

УДК 620.9

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ЦИКЛА БРАЙТОНА

Федорук Софья Сергеевна,

Магистрант кафедры Теплосиловых установок и тепловых двигателей,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и
дизайна. Высшая школа технологии и энергетики
город Санкт-Петербург
fedoruksofia5@gmail.com

Кашеев Кирилл Олегович,

Магистрант кафедры Теплосиловых установок и тепловых двигателей,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и
дизайна. Высшая школа технологии и энергетики
город Санкт-Петербург
k.o.kascheev@rambler.ru

Ширяев Александр Дмитриевич,

Ассистент кафедры Теплосиловых установок и тепловых двигателей,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и
дизайна. Высшая школа технологии и энергетики
город Санкт-Петербург
a.d.shiryaev@rambler.ru

Аннотация

В статье представлена методика оценки энергетической эффективности гибридных энергоустановок, интегрирующих солнечную энергию и цикл Брайтона. Рассмотрены основные принципы построения таких установок, а также факторы, влияющие на их эффективность. Предложена модель, позволяющая рассчитывать энергетические характеристики гибридной энергоустановки с учетом различных параметров.

Ключевые слова: гибридная энергоустановка, цикл Брайтона, мини-ТЭС, солнечная энергия, газотурбинная установка, гибридизация.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF HYBRID POWER PLANTS BASED ON SOLAR ENERGY AND THE BRAYTON CYCLE

Fedoruk Sofia Sergeevna,

Master's student at the Department of Heat Power Installations and Heat Engines,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

Higher School of Technology and Energy
the city of Saint Petersburg
fedoruksofia5@gmail.com

Kashcheev Kirill Olegovich,

Master's student at the Department of Heat Power Installations and Heat Engines,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
Higher School of Technology and Energy
the city of Saint Petersburg
k.o.kascheev@rambler.ru

Shiryaev Alexander Dmitrievich,

Assistant of the Department of Heat Power Installations and Heat Engines,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
Higher School of Technology and Energy
the city of Saint Petersburg
a.d.shiryaev@rambler.ru

ABSTRACT

The article presents a methodology for assessing the energy efficiency of hybrid power plants integrating solar energy and the Brighton cycle. The basic principles of building such installations, as well as the factors influencing their effectiveness, are considered. A model is proposed that makes it possible to calculate the energy characteristics of a hybrid power plant, taking into account various parameters.

Keywords: hybrid power plant, Brighton cycle, mini-thermal power plant, solar energy, gas turbine plant, hybridization.

В современной энергетике России есть тенденция развития гибридных технологий, сочетающих традиционные и возобновляемые источники энергии. Одним из перспективных направлений является интеграция солнечной энергии в цикл газотурбинных установок (ГТУ), работающих по циклу Брайтона [1]. Такие системы позволяют существенно повысить эффективность электростанций.

Газотурбинные установки широко применяются в различных отраслях России благодаря своим преимуществам, например: блочно-комплектной поставке, полной автоматизации всех узлов системы, большому спектру мощности и сравнительно короткому сроку ввода в эксплуатацию. Однако для достижения максимальной производительности и эффективности ГТУ необходимо либо повышать эффективность работы турбины, либо компрессора. На сегодняшний день политропный коэффициент полезного действия компрессоров достигает 0,91% [2], поэтому основное внимание уделяется повышению температуры газов на входе в турбину, что увеличивает её мощность.

Основным ограничением при повышении температуры газов перед турбиной является жаропрочность материалов, из которых изготовлены лопатки. Для решения этой проблемы разработаны различные системы охлаждения проточной части газовой турбины. Принцип работы этих систем заключается в том, что часть воздуха из компрессора

направляется в охлаждающие каналы лопаток, где он нагревается, выводится в проточную часть и смешивается с основным потоком газа, участвуя в совершении полезной работы в следующих отсеках турбины [3].

Однако использование систем охлаждения приводит к дополнительным потерям работоспособности и снижению термической эффективности ГТУ. В связи с этим особую актуальность приобретает внедрение низкоуглеродистых источников тепловой энергии, таких как системы концентрации солнечной энергии. Эти системы способны передавать тепловую энергию при высоких температурах, необходимых для ГТУ.

