



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЦИКЛОМ

Ахмед З¹. Абасс, Д.А. Павлюченко², В.М. Лесс³

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-1836-3435>, theking.amir@mail.ru

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, pavlyuchenko@corp.nstu.ru

ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Для создания гибридной электростанции, работающей от солнечных коллекторов и газотурбинной установки (ISCC), должны быть доступны несколько важных элементов. Для принятия принципиального решения о строительстве гибридной электростанции и определения ее оптимального места расположения требуется анализ множества факторов в Ираке. Ирак – это регион, богатый солнечной энергией. Солнечный энергетический потенциал с площади в 437072 км² превосходит нынешнюю потребность в электроэнергии в сотни тысяч раз. Это поможет Ираку остаться экспортером энергии в будущем, сменив ископаемое топливо на солнечную энергию. МЕТОДЫ. Был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения подобных гибридных станций с комбинированным циклом. Это обуславливает актуальность исследований в данной области, а именно разработки многофакторной математической модели поиска оптимального расположения ISCC с использованием метода парных сравнений с помощью программы MATLAB. Эльбасра характеризуется как существенно большим уровнем электропотребления региона, так и более развитой инфраструктурой. Это, в целом, и предопределяет наибольший итоговый рейтинг среди всех провинций Ирака как оптимальный регион для использования предложенной математической модели. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данная математическая модель может использоваться при дальнейшей локализации решения задачи, например при рассмотрении наилучших условий для строительства гибридной электростанции уже в пределах провинции и т.д.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, гибридная электростанция, метод парных сравнений, рейтинг.

Для цитирования: Ахмед З. Абасс, Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL PLACEMENT OF A HYBRID POWER PLANT WITH A COMBINED CYCLE

Ahmed Z. Abass¹, D.A Pavlyuchenko², V.M. Less³

^{1,2,3}Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-1836-3435>, theking.amir@mail.ru

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, pavlyuchenko@corp.nstu.ru

ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Abstract: PURPOSE. Purpose of the Work - To build a hybrid solar power plant and a gas turbine plant (ISCC), several important elements must be available. Making a decision in principle to build a hybrid power plant and determining its optimal location requires an analysis of many factors in Iraq. Iraq is a region rich in solar energy. Solar energy potential from an area of 437,072 km² exceeds the current demand for electricity by hundreds of thousands of times. This will help Iraq to remain an energy exporter in the future by switching from fossil fuels to solar energy. METHOD- Determines the relevance of research in this area, namely the development of

a multivariate mathematical model for finding the optimal location of a ISCC using the method of paired comparisons using the MATLAB program. RESULTS - Province Albasra is characterized by a significantly higher level of electricity consumption in the region, as well as a more developed infrastructure. This, in general, predetermines the highest final rating among all the provinces of Iraq as the optimal region for the location of a ISCC. CONCLUSION- Using the proposed mathematical model, a rating was calculated and a comparison was made of the provinces of Iraq to determine the best region for placing such ISCC. This mathematical model can be used for further localization of the solution to the problem, for example, when considering the best conditions for the construction of a hybrid power plant already within a province, etc.

Keywords: *renewable energy sources, solar energy, hybrid power plant, paired comparison method, rating.*

For citation: Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Less V.M. Mathematical model of optimal placement of a hybrid power plant with a combined cycle. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.

Введение

Обеспечение электроэнергией населения и промышленности было одной из основных проблем Ирака еще с 1990-х годов. Перерывы в электроснабжении тормозят повседневную общественную жизнь, наносят существенный урон в сфере здравоохранения, тем самым заставляя граждан искать альтернативные способы энергоснабжения, например такие, как портативные генераторы, которых в стране насчитывается уже около 4-х миллионов. Чрезмерное использование генераторов вредит окружающей среде (посредством выброса загрязняющих атмосферу газов), экономике; заставляет иракцев приобретать большое количество ископаемого топлива, что вредит общему благосостоянию населения страны и ведет к истощению природных ресурсов. Одним из основных и наиболее перспективных глобальных трендов является инвестиция в возобновляемую энергетику, в частности солнечную [1-5]. Республика Ирак расположена на юго-западе Азии и на северо-востоке от Лиги Арабских Государств. На севере Ирак граничит с Турцией, на востоке с Ираном, на западе с Сирией, Иорданом и Саудовской Аравией, на юге с Кувейтом и Саудовской Аравией. Ирак расположен между 29-37 градусами северной широты и 38-48 градусами восточной долготы, площадь страны составляет 437072 км². Север страны занят гористой местностью с меньшим количеством солнечных дней, чем в других регионах страны, особенно зимой. Срединная часть страны представлена равниной между двух главных рек: Тигром и Евфратом, получающая намного больше солнечного света, чем северные области страны. Южная часть страны представляет собой территорию, где воздух чист от загрязнений, если не брать в расчет пылевые бури. Эта область считается одним из регионов с максимальной энергетической освещенностью, что обусловлено удачным географическим расположением страны на Ближнем Востоке, на северо-востоке Аравийского полуострова [6-8]. Климат Ирака преимущественно жаркий, с температурами, достигающими 56 С° с начала мая по конец сентября, и сухой – осадки выпадают в очень малом количестве, однако в южной прибрежной провинции Басра климат достаточно влажен. Несмотря на благоприятный климат с высокими средними температурами воздуха и высоким уровнем солнечного излучения, сопутствующая запыленность, или наоборот, чрезмерная влажность воздуха, может затруднить эффективное использование и применение фотоэлектрических систем. Пустынные области Ирака, особенно рядом с Руб-эль-Хали, имеют особенно высокий уровень солнечного излучения [9-11]. В общем и целом, вся территория Ирака может считаться пригодной для размещения солнечных электростанций. Потенциал солнечной энергии на территории Ирака примерно соответствует показателям стран «Солнечного Пояса», в которых он один из самых высоких в мире. В соответствии с исследованиями ученых из Ирака теоретически возможно не только обеспечить страны энергией, но и экспортировать ее в значительных количествах [12]. Ирак имеет большой потенциал солнечной энергии: от 1800 до 2390 кВт·ч/м²/год. Как видно на рис. 1, большая часть территории страны пригодна для постройки солнечных электростанций.

