

Придорожные солнечные электростанции с водяным тепловым аккумулятором и тепловыми насосами

Roadside Solar Power Plants with Water-Based Thermal Energy Storage and Heat Pumps

Д-р С. Розенберг, Лод, Израиль,
Новая Израильская Ассоциация Наук
Email: semyon.rozenberg@gmail.com, [тел. + \(972\) 524854666](tel:+972524854666)

Rozenberg Simyon Ph.D., Lod, Israel,
New Israel Science Association
Email: semyon.rozenberg@gmail.com, tel. + (972) 524854666

Аннотация

В работе рассматривается система аккумулирования энергии для придорожных солнечных электростанций (СЭС), основанная на использовании водяного теплового накопителя и теплового насоса.

Главная цель комплекса — накопление той части солнечной энергии, которая не поступает в электросеть в течение солнечного дня, и последующая передача этой энергии в сеть ночью.

В отличие от традиционного подхода, в котором эффективность хранения оценивается исключительно по КПД полного цикла, в данной работе предлагается оценивать эффективность комплекса по общему объему электроэнергии, фактически поглощенной сетью за 24 часа. Показано, что благодаря использованию теплового насоса и работе всех тепловых машин строго в оптимальных режимах может быть достигнут высокий энергетический и экономический эффект, достигающий 75% от ранее ограниченной солнечной энергии, даже при умеренной эффективности преобразования.

В статье описывается состав комплекса, режимы его работы в дневное и ночное время, результаты термодинамического анализа, оценка эффективности использования электроэнергии, приблизительные капитальные затраты и экологические преимущества по сравнению с электрохимическими батареями. Удельная стоимость хранения энергии оценивается в 5–10 раз ниже, чем у электрохимических батарей: капитальные затраты \approx 34 долл. США/кВт·ч или 500 долл. США/кВт, в то время как стоимость электроэнергии в ночное время составляет приблизительно 1 цент/кВт·ч при предполагаемом сроке службы накопителя 30–50 лет.

Abstract

This paper presents an energy storage system for roadside solar power plants (SPPs) based on the use of a water-based thermal energy storage and a heat pump. The main goal of the complex is to accumulate that portion of solar energy that the power grid does not receive during the sunny day, and then transfer this energy to the grid at night.

Unlike the conventional approach, in which storage efficiency is evaluated exclusively by round-trip efficiency, this work proposes to assess the effectiveness of the Complex by the total electrical energy actually absorbed by the grid over a 24-hour period. It is shown that, due to the use of a heat pump and the operation of all thermal machines strictly in optimal regimes, a high energy and economic effect of up to **75% of previously curtailed solar energy** can be achieved, even with moderate conversion efficiencies.

The paper describes the composition of the Complex, its operating modes during daytime and nighttime, the results of thermodynamic analysis, an evaluation of electrical energy efficiency, approximate capital expenditures, and environmental advantages compared to electrochemical batteries. The specific cost of energy storage is estimated to be 5–10 times lower than that of electrochemical batteries: CAPEX \approx 34 USD/kWh or 500 USD/kW, while the cost of nighttime electricity is approximately 1 cent/kWh, assuming a storage lifetime of 30–50 years.

1. Введение

Масштабное внедрение солнечной генерации приводит к хорошо известной проблеме: в дневные часы электрическая сеть не всегда способна принять всю вырабатываемую энергию. В результате часть солнечной энергии принудительно ограничивается (curtailment) и фактически теряется.

Особенно остро эта проблема проявляется для протяжённых придорожных солнечных электростанций, размещаемых в полосах отвода автомобильных дорог. Такие СЭС обладают значительным потенциалом генерации, но сеть не всегда способна принять всю вырабатываемую энергию.

В работах автора [1, 2] предложена концепция аккумулирования солнечной энергии с использованием воды как долговечного и дешёвого носителя энергии. Настоящая статья развивает эту концепцию применительно к придорожным СЭС и акцентирует внимание на энергетическом и экономическом эффекте, а не только на формальном КПД. Таким образом, проблема curtailment является не только энергетической, но и прямой экономической потерей для владельца СЭС.

Для сокращения объёма статьи подробные выводы и расчётные зависимости даны со ссылками на ранее опубликованные работы автора [1, 2].

2. Современное состояние дел

В настоящее время основным способом аккумулирования энергии солнечных электростанций являются электрохимические аккумуляторы. При всех их достоинствах они обладают рядом фундаментальных ограничений:

- высокая стоимость хранения энергии (US\$ 200-300/кВт·ч);
- ограниченный срок службы (8–12 лет);
- пожаро- и взрывоопасность;
- использование дефицитных материалов (Li, Co, Ni),
- сложности при утилизации по окончании срока службы.

