

---

## ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 621.316.9

### Технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему Тартуса (САР)

М. В. Шевлюгин, М. Р. Ради

Российский университет транспорта (РУТ), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

**Для цитирования:** Шевлюгин М. В., Ради М. Р. Технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему Тартуса (САР) // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 201–210. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-201-210

#### Аннотация

**Цель:** Провести технико-экономический анализ интеграции солнечных электростанций в энергосистему города Тартуса для повышения ее устойчивости и эффективности. В условиях дефицита энергоресурсов и нестабильности энергоснабжения, вызванных военными действиями и разрушением энергетической инфраструктуры, внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечной энергии, рассматривается как перспективное решение. **Методы:** Анализ данных о состоянии энергосистемы города, моделирование интеграции солнечной генерации в существующую сеть, а также расчеты экономической эффективности внедрения солнечных электростанций. Для оценки были использованы технические параметры солнечных панелей и экономические показатели затрат на установку и эксплуатацию. **Результаты:** Интеграция солнечных электростанций может значительно повысить надежность энергоснабжения в Тартусе, снизить затраты на топливо и снижение выбросов углекислого газа. Предлагаемые меры позволяют региону уменьшить зависимость от централизованных источников электроэнергии и повысить устойчивость энергетической системы. **Практическая значимость:** Конечные результаты данного исследования могут служить основой для разработки и внедрения программы модернизации энергетической инфраструктуры в Тартусе, а также в других городах Сирии. Особое внимание уделяется интеграции солнечных электростанций в систему распределенной генерации энергии. Такой подход не только эффективно адресует существующий энергетический кризис в регионе, но и способствует долгосрочному устойчивому развитию энергетического сектора. Внедрение солнечных технологий позволяет снизить зависимость от традиционных источников энергии, уменьшить выбросы парниковых газов и обеспечить более стабильное и надежное энергоснабжение для населения и промышленности. Кроме того, распределенная генерация способствует созданию местных рабочих мест, стимулирует экономический рост и повышает энергетическую безопасность регионов, способствуя тем самым общему благополучию и развитию общества.

**Ключевые слова:** Солнечная энергия, распределенная генерация, технико-экономический анализ, энергосистема Тартуса, возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

## Введение

В условиях кризиса энергоснабжения в Сирии солнечная энергетика становится важным направлением для стабилизации энергосистемы. В Тартусе, где солнечный потенциал достигает  $1650 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$  в год, проектируется солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) мощностью 56 МВт (рис. 1). Проведенное моделирование в PVsyst показывает, что, несмотря на высокую выработку, данной мощности недостаточно для полного обеспечения города, особенно зимой. Целью работы является оценка потенциала солнечной энергетики для Тартуса и определение мер для улучшения ее эффективности в энергоснабжении города.