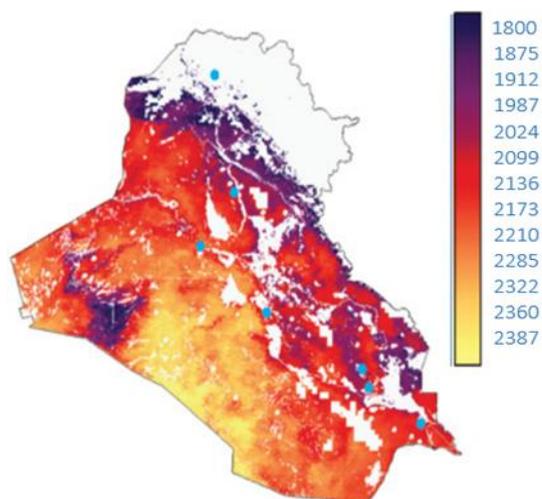


Рис. 1. Среднегодовая солнечная радиация в Ираке, кВт·ч/м²/год
Fig.1 Average annual solar radiation in Iraq kWh/m² / year

Среднее дневное количество солнечной радиации на всей территории Ирака составляет 6,5-7 кВт·ч/м². Вышеприведенные данные дают основание использовать солнечную энергию для производства электроэнергии [13]. Существующий дефицит требует форсировать поиски других схем генерации с более высокой эффективностью, более низкой себестоимостью кВтч и Гкал, более коротким временем монтажа и ввода в эксплуатацию оборудования, а также с более чистыми источниками энергии. Для того чтобы дать Иракскому электроэнергетическому сектору реальный толчок и догнать растущий спрос, предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов.

Исследования авторов [11,18] показывают, что дополнение парогазового цикла солнечной энергией позволяет существенно увеличить общий коэффициент полезного действия электростанции. Также основными преимуществами предлагаемой гибридной схемы являются экономия топлива, снижение спроса на электроэнергию в пиковый период, а также сокращение выбросов углерода.

Технология преобразования солнечной энергии на сегодня достаточно хорошо изучена, что снижает риски по модернизации электростанций Ирака. Однако, для принятия принципиального решения о строительстве гибридной газовой/солнечной электростанции и определения ее оптимального места расположения требуется анализ множества факторов, наиболее значимыми из которых являются следующие: солнечное излучение, количество световых часов, размер потребности в электроэнергии, наличие газовой электростанции, пустые пространства. Это обуславливает актуальность исследований в данной области, а именно разработки многофакторной математической модели поиска оптимального расположения гибридной электростанции с комбинированным циклом

Постановка задачи

Из вышеприведенной информации видно, что энергетические показатели Ирака удовлетворяют условиям строительства солнечных энергетических установок. При этом требуется оценка интенсивности излучения и различных рисков, влияющих на эти установки. Эти риски оцениваются либо по их возникновению, либо по месту в зависимости от характеристик почвы или техногенной деятельности. Среди них землетрясения, оползни, карст, наводнения, загрязнения, зоны низкого давления, набухающие глины, горные разработки, вторжения морской воды и песчаные дюны. По данным Иракского метеорологического управления (IMOAS) самая низкая опасность находится в западной и южной четырехугольной зоне, т.е. в Синджаре, Сур, Вади-аль-Мия, Рутбе, Вади-Хоране, Вади-Тибиле, Аль-Туртаре, Аль-Брите, Аль-Ма'Ания, Аль-Салман, Ансаб и Ал-Рухаймия. В табл. 1 показано изменение годовой солнечной радиации и светового дня в зависимости от региона Ирака [14].

Таблица 1

Координаты, солнечная радиация и световой день для городов Ирака (1990–2019 гг.)

| Город | Широта (N) и долгота (E) | Солнечная радиация, МДж/м ² /год | Световой день с октября по март, ч | Световой день с апреля по сентябрь, ч |
|------------|--------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|
| Эл басра | 30°31-47°50 | 7135,46 | 10,3-9,5 | 11,2-13,5 |
| Эл насирия | 31°01- 46°15 | 7263,97 | 10,2-9,3 | 11,1-13,3 |
| Эл самава | 31°16- 45°15 | 7123,67 | 10,3-9,4 | 11,2-13,5 |
| Эл имара | 32°07- 46°44 | 7021,23 | 10-9,1 | 10,9-13 |
| Эл кадисия | 31°57 45°00 | 7021,23 | 9,9-9,5 | 10,5-12,8 |
| Эл наджаф | 31°57-44°15 | 7135,20 | 9,9-9,5 | 10,5-12,8 |
| Эл хай | 32°08-46°05 | 7030,82 | 9,5- 8,1 | 10,1-12,9 |
| Карбала | 32°34 -44°03 | 7185,74 | 9,9-9,5 | 10,5-12,8 |
| Эл ротба | 33°02- 40°15 | 7114,44 | 9,2-8,5 | 8-12,3 |
| Багдад | 33°18- 44°30 | 6997,46 | 9,2-8 | 10-12,6 |
| Мосул | 36°19- 43°05 | 6318,83 | 7,5-5,8 | 8,1-12,3 |
| Хадиса | 34°08- 41°13 | 6662,75 | 7,8-7,4 | 8,3-11,3 |
| Тикрит | 34°35-43°37 | 6530,00 | 7,8-7,4 | 8,3-11,3 |
| Киркук | 35°28-44°21 | 6660,17 | 6,6-7,8 | 9,4-11,2 |
| Заху | 37°08- 42°50 | 6835,46 | 6,1-6 | 7,4-11 |

С использованием данных табл. 1 в работе выполнено исследование солнечного энергетического потенциала регионов Ирака, а также разработка математической модели определения оптимального места размещения гибридной электрической станции с комбинированным циклом.

Математическая модель

Современная практика показывает, что основные трудности при выборе и принятии решений обусловлены прежде всего недостаточно высоким качеством и неполнотой информации, имеющейся в распоряжении управляющих органов власти. Как было отмечено, в работе выделены пять факторов, которые известны и могут повлиять на реализацию решения в будущем, но предсказать их точно невозможно: среднегодовой уровень солнечной радиации, среднегодовой световой день, электропотребление, суммарная мощность существующих газовых станций, свободная доступная площадь для размещения солнечных коллекторов. В табл.2. и 3 приведены исходные и нормированные

