

**ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БЕЗДРОВОЇ
ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ**

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна; e-mail: svod.itm@gmail.com*

Останнім часом одним з актуальних напрямів в науці й техніці стали дослідження щодо бездротової передачі енергії на відстань. Метою роботи є огляд та аналіз досліджень, присвячених розробленню систем бездротової передачі енергії на відстань, а також досліджень щодо проєктування та розробки космічних сонячних електростанцій. Можливість створення і доцільність практичного використання систем бездротової передачі енергії була підтверджена результатами демонстраційних експериментів, практичними випробуваннями, огляд та аналіз яких наведений в даній статті. Системи бездротової передачі енергії знайшли успішне застосування у різних галузях для вирішення багатьох задач. Розглянуто питання щодо бездротового енергопостачання у важкодоступні райони земної поверхні, бездротового енергоживлення безпілотних літальних апаратів. Однією з важливих проблем для людства була й залишається проблема вичерпності традиційних енергетичних ресурсів. У зв'язку з цим особливе місце займають дослідження щодо використання сонячної енергії. Тому на даний час значна увага приділяється задачам розробки та застосування космічних сонячних електростанцій з безконтактною передачею електроенергії на Землю або на космічні апарати та перспективні космічні системи, наприклад, космічні промислові платформи. Це питання має досить глибоке науково-теоретичне опрацювання. Можливість будівництва космічних сонячних електростанцій вивчається фахівцями різних країн, в тому числі США, Японії, Китаю, Великої Британії. У статті наведено огляд проєктів та проаналізовано сучасний стан досліджень щодо розробки космічних сонячних електростанцій. Реалізація проєктів космічних сонячних електростанцій дозволить вирішити одночасно декілька проблем: проблему глобальної енергетичної кризи, проблему екологічних та кліматичних наслідків впливу традиційної енергетики на довкілля. Застосування космічних сонячних електростанцій з безконтактною передачею енергії дасть можливість вирішення важливих задач, серед яких: високий рівень електропостачання наземним споживачам, ефективне енергозабезпечення довготривалих масштабних космічних проєктів, промислове виробництво в космосі, очищення навколосемного простору від космічного сміття.

Ключові слова: *бездротова передача енергії, космічні сонячні електростанції, бездротове енергоживлення, енергетичні космічні апарати.*

Recently, studies on wireless power transmission have become a topical line in science and technology. This paper overviews and analyzes studies on the development of wireless power transmission and on the design and development of space solar stations. The results of demonstration experiments and practical tests overviewed in the paper confirm the feasibility and practical advisability of wireless power transmission systems. These systems have found successful use in different areas in the solution of numerous problems. The paper considers the wireless power supply of hard-to-reach regions and manned aerial vehicles. One of the important problems facing mankind has been and remains the exhaustibility of traditional power resources. In this connection, of special interest are studies on the use of solar energy. Because of this, particular attention is now paid to the development and use of space solar power stations with wireless power transmission to the Earth or spacecraft and prospective space systems, for example, space industrial platforms. This issue has been developed theoretically to sufficient depth. The feasibility of space solar power stations is under study in different countries, including the USA, Japan, China, and Great Britain. The paper overviews projects of space power stations and analyzes the state of the art in their development. The implementation of these projects will make it possible to solve several problems at a time: the problem of the global energy crisis and the problem of the ecological and climatic impact of traditional power generation. Space solar power stations with wireless energy transmission will make it possible to solve important problems, among which are a high-level power supply of ground users, an efficient power supply of long-term large-scale space projects, industrial production in space, and space debris removal from near-Earth space.

Keywords: *wireless power transmission, space solar power stations, wireless power supply, power spacecraft.*

Вступ. Останнім часом одним із актуальних напрямів в науці й техніці стали дослідження щодо бездротової передачі енергії на відстань. Ідея бездротової передачі енергії вперше була запропонована у 1899 році М. Теслою, а практичне втілення отримала в 60-і роки ХХ століття. Можливість створення і доцільність практичного використання систем бездротової передачі енергії була підтверджена результатами демонстраційних експериментів, огляд яких наведений в даній статті. Ці експерименти стали важливими досягненнями у галузі бездротової передачі енергії [1].