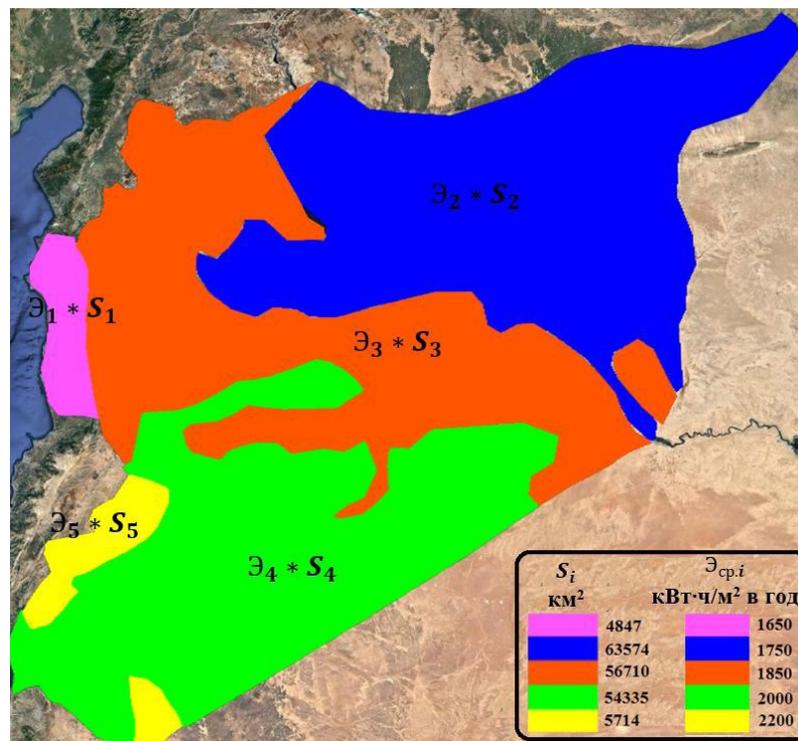


Рис. 1. Среднегодовое поступление солнечной энергии на горизонтальную поверхность в пределах сирийской территории, выраженное в  $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$

## Солнечная энергия в Сирии

На основании данных, представленных в солнечном атласе Сирии, изданном Центром научных исследований и разработок (SSRC) в 1994 году, можно сделать вывод о значительном потенциале использования солнечной энергии на территории Сирии. Согласно этим данным, среднее дневное поступление солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Сирии составляет приблизительно 5 киловатт-часов на квадратный метр ( $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ). Если рассматривать этот показатель в годовом исчислении, он эквивалентен примерно  $1800 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , что свидетельствует о высокой эффективности солнечного излучения в регионе.

Годовое количество солнечных часов в Сирии колеблется в диапазоне от 2820 до 3270 часов. Эти значения демонстрируют стабильность и обилие солнечного света, что является благоприятным фактором для развития солнечной энергетики. Однако распределение солнечной энергии по территории страны неравномерно и зависит от географических и климатических условий различных регионов.

В частности, средняя мощность солнечной энергии варьируется в зависимости от местоположения. В горных западных регионах Сирии среднесуточная мощность солнечной энергии составляет около  $4,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ . Эти районы характеризуются более низкой средней температурой и возможными облачными покровами, что может несколько снижать эффективность солнечных панелей. В то же время в пустынных районах Бадии среднесуточная мощность солнечной энергии достигает примерно  $5,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ . Такие условия, как высокая инсоляция и отсутствие значительных облачных покровов, способствуют более эффективному использованию солнечной энергии для различных целей, включая производство электроэнергии и обогрев.

Особое внимание следует уделить городу Тартусу, расположенному в Сирии, где зафиксирован особенно высокий средний потенциал солнечной энергии. В Тартусе среднегодовое поступление солнечной радиации достигает  $1650 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , что является одним из наивысших показателей в стране. Кроме того, средний солнечный поток на горизонтальную поверхность в этом городе составляет приблизительно  $4,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ . Эти показатели подчеркивают значительный потенциал региона для внедрения солнечных технологий и развития солнечной энергетики, что может способствовать экономическому росту и устойчивому развитию региона [1, 2].

Таким образом, анализ данных из солнечного атласа Сирии демонстрирует высокий потенциал солнечной энергии на территории страны, особенно в таких регионах, как пустынные области Бадии и город Тартус. Эти условия создают благоприятные предпосылки для развития солнечной энергетики, что может способствовать повышению энергетической независимости и устойчивому развитию Сирии в будущем. [3].

Выбираем солнечную панель типа SilaSolar 580Вт TOPCon 16BB (Bifacial) и фотоэлектрические инверторы 1500 кВт от русского производителя АО «Связь инжиниринг» [4].

Количество трехфазных инверторов  $N_{\text{инв}}$  [5]:

$$N_{\text{инверторов}} = \frac{P_{\text{расчетная}}}{P_{\text{инвертора}}},$$

где  $P_{\text{инв}}$  — номинальная мощность инвертора.