Таблица 2

Характеристики провинций Ирака. Исходная информация

| Провинция | Свободная площадь, км ² | Электропотребление, МВт | Среднегодовая солнечная радиация, кВтч/м ² | Мощность газовых станций, МВт | Среднегодовой световой день, ч |
|------------|------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|
| Эльанбар | 122000 | 433 | 2300 | 250 | 10 |
| Вавилон | 4000 | 650 | 2000 | 220 | 10 |
| Эльбасра | 17888 | 2805 | 2120 | 3750 | 11 |
| Дикар | 11500 | 993 | 2150 | 500 | 10,7 |
| Кадисия | 7500 | 515 | 2150 | 500 | 10,4 |
| Дияля | 16200 | 572 | 1900 | 740 | 9,8 |
| Карбалия | 4100 | 703 | 2250 | 250 | 10,5 |
| Киркук | 7200 | 672 | 1850 | 1174 | 8,5 |
| Мисан | 15000 | 593 | 2050 | 620 | 10,7 |
| Мутана | 50500 | 403 | 2300 | 500 | 11 |
| Наджаф | 27000 | 673 | 2280 | 820 | 10,4 |
| Мосул | 30500 | 706 | 1800 | 0 | 8,2 |
| Васит | 14500 | 700 | 1900 | 125 | 10,6 |
| Саладин | 19700 | 462 | 1900 | 1014 | 8,6 |
| Сулаймания | 10500 | 2200 | 1800 | 1500 | 7 |
| Эрбил | 11000 | 1700 | 1800 | 1500 | 7 |
| Доход | 5000 | 990 | 1850 | 500 | 7 |

Характеристики провинций Ирака. Нормированные значения

| Провинция | Свободная площадь, о.е. | Электропотребление, о.е. | Средне-годовая солнечная радиация, о.е. | Мощность газовых станций, о.е. | Средне-годовой световой день, о.е. |
|------------|-------------------------|--------------------------|---|--------------------------------|------------------------------------|
| Эльанбар | 0,3261 | 0,0275 | 0,0669 | 0,0179 | 0,0620 |
| Вавилон | 0,0107 | 0,0412 | 0,0581 | 0,0158 | 0,0620 |
| Эльбасра | 0,0478 | 0,1779 | 0,0616 | 0,2686 | 0,0682 |
| Дикар | 0,0307 | 0,0630 | 0,0625 | 0,0358 | 0,0663 |
| Кадисия | 0,0200 | 0,0327 | 0,0625 | 0,0358 | 0,0644 |
| Дияля | 0,0433 | 0,0363 | 0,0552 | 0,0530 | 0,0607 |
| Карбалья | 0,0110 | 0,0446 | 0,0654 | 0,0179 | 0,0651 |
| Киркук | 0,0192 | 0,0426 | 0,0538 | 0,0841 | 0,0527 |
| Мисан | 0,0401 | 0,0376 | 0,0596 | 0,0444 | 0,0663 |
| Мутана | 0,1350 | 0,0256 | 0,0669 | 0,0358 | 0,0682 |
| Наджаф | 0,0722 | 0,0427 | 0,0663 | 0,0587 | 0,0644 |
| Мосул | 0,0815 | 0,0448 | 0,0523 | 0,0000 | 0,0508 |
| Васит | 0,0388 | 0,0444 | 0,0552 | 0,0090 | 0,0657 |
| Саладин | 0,0527 | 0,0293 | 0,0552 | 0,0726 | 0,0533 |
| Сулеймания | 0,0281 | 0,1395 | 0,0523 | 0,1074 | 0,0434 |
| Эрбил | 0,0294 | 0,1078 | 0,0523 | 0,1074 | 0,0434 |
| Доход | 0,0134 | 0,0628 | 0,0538 | 0,0358 | 0,0434 |
| Итого | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Для поиска оптимального места размещения гидридной станции с комбинированным циклом с учетом рассмотренных показателей предложена следующая многофакторная математическая модель:

$$\text{рейтинг} = S_{av} \cdot C_w^S + I_{av} \cdot C_w^I + L_{city} \cdot C_w^L + S_{gas} \cdot C_w^S + A_{free} \cdot C_w^A, \quad (1)$$

где S_{av} – среднегодовой световой день, о.е.; C_w^S – весовой коэффициент для среднегодового светового дня, о.е.; I_{av} – среднегодовая солнечная радиация, о.е.; C_w^I – весовой коэффициент для среднегодовой солнечной радиации, о.е.; L_{city} – электропотребление, о.е.; C_w^L – весовой коэффициент для электропотребления, о.е.; S_{gas} – суммарная мощность существующих газовых станций, о.е.; C_w^S – весовой коэффициент для суммарной мощности существующих газовых станций, о.е.; A_{free} – свободная площадь, о.е.; C_w^A – весовой коэффициент для свободной площади, о.е. Весовые коэффициенты математической модели (1) определяются на основе экспертизы. Для обработки экспертной информации в работе предложено использовать метод парных сравнений [15]. На основе этого метода будут получены весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого фактора. Для экспертизы привлечены шесть экспертов из Ирака (*Northern technical university, Baghdad university, Wassit university, Anbar university*) и России ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»). Экспертам было предложено заполнить анкету методом выставления оценок. Анкетирование выполнено с помощью *Google Forms* (рис. 2-3).

Анкета эксперта

Программное обеспечение *Google Forms* связано с другим онлайн-сервисом – *Google Sheets*. Это сделано для повышения удобства работы с полученной информацией [16]. Результаты анкет, полученные от экспертов, автоматически заносятся в таблицу и отправляются интервьюеру для последующей обработки.

Определение оптимального места размещения гибридной электростанции

Предлагаем вашему вниманию анкету для получения экспертного заключения. Целью данной экспертизы является получение точных мнений группы экспертов в области инженерии возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии. В этой экспертизе рассматриваются пять наиболее важных факторов определения оптимального места размещения проектируемых гибридных (газовые/солнечные) электростанций для определения влияния (значимости) каждого фактора на итоговое решение.

В этой процедуре сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор А более предпочтителен, чем фактор Б, то оценка А=1, а Б= 0. Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, факторы равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом: А =Б = 0,5.

* Обязательно

Рис.2. Анкета эксперта. Вводная часть

Fig.2. Expert questionnaire. Introduction

Электропотребление --- Мощность существующих газовых электростанций *

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать

Электропотребление --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции *

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать

Мощность существующих газовых электростанций --- Свободная площадь для размещения солнечной электростанции *

0 - Второй фактор предпочтительнее первого; 0,5 - факторы равнозначны; 1- первый фактор предпочтительнее второго

Выбрать

Отправить

Рис. 3. Анкета эксперта. Пример сравнения факторов

Fig. 3. Expert questionnaire. Example of comparing factors

МЕТОДЫ. Метод парных сравнений (Paired comparison method)

При реализации метода сравнение всех факторов производится попарно, с тем чтобы в каждой паре установить наиболее важный фактор. Если фактор A_i более предпочтителен, чем фактор A_j , то оценка $V_i=1$, а $V_j= 0$.