Существует несколько вариантов гибридации технологических схем мини-ТЭС, объединяющих энергию Солнца и цикл Брайтона. Одним из наиболее перспективных решений является последовательная структура гибридации, которая представлена на рисунке 1 [4], где солнечный источник энергии и камера сгорания ГТУ могут работать при максимальных температурах. При такой компоновке температура на входе в газовую турбину будет такой же, как и на выходе из камеры сгорания, что позволяет вводить большие проценты солнечной тепловой энергии в цикл без влияния на производительность и эффективность турбины.

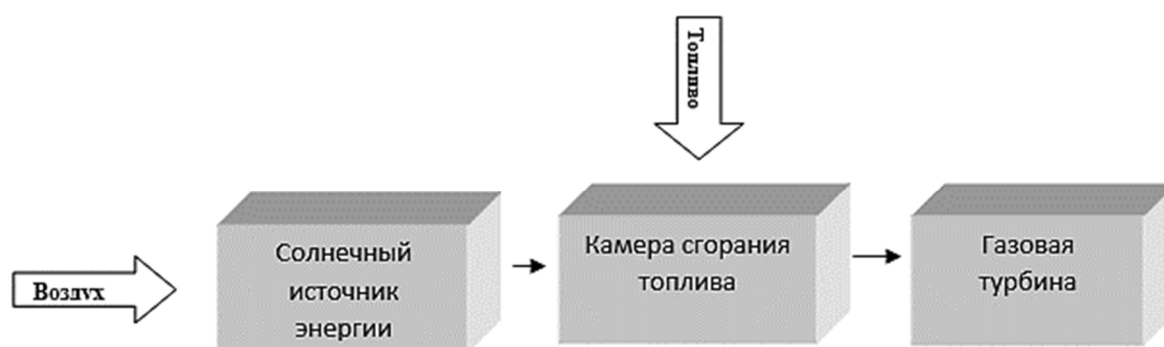


Рисунок 1. Схема с последовательной гибридизацией

Для расчета основных показателей гибридной мини-ТЭС с солнечным воздушнонагревателем используется специальная методика. Процесс начинается с определения энергии, затрачиваемой на сжатие воздуха в компрессоре, которая выражается формулой:

$$m_1 h_1 + E_1 = m_2 h_2,$$

где m_1 и m_2 – расход воздуха на входе и выходе компрессора, кг/с;

h_1 и h_2 – энтальпия воздуха на входе и выходе компрессора, кДж/кг;

E_1 – энергия, затрачиваемая на сжатие воздуха, кВт.

Необходимый процент воздуха, прошедшего процесс сжатия в компрессорной установке, поступает в солнечный воздушнонагреватель, где происходит его подогрев за счет солнечной тепловой энергии. Тепловой баланс нагревателя воздуха описывается зависимостью:

$$m_{21} h_2 + Q_2 = m_{21} h_3,$$

где m_{21} – расход воздуха на входе в солнечный воздушнонагреватель и на выходе из него, кг/с;

h_3 – энтальпия воздуха на выходе из воздушнонагревателя, кДж/кг;

Q_2 – мощность солнечного излучения, затраченная на нагрев воздуха m_{21} , кВт.

Для определения величины Q_2 используется формула тепловой мощности солнечного приемника:

$$Q_{\text{сол}} = Q_2 + Q_{\text{п}} = A_r \alpha_r I_r = A_r \alpha_r \eta_{\text{opt}} C R_g I_b,$$

где $C R_g = A_a / A_r$ – коэффициент концентрации;

A_a – площадь апертуры коллектора;

A_r – площадь поверхности приемника;

α_r – поглощающая способность поверхности;

η_{opt} – оптическая эффективность системы концентрации;

I_b – интенсивность излучения.

Потери рассчитываются по формуле:

$$Q_{\text{п}} = A_r \varepsilon_r (T_r^4 - T_a^4) + U_{\text{п}} (T_r - T_a),$$

где ε_r – излучающая способность приемника;

T_r – температура приемника;

T_a – температура окружающей среды;

$U_{\text{п}}$ – общий коэффициент конвекции.

Эффективность приемника и коллектора определяется формулой:

$$\eta_r = \frac{Q_2}{A_a I_a} = \eta_{opt} \alpha - \frac{\varepsilon_r \sigma (T_r^4 - T_a^4) - U_{los} (T_r - T_a)}{C R_g I_b}.$$

Воздух, прошедший процедуру дополнительного нагрева с помощью солнечного излучения, а также воздух, который идет из компрессора, проходит через смесительное устройство перед камерой сгорания. Энтальпия смеси двух потоков воздуха находится из уравнения теплового баланса смесительного устройства:

$$m_2 h_4 = m_{21} h_3 + m_{22} h_2,$$

где m_{22} – расход оставшегося воздуха, выходящего из компрессора, кг/с;

h_4 – энтальпия воздушной смеси, кДж/кг;

m_4 – расход воздушной смеси, кг/с.