Максимальное количество модулей в одном ряду, обозначаемое как  $n_{\text{max}}$ , рассчитывается по следующей формуле:

$$n_{\max} = \frac{U_{\text{и max}}}{U_{\text{ФЭМ max}}},$$

где  $U_{\text{и max}}$  — максимально допустимое входное напряжение постоянного тока для инвертора (В);

$U_{\text{ФЭМ max}}$  — максимальное напряжение фотогальванического модуля, соответствующее напряжению холостого хода при самой низкой рабочей температуре поверхности модуля (В).

Ток, проходящий через фотоэлектрический блок (ФЭБ), должен оставаться ниже максимального входного тока инвертора [5]. Количество допустимых параллельных рядов в ФЭБ, обозначаемое как  $n_{\text{ряд}}$ , определяется исходя из этого предельного тока и рассчитывается следующим образом:

$$n_{\text{ряд}} \leq \frac{I_{\text{и max}}}{I_{\text{ряд max}}} [\text{ряда}],$$

где  $I_{\text{и max}}$  — максимальный входной ток инвертора (А);

$I_{\text{ряд max}}$  — наибольший допустимый ток в одном ряду (А).

Как правило, этот параметр соответствует току короткого замыкания модуля в условиях STC [5].

Солнечная фотоэлектрическая станция мощностью 47 МВт, расположенная в провинции Тартус, характеризуется следующими основными параметрами. В системе установлено 115 520 солнечных модулей, которые объединены последовательно по 20 штук в каждой цепи. Общее количество таких цепей составляет 152. Площадь, занятая фотоэлектрическими панелями, достигает 265 955 м<sup>2</sup>, что соответствует 0,26 км<sup>2</sup>.

### Технико-экономический расчет

Рассматриваемая солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) генерирует электроэнергию в объеме 99 804 МВт · ч/год.

Рассматриваемая СФЭС вырабатывает электроэнергию 99 804 МВт · ч/год.

### Анализ экономической целесообразности проекта

При определении эффективности данного проекта учитываются ставка дисконтирования и эксплуатационный срок оборудования. В данном случае принято, что ставка дисконтирования составляет  $r = 9\%$ , а предполагаемый период эксплуатации фотоэлектрической установки равен  $T = 30$  лет.

Капитальные затраты  $I_0$ : объем инвестиций в рассматриваемую солнечную фотоэлектрическую систему определяется исходя из актуальных рыночных цен

2023 года [6], которые составляют 758 \$/кВт (эквивалент 68 220 руб/кВт). Учитывая установленную мощность 57,76 МВт, величина капитальных инвестиций ( $I_0$ ) для данной СФЭС определяется следующим образом:

$$I_0 = 57\,760 \cdot 68\,220 = 3\,940\,387\,200 \text{ руб.} = 3940 \text{ млрд руб.}$$

В соответствии с отчетом IRENA (2023) [6] капитальные затраты на солнечные электростанции включают:

1. Стоимость солнечных модулей — основной компонент, который в последние годы значительно снизился в цене.
2. Баланс системы (BoS, Balance of System) — включает:
  - инверторы (преобразуют постоянный ток от панелей в переменный);
  - монтажные конструкции и крепежные системы;
  - кабельную инфраструктуру и электропроводку;
  - трансформаторы и системы подключения к сети.
3. Инженерно-строительные работы (EPC — Engineering, Procurement, Construction) — затраты на проектирование, поставку оборудования и строительство.
4. Разрешительная и административная деятельность — расходы на получение лицензий, сертификацию, проектную документацию.
5. Финансовые и страховые затраты — проценты по кредитам, страхование проекта.

Затраты на оплату труда в Сирии значительно ниже, чем в США и странах Европы, что позволяет снизить расходы на эксплуатацию и обслуживание на 25–50 %. В итоге эти затраты составляют 13,5 \$/кВт, что эквивалентно 1282,5 руб/кВт [7].