Следует отметить частный случай, когда, по мнению эксперта, ни один из рассматриваемых факторов в паре не имеет предпочтительности, т. е. i -й и j -й фактор равнозначны. Тогда оценка для них может быть сформирована следующим образом: $V_i =V_j = 0,5$.

Результаты сравнения заносятся в матрицу парных сравнений. Пример такой матрицы показан в табл. 4. Матрица является квадратной с незаполненной главной диагональю, так как сравнение фактора с самим собой не имеет смысла. Оценка факторов экспертом осуществляется по горизонтали.

Оценка факторов экспертом

| факторы | A ₁ | A ₂ | A ₃ | A ₄ | A ₅ | Сумма |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| A ₁ | - | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 3,5 |
| A ₂ | 0,5 | - | 1 | 1 | 1 | 3,5 |
| A ₃ | 0 | 0 | - | 0,5 | 0,5 | 1 |
| A ₄ | 0 | 0 | 0,5 | - | 0,5 | 1 |
| A ₅ | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | - | 1 |

Приведенная в табл. 4 матрица отвечает следующим результатам сравнения:

- фактор A₁ равно предпочтителен A₂, и более предпочтителен, чем A₃, A₄, A₅;
- фактор A₂ равно предпочтителен A₁, и более предпочтителен, чем A₃, A₄, A₅;
- фактор A₃ менее предпочтителен, чем A₁, A₂ и равно предпочтителен A₄, A₅;
- фактор A₄ менее предпочтителен, чем A₁, A₂ и равно предпочтителен A₃, A₅;
- фактор A₅ менее предпочтителен, чем A₁, A₂ и равно предпочтителен A₃, A₄.

Полученные матрицы парных сравнений в результате анкетирования приведены на рис. 4, где A₁-A₅ – это среднегодовой световой день, среднегодовая солнечная радиация, электропотребление, мощность существующих газовых электростанций, свободная площадь для размещения солнечной электростанции соответственно.

Рис. 4. Результаты парных сравнений

Fig.4. Results of paired comparisons

Оценка согласованности мнений экспертов (*Assessing the consistency of expert opinions*)

Обработка результатов парных сравнений, а также последующая оценка согласованности мнений экспертов (расчет коэффициентов согласованности и конкордации) выполнены в среде *Matlab* [17].

На основании данных экспертизы был произведен расчет коэффициента согласованности согласно следующему алгоритму

– математическое ожидание оценки i -го фактора

$$M(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{m} \quad (2)$$

где A_{ij} – оценка j -го эксперта по i -му фактору; m – общее количество экспертов; – дисперсия оценки i -го фактора

$$D(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (A_{ij} - M(A_i))^2}{m-1} \quad (3)$$

где – среднеквадратическое отклонение оценки i -го фактора

$$\sigma(A_i) = \sqrt{D(A_i)} \quad (4)$$

где – коэффициент согласованности экспертов по i -му фактору

$$\mu(A_i) = 1 - \frac{\sigma(A_i)}{M(A_i)} \quad (5)$$

Алгоритм расчета коэффициента конкордации приведен ниже суммарный ранг i -го фактора

$$R_{i\Sigma} = \sum_{j=1}^m A_{ij} \quad (6)$$

где – математическое ожидание рангов

$$T = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{n} \quad , \quad (7)$$

где n - количества факторов.

– отклонение i -го фактора

$$\Delta_i = R_{i\Sigma} - T \quad (8)$$

– сумма квадратов отклонений

$$S = \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2 \quad (9)$$

– коэффициент конкордации

$$W = \frac{S}{S_{\max}} \quad (10)$$

$$S_{\max} = \frac{1}{12} * m^2 n(n^2 - 1) \quad (11)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.

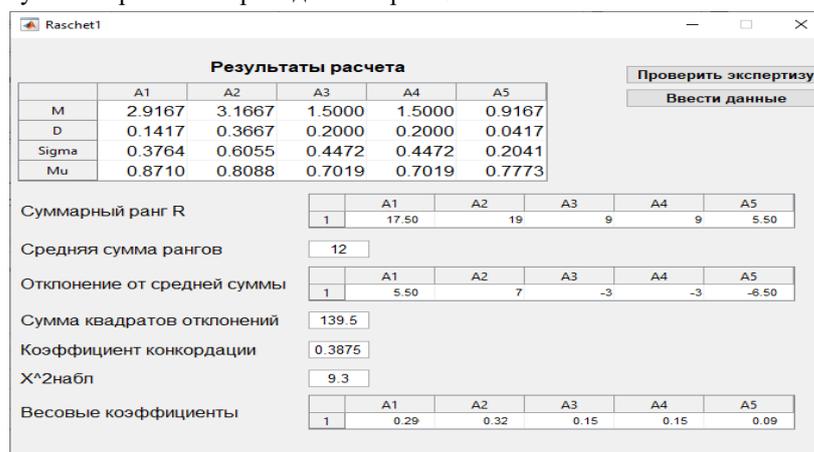


Рис. 5. Оценка согласованности мнений экспертов
 Fig.5. Assessment of the consistency of expert opinions

Как видно на рис. 5, коэффициент согласованности всех факторов не меньше общепринятого граничного значения (0,7-0,8), что соответствует согласованному мнению экспертов по всем факторам.

После получения окончательных значений коэффициентов в пределах допустимого диапазона проводятся процедуры, связанные с соответствиями полученных результатов. Проверим полученный коэффициент конкордации на статистическую значимость по критерию χ^2 -Пирсона. Согласно данным рис. 5 наблюдаемое значение критерия χ^2 -Пирсона $\chi^2_{\text{набл}} = 9,3$

Для оценки статистической значимости необходимо и достаточно, чтобы выполнялось следующее условие

$$X^2_{\text{набл}} > X^2_{\text{табл}} \quad (12)$$

где $\chi^2 = f(r, \alpha)$, α – уровень значимости, r – число степеней свободы, равно $n-1$.

Если условие выполняется, значит, полученная величина степени согласованности мнений экспертов будет неслучайным значением. В противном случае экспертиза считается несостоявшейся.