Эти факторы осложняют использование аккумуляторов для протяжённых энергетических объектов, рассчитанных на срок службы 30–50 лет.

3. Состав и принцип работы Комплекса

Комплекс включает следующие основные элементы:

- солнечные панели, размещённые вдоль автомобильной дороги;
- тепловой насос;
- горячая зона- бак с горячей водой и холодная зона- радиатор;
- поршневые машины - компрессор и детандер;
- электрогенератор.

Накопление энергии осуществляется в виде тепловой энергии воды при повышенной температуре.

Структурная схема Комплекса показана на Рисунке

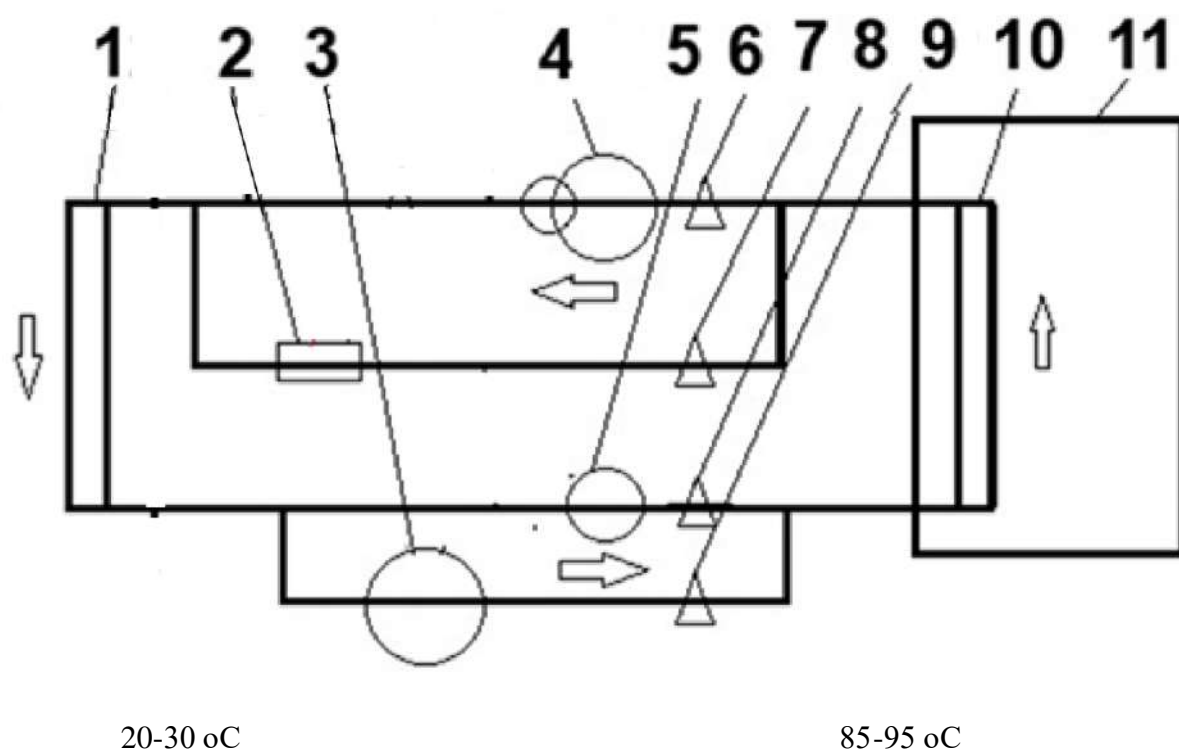


Рис. 1

Обозначения на Рисунке:

1 - воздушный радиатор, 2- дроссель, 3- поршневой компрессор,
4 - поршневой детандер с электрогенератором, 5 - насос хладагента,
6, 7, 8, 9 - клапан, 10 - теплообменник, 11 - бак горячей воды.

Компрессор и детандер работают на хладагентах в замкнутых контурах. Солнечные панели и инвертор на схеме не показаны.

4. Режимы работы Комплекса

4.1. Дневной режим

В дневные часы солнечная энергия: частично передаётся в сеть напрямую, избыточная энергия направляется на привод теплового насоса. Тепловой насос переносит тепловую энергию и аккумулирует её в воде, создавая температурную разность между горячей и холодной зонами накопителя. Ключевой момент: каждый 1 кВт·ч электроэнергии, не принятой сетью, преобразуется тепловым насосом в 4–5 кВт·ч запасённой тепловой энергии ($COP = 4-5$). Дальнейшее преобразование тепловой энергии в электроэнергию сопровождается неизбежными потерями, учитываемыми в разделе 5.