Исходя из этого, ежегодные расходы ( $C_t$ ) выбранной СФЭС равны:

$$C_t = 1282,5 \cdot 57760 = 74\,077\,200 \text{ руб/год} = 74 \text{ млн руб/год.}$$

Чистый доход ( $R_t$ ) включает доходы от уменьшения выбросов парниковых газов и выручку от реализации электроэнергии, генерируемой данной солнечной фотоэлектрической установкой (СФЭС). Согласно нормативному акту Министерства энергетики Сирийской Арабской Республики № 1763, инвесторы имеют право реализовывать произведенную электрическую энергию государственной компании PEDEEE по установленному тарифу 0,106 €/кВт · ч, что эквивалентно 0,119 \$/кВт · ч при валютном курсе 1 € = 1,12 \$ [7, 8]. На основании данного тарифа прогнозируемая солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) с годовой генерацией 99 804 МВт · ч обеспечит суммарную годовую выручку в размере 1 128,28 млн руб.

Дополнительно, учитывая стоимость выбросов углекислого газа в 20 €/т CO<sub>2</sub> (или 22,4 \$/т CO<sub>2</sub> при пересчете по курсу 1 € = 1,12 \$) [9], расчетный доход от уменьшения эмиссии парниковых газов для предложенной СФЭС составит:

$$55\,119,78 \frac{\text{тСО}_2}{\text{год}} \cdot 22,4 \cdot 95 \frac{\text{руб.}}{\text{тСО}_2} =$$

$$= 117\,294\,891,84 \text{ руб / год} = 117,29 \text{ млн руб / год.}$$

Соответственно, совокупные годовые доходы ( $R_t$ ) проектируемой для строительства в Сирии СФЭС составят:

$$R_t = 1128,28 + 117,29 = 1245,57 \text{ млн руб / год.}$$

В итоге у нас получается окупаемость СФЭС через 5 лет (рис. 2).

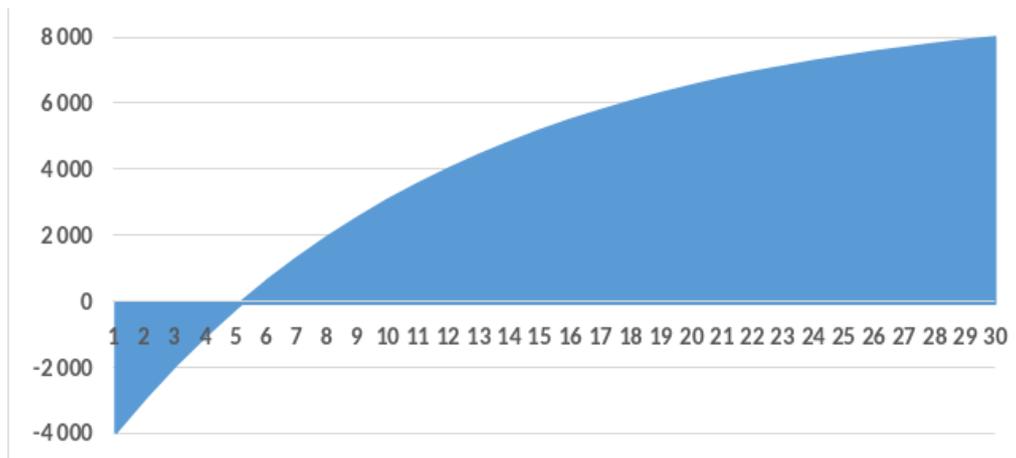


Рис. 2. Накопленный чистый дисконтированный денежный поток рассмотренной СФЭС

### Моделирование СФЭС на примере города Тартуса

При моделировании СФЭС на программе PVsyst были выявлены следующие результаты (рис. 3, 4).