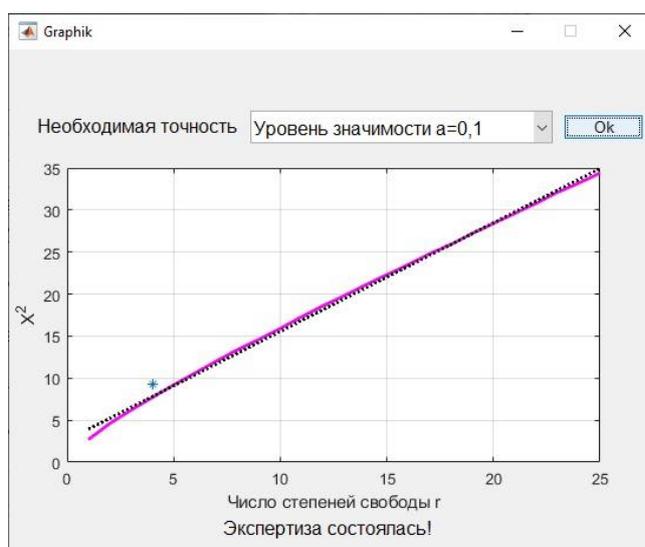


Рис. 6. Проверка по критерию χ^2 -Пирсона
Fig.6. Checking by the χ^2 -Pearson criterion

На рис. 6 приведена зависимость, соответствующая распределению табличного значения $\chi^2_{\text{табл}}$ при уровне значимости $\alpha=0,1$. Как видно, условие выполняется, полученная величина степени согласованности мнений экспертов неслучайное значение, экспертиза считается состоявшейся. По полученным индивидуальным оценкам экспертов можно перейти к групповым оценкам – весовым коэффициентам каждого из рассматриваемых факторов согласно

$$C_w^i = \frac{\sum_{j=1}^m A_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij}}, \quad (13)$$

Тогда выражение для итогового рейтинга с учетом значимости каждого рассматриваемого фактора окончательно примет следующий вид:

$$\text{рейтинг} = 0,29S_{av} + 0,32I_{av} + 0,15L_{city} + 0,15S_{gas} + 0,09A_{free} \quad (14)$$

Анализ результатов

С использованием математической модели (14) был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения гибридных станций с комбинированным циклом [19-25]. Результаты сравнения как по отдельным факторам, так и для итогового рейтинга провинций Ирака приведены на рис. 7-12.

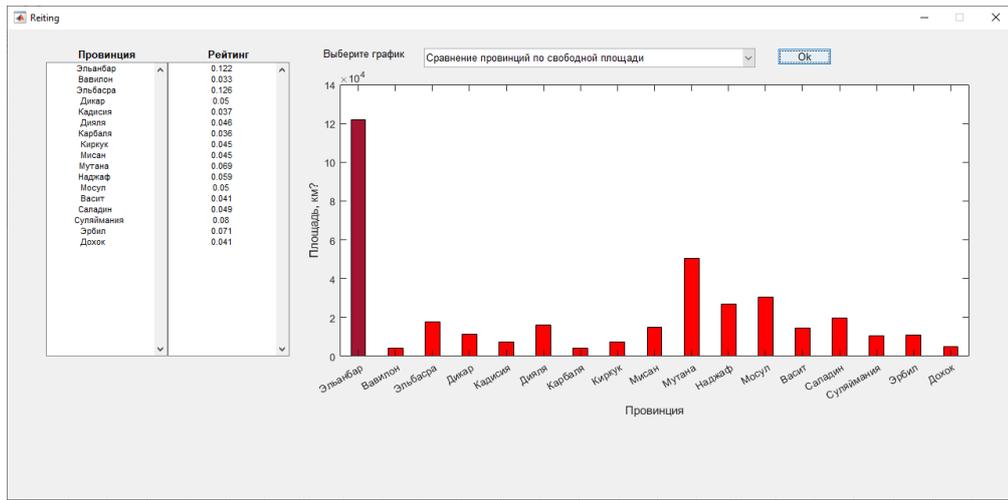


Рис. 7. Сравнение провинций Ирака по свободной площади для размещения солнечной электростанции
 Fig.7. Comparison of the provinces of Iraq by available area for the placement of a solar power plant

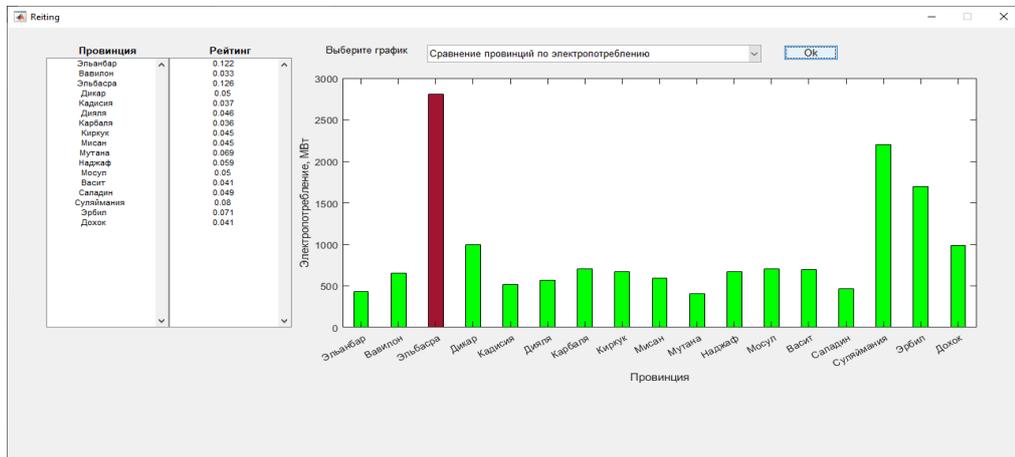


Рис. 8. Сравнение провинций Ирака по уровню электропотребления
 Fig.8. Comparison of the provinces of Iraq by the level of electricity consumption