Розроблення інноваційних технологій, створення систем бездротової передачі енергії знайшли успішне застосування у різних галузях для вирішення багатьох задач. Зокрема таких: застосування бездротових зарядних пристроїв для мобільних телефонів, планшетів, різних пристроїв побутової електроніки, бездротова зарядка акумуляторів електромобілів; використання в медицині, зокрема для бездротового живлення систем моніторингу здоров'я людини та біоелектронних пристроїв, які імплантуються у тіло людини; бездротове енергопостачання до важкодоступних наземних об'єктів, застосування систем бездротового енергоживлення безпілотних літальних апаратів та дирижаблів, енергоживлення космічних апаратів та космічних індустріальних платформ; безконтактна передача енергії з космічних сонячних електростанцій.

Однією з важливих проблем для людства була й залишається проблема вичерпності традиційних енергетичних ресурсів. У зв'язку з цим особливе місце займають дослідження щодо використання сонячної енергії. Її привабливість полягає в економічній ефективності та екологічній чистоті. У зв'язку з цим великий інтерес мали революційні пропозиції щодо використання сонячної енергії в концепції космічної сонячної електростанції, висловлені в 70–80-ті роки ХХ століття П. Глейзером [2, 3].

Проблема застосування космічних сонячних електростанцій (КСЕС) з безконтактною передачею електроенергії на Землю або на космічні апарати та перспективні космічні системи, наприклад, космічні промислові платформи є актуальною й на даний час. Це питання має досить глибоке науково-теоретичне опрацювання. Можливість будівництва КСЕС вивчається фахівцями різних країн, в тому числі США, Японії, Китаю, Великої Британії. У статті наведено огляд проєктів та проаналізовано сучасний стан досліджень щодо проєктування та розробки космічних сонячних електростанцій.

Однак, створення та введення в експлуатацію КСЕС – це дуже дорогі проєкти, які економічно виправдовують себе не відразу. Тому для початку реалізації таких дорогих та великомасштабних проєктів необхідно було наростити технологічний та науковий потенціал шляхом відпрацювання технологій та пристроїв бездротової передачі енергії на прикладі менш дорогих розробок, а вже потім на експериментальних зразках КСЕС з бездротовою передачею енергії на Землю або на космічні апарати чи космічні індустріальні платформи.

Постановка задачі. Сучасний рівень споживання земних ресурсів у недалекому майбутньому може призвести до настання криз: енергетичної, екологічної та ін. Вже понад сто років дослідниками та фахівцями різних країн проводяться дослідження, що дозволять вирішити проблему бездротової передачі енергії на відстань. На даний час фахівцями провідних

космічних держав вивчається можливість будівництва космічних сонячних електростанцій. Основною задачею цього дослідження є огляд стану розроблення систем бездротової передачі енергії на відстань, а також сучасного стану розроблення проєктів космічних сонячних електростанцій, реалізація й застосування яких дозволять частково вирішити проблему енергетичної кризи.

Метою даної статті є огляд та аналіз досліджень, присвячених розробленню систем бездротової передачі енергії на відстань, а також досліджень щодо проєктування та розробки космічних сонячних електростанцій з безконтактною передачею електроенергії споживачам на Землю або на космічні апарати та перспективні космічні системи, наприклад, космічні промислові платформи.

Експерименти з бездротової передачі енергії мікрохвильовим променем на відстань. Ідея бездротової передачі енергії вперше була запропонована у 1899 р. М. Теслою. Однак, у ті роки він не зміг знайти шляхи її практичного вирішення. Практичне втілення ідея бездротової передачі енергії мікрохвильовим променем отримала в 60-і роки ХХ ст. у період розвитку радіолокації, освоєння мікрохвильового діапазону хвиль, винаходу В. Брауном антени-випрямляча (ректени) [1].

Можливість створення і доцільність практичного використання систем бездротової передачі енергії була підтверджена результатами демонстраційних експериментів та практичними випробуваннями. Першою такою демонстрацією під керівництвом В. Брауна в 1964 році був політ літального апарата, що живився мікрохвильовим променем, який безперервно залишався в повітрі на висоті 18 метрів протягом 10 годин. В експерименті використовувалася ректена з кремнієвими випрямляючими діодами, які мали низький коефіцієнт корисної дії (ККД). Під час другої демонстрації польоту вертольоту було застосовано ректени з діодами Шоттки, завдяки цьому вдалося підвищити ККД. В експерименті В. Брауна вперше використовувалися електронні системи наведення мікрохвильового променя на апертуру ректени. В. Браун вважав, що передача енергії мікрохвильовим променем буде технологічним проривом в організації руху літальних апаратів. Також було проведено лабораторне дослідження з бездротової передачі енергії, в результаті якого була доведена можливість досягнення 54 % ККД систем бездротової передачі енергії з урахуванням ККД перетворення енергії первинного джерела постійного струму в енергію надвисокої частоти (НВЧ) [1, 4].

