obtained taking into account different exploitation strategies are compared with separate cooling, heating, and power systems.

*Keywords:* combined cooling, heating and power systems, power generation unit, separated production, multi-objective optimization, evaluation criteria, following electrical load, following thermal load.

## References

1. Kim T. H., Shin H., Kim W. A parallel multi-period optimal scheduling algorithm in microgrids with energy storage systems using decomposed inter-temporal constraints. *Energy*, 2020, vol. 202, no. 1, art. no. 117669.
2. Hemmati M., Ivatloo B. Day-ahead profit-based reconfigurable microgrid scheduling considering uncertain renewable generation and load demand in the presence of energy storage. *Journal of Energy Storage*, 2020, vol. 28, art. no. 101161.
3. Naderi E., Shayeghi H. Sustainable energy scheduling of grid-connected microgrid using Monte Carlo estimation and considering main grid penetration level. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 10–19.
4. Hasankhani A., Hakimi S. M. Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market. *Energy*, 2021, vol. 219, art. no. 119668.
5. Lekvan A. A., Habibfar R., Jermisittipareset K. Robust optimization of renewable-based multi-energy microgrid integrated with flexible energy conversion and storage devices. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 64, art. no. 102532.
6. Fumo N., Mago P. J., Chamra L. M. Analysis of cooling, heating, and power systems based on site energy consumption. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 928–932.
7. Ghaebi H., Yari M., Gargari S. G., Rostamzadeh H. Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen. *Renewable Energy*, 2019, vol. 130, pp. 87–102.
8. Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 1325–1335.
9. Kerr T. *Combined heat and power: Evaluating the benefits of greater global investment*. IEA, International Energy Agency, 2008. Available at: [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/5/5a/IEA\\_Combined\\_Heat\\_and\\_Power\\_2008.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/5/5a/IEA_Combined_Heat_and_Power_2008.pdf) (accessed: September 30, 2024).
10. Zhang J., Cao S., Yu L., Zhou Y. Comparison of combined cooling, heating and power (CCHP) systems with different cooling modes based on energetic, environmental and economic criteria. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 160, pp. 60–73.
11. Cho H., Mago P. J., Luck R., Chamra L. M. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 2540–2549.
12. Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhai Z. J. Performance comparison of combined cooling, heating and power system in different operation modes. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, art. no. 462131.
13. Mago P. J., Hueffed A. K. Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies. *Energy Build*, 2010, vol. 42, pp. 1628–1636.
14. Smith A., Luck R., Mago P. J. Analysis of a combined cooling, heating and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty. *Energy Build*, 2010, vol. 42, pp. 2231–2240.
15. Jing Y. Y., Bai H., Wang J. J., Liu L. Life cycle assessment of a solar combined cooling, heating and power system in different operation strategies. *Applied Energy*, 2012, vol. 92, art. no. 84353.
16. Afzali S. F., Mahalec V. Optimal design, operation and analytical criteria for determining optimal operating modes of a CCHP with fired HRSG, boiler, electric chiller and absorption chiller. *Energy*, 2017, vol. 139, pp. 1052–1065.
17. Wang J., Yang Y., Mao T., Sui J., Jin H. Life cycle assessment (LCA) optimization of solarassisted hybrid CCHP system. *Applied Energy*, 2015, vol. 146, pp. 38–52.
18. Wang J., Zhai Z. J., Jing Y., Zhang C. Particle swarm optimization for redundant building cooling, heating and power system. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 3668–3679.
19. Hajabdollahi H., Ganjehkaviri A., Jaafar M. N. M. Assessment of new operational strategy

in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 75, pp. 468–480.

20. Li M., Mu H., Li N. Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP (combined cooling, heating and power) system. *Energy*, 2016, vol. 99, pp. 202–220.

21. Mohammadhani N., Sedighzadeh M., Esmaili M. Energy and emission management of CCHPs with electric and thermal energy storage and electric vehicle. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2018, vol. 8, pp. 494–508.

22. Khaloie H., Abdollahi A., Shafie-Khah M., Siano P., Nojavan S., Anvari-Moghaddam A., Catalao J. P. S. Co-optimized bidding strategy of an integrated wind-thermal-photovoltaic system in deregulated electricity market under uncertainties. *Journal of Clean Production*, 2020, vol. 242, art. no. 118434.

23. Khaloie H., Abdollahi A., Shafie-Khah M., Siano P., Nojavan S., Anvari-Moghaddam A., Catalao J. P. S. Coordinated wind-thermal-energy storage offering strategy in energy and spinning reserve markets using a multi-stage model. *Applied Energy*, 2020, vol. 259, art. no. 114168.

24. Jing R., Wang M., Wang W., Brandon N., Li N., Chen J., Zhao Y. Economic and environmental multi-optimal design and dispatch of solid oxide fuel cell based CCHP system. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 154, pp. 365–379.

25. Cao Y., Wang Q., Du J., Nojavan S., Jermsttiparsert K., Ghadimi N. Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2019, vol. 20, art. no. 100274.

26. Hou J., Wang J., Zhou Y., Lu X. Distributed energy systems: Multi-objective optimization and evaluation under different operational strategies. *Journal of Clean Production*, 2020, art. no. 124050.

27. Gao L., Hwang Y., Cao T. An overview of optimization technologies applied in combined cooling, heating and power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 114, art. no. 109344.

28. Abbasi M. H., Sayyaadi H., Tahmasbzadebaie M. A methodology to obtain the foremost type and optimal size of the prime mover of a CCHP system for a large-scale residential application. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 135, pp. 389–405.

29. Yan Y., Zhang C., Li K., Wang Z. An integrated design for hybrid combined cooling, heating and power system with compressed air energy storage. *Applied Energy*, 2018, vol. 210, pp. 1151–1166.

30. Chen X., Zhou H., Li W., Yu Zh., Gong G., Yan Y., Luo L., Wan Zh., Ding Y. Multi-criteria assessment and optimization study on 5 kW PEMFC based residential CCHP system. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 160, pp. 384–395.

31. Song Z., Liu T., Lin Q. Multi-objective optimization of a solar hybrid CCHP system based on different operation modes. *Energy*, 2020, vol. 206, art. no. 118125.

32. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transaction of Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, pp. 182–197.

33. Ren F., Wei Z., Zhai X. Multi-objective optimization and evaluation of hybrid CCHP systems for different building types. *Energy*, 2021, vol. 215, pt A, art. no. 119096.

34. Konak A., Coit D. W., Smith A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, vol. 91, pp. 992–1007.

35. Dawes R., Corrigan B. Linear models in decision making. *Psychological Bulletin*, 1974, vol. 81, no. 2, pp. 95–106.

Received: August 18, 2024.

Accepted: October 4, 2024.

#### Authors' information:

Mazen A. Q. Yahya — Postgraduate Student; st103069@student.spbu.ru, mazenyahya1994@gmail.com

Anna G. Golovkina — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; a.golovkina@spbu.ru