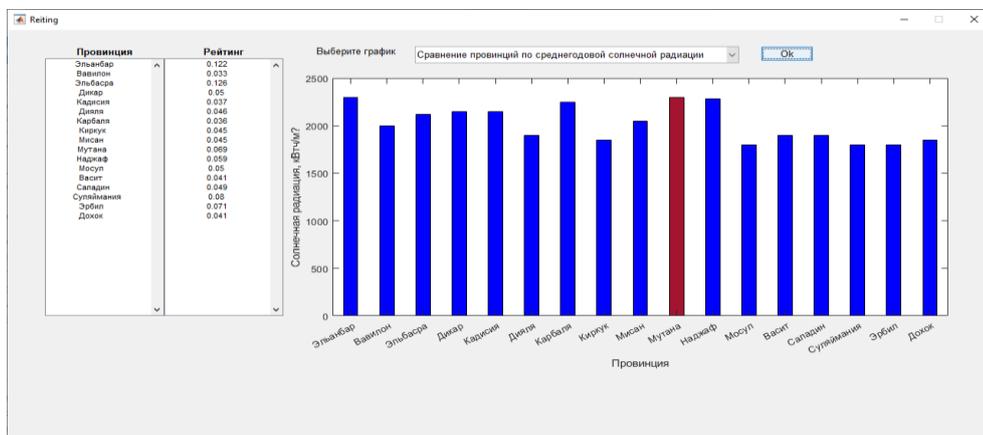


Рис. 9. Сравнение провинций Ирака по уровню среднегодовой солнечной радиации
 Fig.9. Comparison of the provinces of Iraq by the level of average annual solar radiation

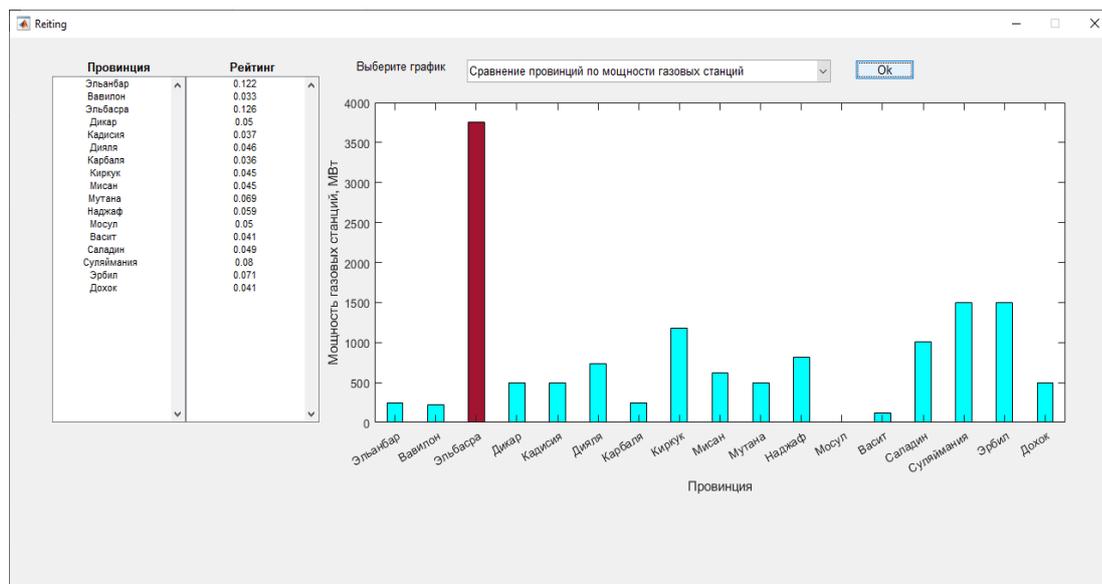


Рис. 10. Сравнение провинций Ирака по мощности существующих газовых станций
 Fig.10. Comparison of Iraq's provinces by capacity of existing gas stations

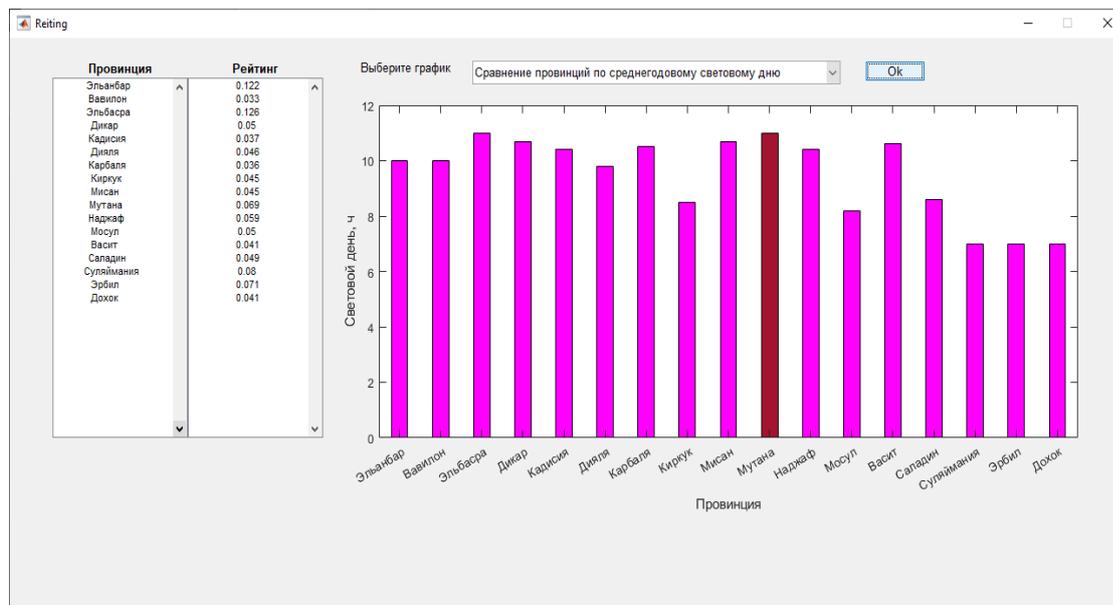


Рис. 11. Сравнение провинций Ирака по продолжительности среднегодового светового дня
 Fig.11. Comparison of Iraq's provinces by average annual daylight hours

Как видно на рис. 7-11, при относительно близких значениях факторов, характеризующих солнечный энергетический потенциал провинций Ирака, Эльбасра характеризуется существенно большим уровнем электропотребления региона, так и более развитой инфраструктурой. Это, в целом, и предопределяет наибольший итоговый рейтинг среди всех провинций Ирака как оптимальный регион для размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом (рис.12).