Значения m_{21} и m_{22} связаны соотношением:

$$m_{21} = \varphi m_2; m_{22} = (1 - \varphi) m_2,$$

где φ – процент воздуха, направленный в воздухонагреватель.

Тепловой баланс камеры сгорания определяется зависимостью:

$$m_2 h_4 + m_F Q_L^W = m_{31} h_{31} + m_{32} h_{32} + m_{33} h_{33} + m_{34} h_{34} = \sum m_i h_i,$$

где m_F – расход топлива, кг/с;

h_{31} – энтальпия CO₂ на выходе из камеры сгорания, кДж/кг;

h_{32} – энтальпия N₂ на выходе из камеры сгорания, кДж/кг;

h_{33} – энтальпия H₂O на выходе из камеры сгорания, кДж/кг;

h_{34} – энтальпия избыточного воздуха на выходе из камеры сгорания, кДж/кг;

m_{31} , m_{32} и m_{33} – расходы продуктов сгорания топлива – CO₂, H₂O и N₂ соответственно, кг/с;

Q_L^W – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Работа газовой турбины находится из зависимости (рисунок 2) [5]:

$$m_{31} h_{31} + m_{32} h_{32} + m_{33} h_{33} + m_{34} h_{34} = E_1 + E_3 + m_{31} h_{311} + m_{32} h_{321} + m_{33} h_{331} + m_{34} h_{341},$$

где m_{341} – массовый расход воздуха после турбины, кг/с;

h_{311} – энтальпия CO₂ на выходе из турбины, кДж/кг;

h_{321} – энтальпия N₂ на выходе из турбины, кДж/кг;

h_{331} – энтальпия H₂O на выходе из турбины, кДж/кг;

h_{341} – энтальпия воздуха на выходе из турбины, кДж/кг;

E_3 – полезная мощность, вырабатываемая турбиной, кДж/с.