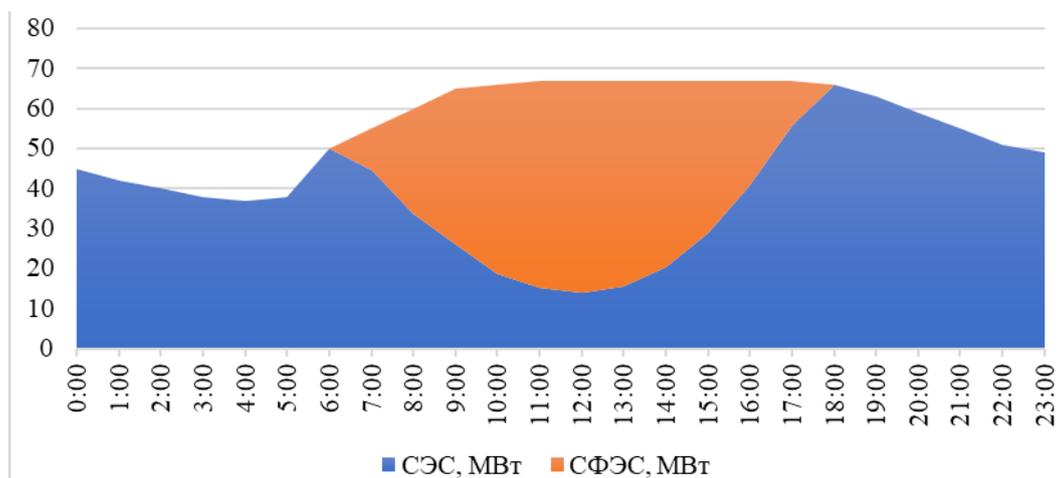


Рис. 3. Летний суточный график нагрузки при внедрении СФЭС

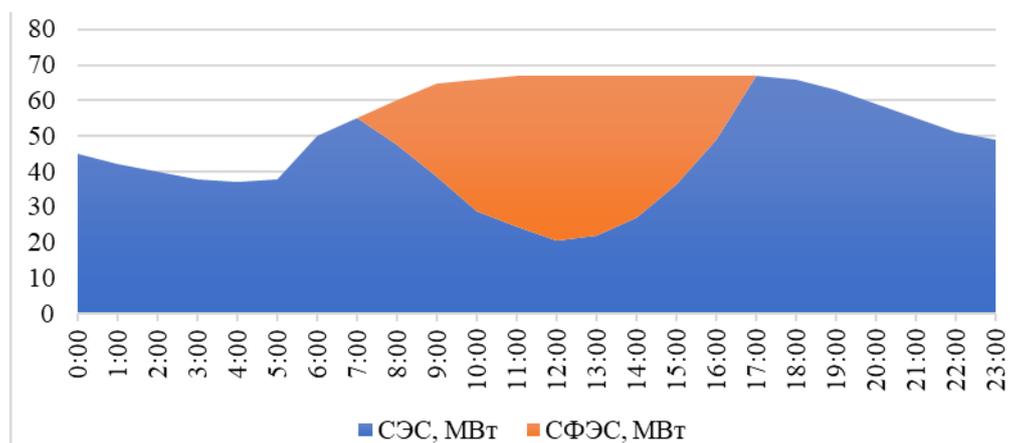


Рис. 4. Зимний суточный график нагрузки при внедрении СФЭС

## Заключение

В ходе проведенного исследования была рассмотрена возможность интеграции солнечной энергетики в энергосистему города Тартуса. Полученные результаты свидетельствуют о высокой перспективности использования солнечной фотоэлектрической генерации в качестве одного из основных направлений модернизации энергоснабжения региона. Анализ показал, что внедрение солнечных электростанций позволит существенно повысить надежность энергосистемы, снизить зависимость от традиционных источников топлива, а также уменьшить объем выбросов углекислого газа.

Моделирование сценариев генерации солнечной энергии на основе программного комплекса PVsyst позволило установить, что даже при высокой выработке солнечной электроэнергии полное покрытие энергопотребления города в зимний период остается затруднительным. Это указывает на необходимость комплексного подхода к развитию энергосистемы, включающего сочетание солнечной генерации с другими источниками энергии, такими как газотурбинные установки.