4.2. Ночной режим

В ночные часы: тепловая энергия воды используется для привода поршневого детандера; детандер вращает электрогенератор; электроэнергия передаётся в сеть. Таким образом, Комплекс обеспечивает выдачу энергии в часы, когда солнечная генерация отсутствует.

5. Выбор КПД и термодинамический анализ

Все тепловые машины Комплекса работают только в оптимальных режимах: либо номинальная нагрузка; либо полное отключение. Частичные режимы отсутствуют.

Например, исходя из потребностей сети автоматика или операторы включают только некоторые Комплексы, остальные отключают.

Поэтому для расчётов используются значения КПД, достигнутые в серийных или опытно-промышленных установках при номинальных режимах работы, реализованные в промышленной практике:

тепловой насос: $COP = 4.0-5.0$ (малые температурные напоры);

поршневой компрессор: $\eta \approx 0.65-0.70$;

поршневой детандер с генератором: $\eta \approx 0.60-0.65$.

Подробный термодинамический анализ циклов приведён в [1, Приложение 2].

6. Электроэнергетическая эффективность

Принципиально важно, что эффективность Комплекса определяется не только ночным возвратом энергии, а суммарной энергией, реально принятой сетью: $E\{\text{сут}\} = E\{\text{день}\} + E\{\text{ночь}\}$.

Использование теплового насоса позволяет существенно увеличить величину ($E\{\text{ночь}\}$), так как аккумулируется не электроэнергия, а тепловая энергия, равная электроэнергии, умноженной на COP.

В результате суммарная энергия, полученная сетью за сутки, оказывается значительно выше, чем в случае отсутствия накопителя или при простом ограничении генерации. При отсутствии накопителя избыточная дневная генерация полностью теряется, тогда как в предлагаемом Комплексе значительная её часть возвращается в сеть в ночные часы.

7. Основные характеристики Комплекса (оценочно)

- срок службы: **30–50 лет**;
- число циклов: практически не ограничено;
- накопитель энергии: обычная вода;
- удельная стоимость хранения энергии в 5–10 раз ниже, чем у электрохимических аккумуляторов аналогичной энергетической ёмкости [1]: капитальные затраты (CAPEX)=34 \$/кВтч или 500 \$/кВт, цена ночной энергии составляет 1 ¢/кВтч [1, пункт 10.5];
- масштабируемость: линейная вдоль дорог.

Оценки стоимости и расчёты приведены в [1, Приложение 3, пункт 10].

8. Экологические особенности

Комплекс обладает следующими экологическими преимуществами:

- более 100 лет успешной эксплуатации холодильных циклов,
- отсутствие пожароопасных элементов;
- отсутствие токсичных электролитов;
- отсутствие дефицитных материалов;
- простая утилизация по окончании срока службы.

Это особенно важно для размещения вдоль автомобильных дорог и вблизи населённых пунктов.

9. Заключение

Придорожные солнечные электростанции, оснащенные водяным тепловыми накопителями и тепловыми насосами, позволяют эффективно аккумулировать избыточную дневную солнечную генерацию, которая без накопителя была бы потеряна. Предложенный Комплекс представляет собой реальную альтернативу электрохимическим аккумуляторам для крупномасштабных придорожных СЭС.

В Израиле солнечные электростанции общей площадью 50–100 км² потенциально могут быть развернуты вдоль нескольких тысяч километров автомагистралей. Все компоненты комплекса основаны на серийных или хорошо зарекомендовавших себя технических решениях и на более чем 100-летнем опыте успешной работы в рамках холодильного цикла.

Комплекс также может быть использован для преобразования существующих солнечных электростанций в круглосуточные источники энергии. По состоянию на 2025 год установленная мощность солнечных электростанций в мире превышает 1400 ГВт, в то время как мощность систем хранения энергии, по прогнозам, к 2030 году достигнет лишь 345 ГВт, что указывает на потенциальный рынок рассмотренной технологии хранения энергии объемом около 1000 ГВт.

Литература

- [1] Rosenberg S. *Water Accumulation of Energy for Roadside Solar Power Plants*, 2025. <https://netanyascientific.com/English/Stati/Stati-7/data/Wae7.pdf>
- [2]. Rosenberg S. *Water Accumulation of Energy Using Heat Pumps and Piston Machines*, 2025. <https://netanyascientific.com/English/Stati/Stati-7/data/Waehphb.pdf>