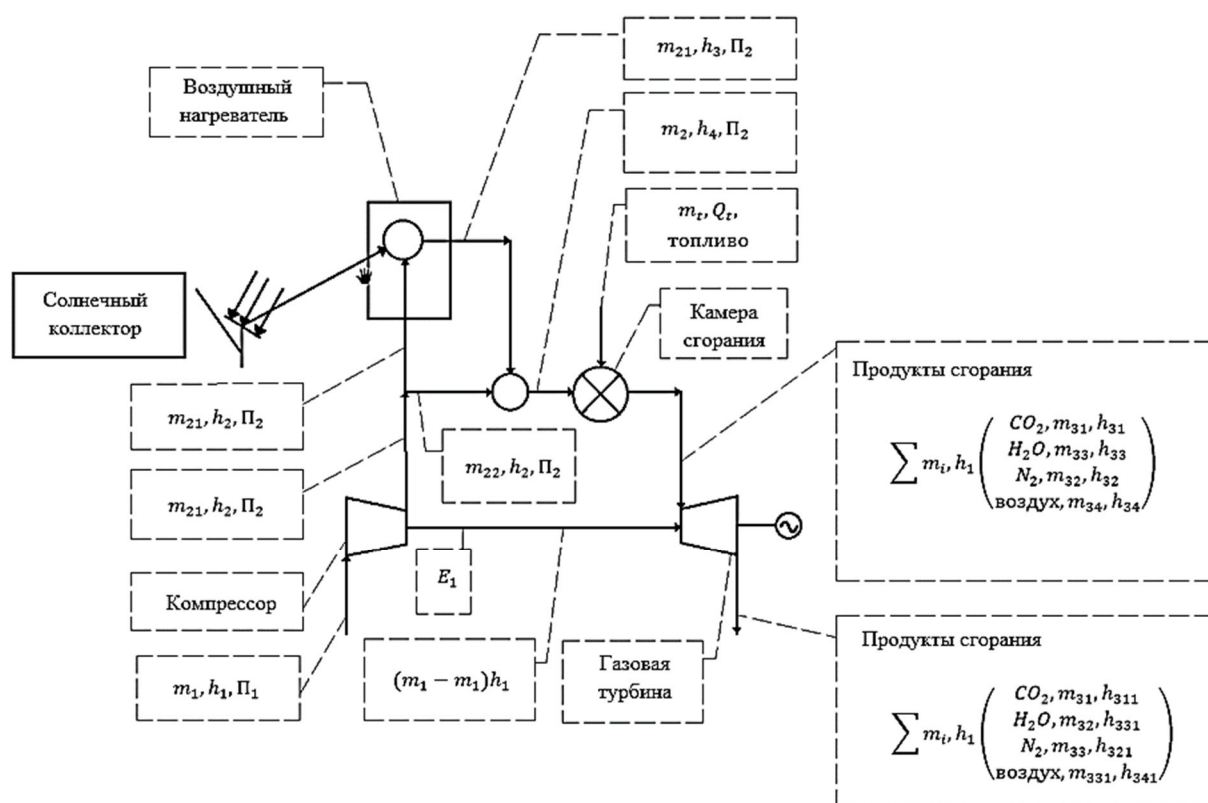


Рисунок 2. Тепловой баланс гибридной мини-ТЭС с солнечным воздушнонагревателем

При проведении расчетов было установлено, что расход топлива в схеме с гибридизацией снизился на 12,6%, а КПД установки был повышен на 4%. Это подтверждает эффективность применения гибридных солнечно-газотурбинных установок в условиях России, особенно в регионах с достаточным уровнем солнечной активности. При этом важно учитывать изменчивый характер солнечной энергии, что может влиять на стабильность работы электростанции и требовать использования резервных источников энергии во время периодов недостаточной солнечной активности [6].

Таким образом, разработанная методика расчета позволяет оценить эффективность гибридных энергоустановок на основе солнечной энергии и цикла Брайтона, учитывая все ключевые параметры и факторы, влияющие на их работу.

Список литературы:

1. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. Оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2019. Том 21. № 1-2. С. 43-54.
2. Злобин В.Г., Верхоланцев А.А. Газотурбинные установки. Часть 1. Тепловые схемы. Термодинамические циклы: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2020. - 114 с.
3. Барановский, В. В. Судовая парогазовая энергетическая установка полузамкнутого цикла для покрытия пиковых нагрузок / В. В. Барановский, М. С. Липатов // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2021. - № 2. - С. 21-25. - DOI 10.18635/2071-2219-2021-2-21-25. - EDN BGZFBC.
4. Запорощенко, У. А. Оценка экономической целесообразности электроснабжения малого предприятия от собственного энергетического объекта / У. А. Запорощенко,

А. Д. Ширяев // International Journal of Professional Science. – 2024. – № 5-2. – С. 14-23. – EDN GFIEOQ.

5. Моделирование технологических схем мини-ТЭС / О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева. - М.: Издательский дом МЭИ, 2014. - 220 с.
6. Ширяев, А. Д. Сезонное накопление энергии: анализ и перспективы / А. Д. Ширяев // International Journal of Professional Science. – 2023. – № 7. – С. 90-97. – EDN KOOIGK.

References:

1. Elmokhlavi A.E., Ochakov V.F., Kazanjan B.I. Evaluation of productivity and energy efficiency of the integrated solar combined cycle of a power plant / Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problems of energy, 2019. Volume 21. No. 1-2. pp. 43-54.
2. Zlobin V.G., Verkholtantsev A.A. Gas turbine installations. Part 1. Thermal schemes. Thermodynamic cycles: a textbook / HSE SPbGUPTD. - St. Petersburg, 2020. 114 p.
3. Baranovsky V. V., Lipatov M. S. Marine combined-cycle combined-cycle power plant for peak load coverage // Energy security and energy conservation. – 2021. – No. 2. – pp. 21-25. – DOI 10.18635/2071-2219-2021-2-21-25. – EDN BGZFBC.
4. Zamoroshchenko, U. A. Assessment of the economic feasibility of supplying electricity to a small enterprise from its own energy facility / U. A. Zamoroshchenko, A.D. Shiryaev // International Journal of Professional Science. – 2024. – № 5-2. – pp. 14-23. – EDN GFIEOQ.
5. Modeling of technological schemes of mini-thermal power plants / O.V. Afanasyeva, G.R. Mingaleeva. - M.: Publishing house MEI, 2014. - 220 p.
6. Shiryaev, A.D. Seasonal energy storage: analysis and prospects / A.D. Shiryaev // International Journal of Professional Science. – 2023. – No. 7. – pp. 90-97. – EDN KOOIGK.