Экономический анализ подтвердил финансовую целесообразность строительства солнечной электростанции. Расчеты показали, что при установленном тарифе на реализацию электроэнергии проектируемая СФЭС обеспечит значительный экономический эффект и окупится в течение 5 лет эксплуатации. Дополнительный доход может быть получен за счет механизма торговли квотами на выбросы  $\text{CO}_2$ , что еще более укрепляет инвестиционную привлекательность проекта.

Таким образом, предложенный подход к развитию солнечной энергетики в Тартусе может стать основой для формирования стратегии устойчивого развития электроэнергетики в регионе. Полученные результаты могут быть использованы при разработке государственной программы поддержки возобновляемых источников энергии, а также при планировании новых объектов генерации с учетом климатических и экономических особенностей Сирии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фади А. Крупномасштабные проекты ВИЭ в Сирии — анализ институциональной и правовой структуры с учетом опыта Египта: магистерская диссертация / А. Фади. — Каир — Египет, Каирский университет и университет Касселя, февраль 2011. — 89 с.
2. Аль-Мохамад А. Возобновляемые источники энергии в Сирии / А. Аль-Мохамад // *Renewable Energy*. — 2001. — Т. 24. — С. 365–371.
3. Рамадан А. Обоснование параметров систем энергоснабжения на основе ВИЭ для условий Сирии: дис. канд. техн. наук: 05.14.08 / А. Рамадан. — СПб., 2020. — 183 с.
4. Удинцев Д. Н. Выбор числа и мощности генерирующего оборудования энергоцентров в автономных системах электроснабжения и в системах с распределенной генерацией / Д. Н. Удинцев, Г. В. Шведов, М. Е. Шонин // *Энергетик*. — 2020. — № 2.
5. Клевер М. Проектирование и моделирование сетевой фотоэлектрической системы в Южной Африке: технические, коммерческие и экономические аспекты: магистерская диссертация / М. Клевер. — Норвежский университет наук о жизни, 2018.
6. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии. Затраты на выработку электроэнергии на основе ВИЭ в 2023 году. — URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (дата обращения: 12.04.2024).
7. Рамадан А. Техничко-экономическая оценка сетевой солнечной фотоэлектрической станции в Сирии / А. Рамадан, В. Элистратов // *Applied Solar Energy*. — 2019. — Т. 55. — Вып. 3. — С. 174–188.
8. Министерство электроэнергии Сирии. — URL: <http://www.moe.gov.sy> (дата обращения: 12.04.2024).
9. Платформа финансовых рынков. — URL: <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions> (дата обращения: 12.04.2024).

Дата поступления: 21.11.2024

Решение о публикации: 20.02.2025

### Контактная информация:

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; [mx\\_sh@mail.ru](mailto:mx_sh@mail.ru)

РАДИ Мангаль Рияд — аспирант; [manhalradi67@gmail.com](mailto:manhalradi67@gmail.com)

# A Techno-Economic Analysis of the Integration of Solar Power Plants into the Tartus Power System (Syrian Arab Republic)

M. V. Shevlyugin, M. R. Radi

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), 9, bld. 9, GSP-4, Obratsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Shevlyugin M. V., Radi M. R. A Techno-Economic Analysis of the Integration of Solar Power Plants into the Tartus Power System (Syrian Arab Republic). *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 201–210. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-201-210