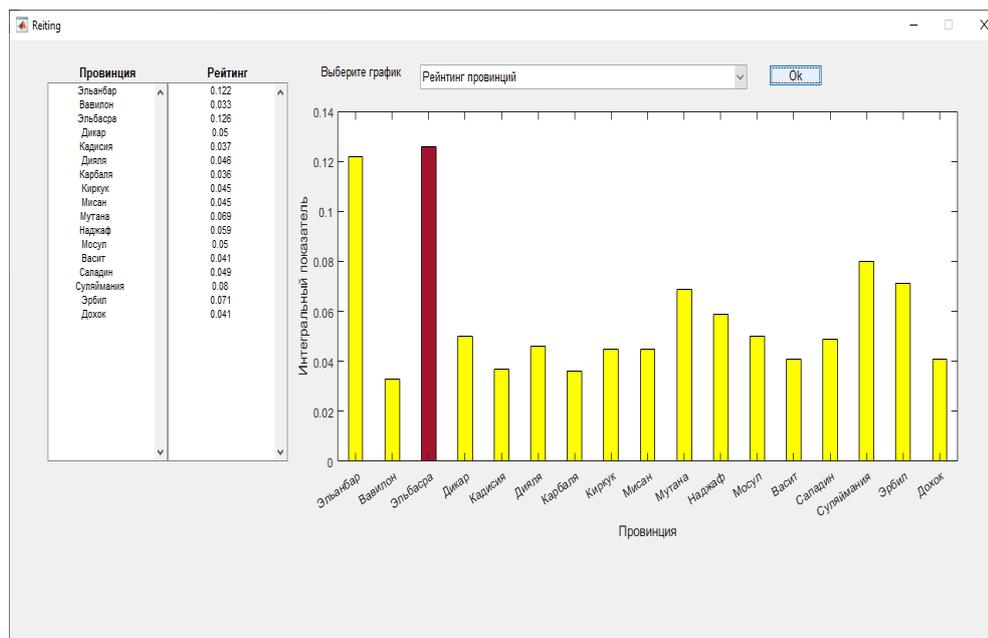


Рис. 12. Итоговый рейтинг провинций Ирака

Fig.12. Final ranking of the provinces of Iraq

Заклучение

Одним из основных перспективных глобальных трендов является инвестиция в возобновляемую энергетику. Солнечный энергетический потенциал Ирака является одним из самых высоких в мире. Авторами предлагается включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов. Модернизация основных действующих электростанций Ирака с форсированием их мощности выше существующего уровня позволит пересмотреть цены на электроэнергию и преобразовать электроэнергетический сектор в самокупаемую отрасль [26-30]. С использованием предложенной математической модели был рассчитан рейтинг и произведено сравнение провинций Ирака для определения наилучшего региона для размещения подобных гибридных станций с комбинированным циклом.

Данная математическая модель может использоваться при дальнейшей локализации решения задачи, например при рассмотрении наилучших условий для строительства гибридной электростанции уже в пределах провинции и т.д.

Литература

1. Abass Ahmed. Z., Pavlyuchenko D.A. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 2019. V. 9. No. 6. pp. 4617-4624.
2. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. Available at URL: <https://power.larc.nasa.gov>.
3. 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;21(1-2):43-54.
4. Nezammahalleh H., Farhadi F., Tanhaemami M. Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. Solar energy. 2010. V.84(9). pp. 1696-1705.
5. Zachary J. Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) Systems. Combined Cycle Systems for Near-zero Emission Power Generation; Book; Woodhead Publishing Series in Energy. 2012. № 32. pp. 283-305.
6. Baghernejad A., Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. Energy Conversion and Management. 2011. 52 (5). pp. 2193-2203.
7. Dersch J. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. Energy. 2004. 29 (5-6). pp. 947-959.

8. Burgermeister J. Iraq looks to solar energy to help rebuild its economy URL: Available at: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/03/iraq-looks-to-solar-energy-to-help-rebuild-its-economy>. Accessed: 12 February 2020
9. Al-Waeely A. A., Salman S. D., Abdol-Reza W. K., et al. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014. V. 14. N. 2. pp. 16-23.
10. Меламед Л.Э. Метод встроенных решений в моделировании турбулентности. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020;22(5):28-40.
11. Abass Ahmed. Z., Pavlyuchenko D.A. Southern Iraq gas station conversion to integrated solar combined cycle,” in *E3S web conferences 114 ,05008 (2019)*
12. Abass Ahmed. Z., Pavlyuchenko D.A. Turning Iraq into a country of energy exporter through the exploitation of solar energy and vast desert land,” in *E3S web conferences 114 ,05008 (2019)* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008>.
13. Iraq, The Iraqi Ministry of Electricity, <https://moelc.gov.iq/>.
14. Ministry of transportation, Iraqi meteorological organization and seismology <http://meteoseism.gov.iq/>.
15. Секретарев Ю.А., Панова Я.В. Выбор и принятие Решений в электроэнергетике. Новосибирск, 2018.
16. Google workspace https://workspace.google.com/intl/en_ie/.
17. Math work, program MATLAB <https://www.mathworks.com/downloads/>.
18. Абасс А.З., Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., и др. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020;22(2):98-107.
19. Ahmed Z. Abass., Pavlyuchenko D.A., Kobobel I.V. Solar energy perspectives in Iraq, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020 (45). pp 63-70.
20. Hasan F. Khazaal., Haider Th. Salim Alrikabi., Faisal Theyab Abed. Water desalination and purification using desalination units powered by solar panels. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. V. 7, N 3.
21. Ahmed Zkear Abass., Pavlyuchenko D.A., Zozan Saadallah Hussain. Survey about impact voltage instability and transient stability for a power system with an integrated solar combined cycle plant in Iraq by using ETAP. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2021. V 2, No 3.
22. Abass A.Z.; Pavlyuchenko D.A.; Zozan Saadallah Hussain. Methods Comparison for Optimal Capacitor Placement in Distribution System. 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 6-9 Oct. 2020,
23. Павлюченко Д.А., Любченко В.Я. Рейтинговая оценка показателей энергоэффективности на основе метода анализа иерархий // *Новое в Российской электроэнергетике*. 2017. №11. С. 77-91.
24. Reda M., Saied N., Khaldi A., et al. Iraq electrical power infrastructure - past, present and future developments and expectations. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition; Atlanta, GA; 2006*. pp. 1792-1795.
25. Alibage A. Assessing photovoltaic solar technologies as a solution for the problem of power shortage in Iraq. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET); Honolulu, HI; 2018*. pp. 1-16.
26. Khalidah A J Al-Qayim Integrated solar thermal combined cycle for power generation in Iraq *Materials Science and Engineering*, V. 518, *Electric and Electronic Engineering*; Published under licence by IOP Publishing Ltd.
27. Boumedjirek M., Merabet A., Feidt M., et al. Performance evaluation of parabolic trough power plants on direct steam generation and integrated solar combined cycle system in Algeria. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Tangier; 2017*. pp. 1-8.
28. Talukder P, Soori PK. Integration of parabolic trough collectors with natural gas Combined Cycle power plants in United Arab Emirates. *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE); Offenburg. 2015*. pp. 62-69.
29. Li C.-JIOЮ., Li P., Wang K., et al. Survey of properties of key single and mixture halide salts for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems. *AIMS Energy 2(2)*. 2014. pp. 133-157. doi: 10.3934/energy.2014.2.133.