## Summary

**Purpose:** To conduct a techno-economic analysis of integrating solar power plants into the power system of the city of Tartus to enhance its sustainability and efficiency. In the context of energy scarcity and energy supply instability caused by warfare and destruction of energy infrastructure, the introduction of renewable energy sources (RES), in particular solar energy is seen as a promising solution. **Methods:** This study involves analyzing data on the current state of the city's power system, modelling the integration of the solar plants into the existing power grid, and assessing the economic feasibility of solar power plant implementation. The evaluation uses technical parameters of solar panels along with economic indicators related to installation and operational costs. **Results:** Integrating solar energy plants could significantly improve power reliability in Tartus, reduce fuel costs, and lower CO<sub>2</sub> emissions. The proposed solutions aim at reducing the region's dependency on centralized electricity supplies and enhancing grid stability. **Practical significance:** The research results can be used as a basis for the development and implementation of an energy infrastructure modernization programme in Tartus, as well as in other cities in Syria. Implementing solar power plants as part of a distributed power generation strategy presents an effective means of addressing the regional energy crisis and supporting sustainable energy development.

**Keywords:** Solar energy, distributed generation, techno-economic analysis, Tartus energy system, renewable energy sources (RES).

## References

1. Fadi A. Krupnomasshtabnye proekty VIE v Sirii — analiz institutsional'noy i pravovoy struktury s uchetom opyta Egipta: masterskaya dissertatsiya [Large-scale renewable energy projects in Syria — an analysis of the institutional and legal framework based on the experience of Egypt: master's thesis]. *Kair — Egipet, Kairskiy universitet i universitet Kasselya, fevral' 2011*, 89 p. (In Russian)
2. Al'-Mokhamad A. *Vozobnovlyaemye istochniki energii v Sirii* [Renewable energy sources in Syria]. *Renewable Energy*, 2001, vol. 24, pp. 365–371. (In Russian)
3. Ramadan A. *Obosnovanie parametrov sistem energosnabzheniya na osnove VIE dlya usloviy Sirii: dis. kand. tekhn. nauk: 05.14.08* [Justification of the parameters of energy supply systems based on renewable energy sources for the conditions of Syria: dis. candidate of technical sciences: 05.14.08]. St. Petersburg, 2020, 183 p. (In Russian)

4. Udintsev D. N., Shvedov G. V., Shonin M. E. Vybora chisla i moshchnosti generiruyushchego oborudovaniya energotsentrov v avtonomnykh sistemakh elektrosnabzheniya i v sistemakh s raspredelennoy generatsiey [Selection of the number and capacity of generating equipment of power centers in autonomous power supply systems and in systems with distributed generation]. *Energetik*, 2020, Iss. 2. (In Russian)

5. Klever M. *Proektirovanie i modelirovanie setevoy fotoelektricheskoy sistemy v Yuzhnoy Afrike: tekhnicheskie, kommercheskie i ekonomicheskie aspekty: masterskaya dissertatsiya* [Design and modeling of a grid-tied photovoltaic system in South Africa: technical, commercial and economic aspects: Master's thesis]. Norvezhskiy universitet nauk o zhizni Publ., 2018. (In Russian)

6. *Mezhdunarodnoe agentstvo po vozobnovlyаемым istochnikam energii. Zatraty na vyrabotku elektroenergii na osnove VIE v 2023 godu* [International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Generation Costs in 2023]. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (accessed: April 12, 2024). (In Russian)

7. Ramadan A., Elistratov V. *Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka setevoy solnechnoy fotoelektricheskoy stantsii v Sirii* [Feasibility Study of On-Grid Solar Photovoltaic Power Plant in Syria]. *Applied Solar Energy*, 2019, vol. 55, Iss. 3, pp. 174–188. (In Russian)

8. *Ministerstvo elektroenergii Sirii* [Ministry of Electricity of Syria]. Available at: <http://www.moe.gov.sy> (accessed: April 12, 2024). (In Russian)

9. *Platforma finansovykh rynkov* [Financial Markets Platform]. Available at: <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions> (accessed: April 12, 2024). (In Russian)

Received: November 21, 2024

Accepted: February 20, 2025

**Author's information:**

Maksim V. SHEVLYUGIN — PhD in Engineering, Associate Professor; mx\_sh@mail.ru

Mingal R. RADI — Postgraduate Student; manhalradi67@gmail.com