30. Amani M., Ghenaiet A., Smaili A. Determination of the performance of a solar tower integrated with a Combined Cycle. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Rabat, Morocco. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8703000.

Авторы публикации

Ахмед Зкеар Абасс – аспирант, Новосибирский государственный технический университет. (НГТУ).

Дмитрий Анатольевич Павлюченко – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. (НГТУ).

Виталий Максимович Лесс – студент, Новосибирский государственный технический университет. (НГТУ).

References

1. Abass Ahmed. Z, Pavlyuchenko DA. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 2019;9(6):4617-4624. doi: 10.11591/ijece.v9i6.pp4617-4624.
2. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources URL: <https://power.larc.nasa.gov/>.
3. Elmohlawy AE, Ochkov VF, Kazandzhan BI. Evaluation of the performance and energy efficiency of integrated solar combined cycle power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):43-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-43-54>
4. Nezammahalleh H, Farhadi F, Tanhaemami M. Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. *Solar energy*. 2010;84(9):1696-1705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.05.007>.
5. Zachary J. Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) Systems. *Combined Cycle Systems for Near-zero Emission Power Generation*. Book; Woodhead Publishing Series in Energy. 2012;32:283-305. doi: 10.1016/B978-0-85709-013-3.50010-9.
6. Baghernejad A, Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2011. 52 (5). pp. 2193-2203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.019>
7. Dersch J. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. *Energy*. 2004;29(5-6):947-959. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(05\)80188-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(05)80188-2)
8. Burgermeister J. Iraq looks to solar energy to help rebuild its economy. Available at: URL:<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/03/iraq-looks-to-solar-energy-to-help-rebuild-itseconomy>. Accessed: 12 February 2020
9. Al-Waely AA, Salman SD, Abdol-Reza WK, et al. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014;14(2):16-23. doi: 10.24842/1611/0022.
10. Melamed LE. Built-in turbulence modelling solution method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):28-40. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-28-40>
11. Abass Ahmed. Z, Pavlyuchenko DA. Southern Iraq gas station conversation to integrated solar combined cycle in *E3S web conferences* 114 ,05008 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008>.
12. Abass Ahmed. Z, Pavlyuchenko DA. Turning Iraq into a country of energy exporter through the exploitation of solar energy and vast desert land in *E3S web conferences* 114 ,05008 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911405008>.
13. Iraq. The Iraqi Ministry of Electricity, <https://moelc.gov.iq/>.
14. Ministry of transportation, Iraqi meteorological organization and seismology <http://meteoseism.gov.iq/>.
15. Sekretarev YuA, Panova YaV. *Choice and decision-making in the electric power industry*.
16. Google workspace https://workspace.google.com/intl/en_ie/.

17. *Math work*, program MATLAB <https://www.mathworks.com/downloads/>.
18. Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Balabanov A.M, VM. Less. Inclusion of solar energy in Iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):98-107. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-98-107.
19. Ahmed Z. Abass, D.A Pavlyuchenko, Kobobel I. Solar energy perspectives in Iraq, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020 (45);63-70.
20. Hasan F. Khazaal, Haider Th. Salim Alrikabi, Faisal Theyab Abed. Water desalination and purification using desalination units powered by solar panels, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019;7(3), <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v7i3.748>.
21. Ahmed Zkear Abass, Pavlyuchenko DA, Zozan Saadallah Hussain. Survey about impact voltage instability and transient stability for a power system with an integrated solar combined cycle plant in Iraq by using ETAP. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2021;2(3). <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/author/index/completed>.
22. Abass AZ; Pavlyuchenko D.A; Zozan Saadallah Hussain. Methods Comparison for Optimal Capacitor Placement in Distribution System. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 6-9 Oct. 2020, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271381.
23. Pavlyuchenko DA, Lyubchenko VYa. Rating assessment of energy efficiency indicators based on the hierarchy analysis method. *Novoe v Rossiyskoy elektroenergetike*. 2017;11:77-91.
24. Reda M, Saied N, Khaldi A, et al. A. Iraq electrical power infrastructure - past, present and future developments and expectations. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition; Atlanta, GA*. 2006. pp. 1792-1795. doi: 10.1109/PSCE.2006.296184.
25. Alibage A. Assessing photovoltaic solar technologies as a solution for the problem of power shortage in Iraq. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*; Honolulu, HI; 2018. pp. 1-16. doi: 10.23919/PICMET.2018.8481984.
26. Khalidah A J Al-Qayim Integrated solar thermal combined cycle for power generation in Iraq Materials Science and Engineering, V. 518, *Electric and Electronic Engineering; Published under licence by IOP Publishing Ltd*. doi: 10.1088/1757-899X/518/4/042002.
27. Boumedjirek M, Merabet A, Feidt M, et al. *Performance evaluation of parabolic trough power plants on direct steam generation and integrated solar combined cycle system in Algeria*. International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Tangier; 2017. pp. 1-8. doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477315.
28. Talukder P, Soori PK. *Integration of parabolic trough collectors with natural gas Combined Cycle power plants in United Arab Emirates*. International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE); Offenburg. 2015. pp. 62-69. doi: 10.1109/ICSGCE.2015.7454270.
29. Li C.-J, Li P, Wang K, et al. Survey of properties of key single and mixture halide salts for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems. *AIMS Energy* 2(2). 2014. pp. 133-157. doi: 10.3934/energy.2014.2.133.
30. Amani M, Ghenaïet A, Smaili A. *Determination of the performance of a solar tower integrated with a Combined Cycle*. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Rabat, Morocco. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8703000.

Authors of the publication

Ahmed Zkear Abass – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: theking.amir@mail.ru.

Dmitryi A Pavlyuchenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: pavlyuchenko@corp.nstu.ru.

Vitaliy M. Less – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: lessv134@gmail.com.

Получено

21 января 2021г.

Отредактировано

25 февраля 2021г.

Принято

02 марта 2021г.