У 1975 р. в Голдстоуні (США) Брауном і Дікінсоном було проведено великомасштабний полігонний експеримент із передачі 30 кВт НВЧ-потужності на відстань 1,6 км (рисунок 1). Ректена містила приблизно п'ять тисяч приймально-випрямляючих елементів, кожен з яких перетворював 6 Вт НВЧ-потужності. ККД ректени становив 82 % [1].

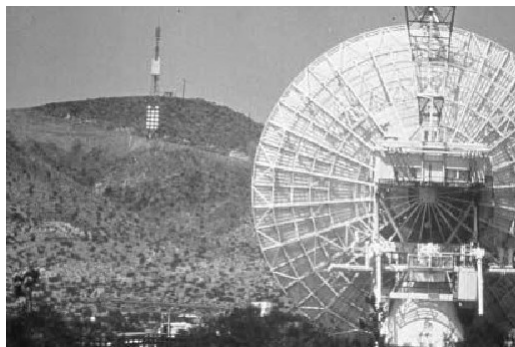


Рис. 1 – Експеримент з бездротової передачі енергії, який був проведений в 1975 році в Голдстоуні (США) [1]

У 1997 році було реалізовано французький проєкт Grand Bassin бездротового енергопостачання у важкодоступні райони земної поверхні. Бездротове енергопостачання мікрохвильовим променем на відстань 700 м здійснювалося на острові Реюньйон у селі Гранд Басін. Потужність передачі становила 10 кВт, а ККД 57 %. В цьому випадку було обрано технологію бездротової передачі енергії, так як село Гранд Басін розташовувалося в глибокому кратері згаслого вулкана, де монтаж звичайних силових кабелів був ускладнений через складність рельєфу і високу вартість робіт, а використання сонячних батарей малоефективне. На рисунку 2 зображена ректена, розроблена для проєкту Grand Bassin [5].

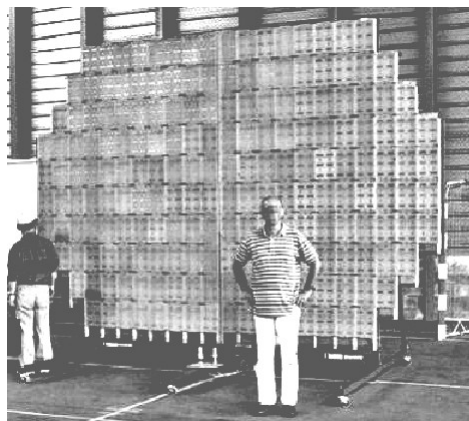


Рис. 2 – Ректена, що використовується у французькому проєкті Grand Bassin [5]

Бездротове енергоживлення БПЛА. В даний час у світі спостерігається підвищений інтерес до використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зокрема до досліджень з бездротового енергопостачання БПЛА мікрохвильовим променем. Цей спосіб енергопостачання БПЛА є перспективним, тому що при цьому збільшується тривалість польоту, а також може бути зменшена маса та габарити БПЛА, що дозволить збільшити масу корисного навантаження, зокрема встановити додаткове обладнання. А, як відомо, вимоги щодо збільшення тривалості польоту БПЛА та зниження його масово-габаритних характеристик є важливими завданнями при використанні БПЛА як у цивільних, так і у військових цілях.

Канадські фахівці розробили та в 1987 році провели випробування стратосферної ретрансляційної платформи SHARP (Stationary High Altitude Relay Program). Ідея створення SHARP вперше виникла у 1980 році. Модель SHARP з розмахом крил 4,5 метра здійснила свій демонстраційний політ у жовтні 1987 року. БПЛА повільно кружляв протягом багатьох місяців по

замкнутій траєкторії на висоті 21 км і забезпечувався енергією з Землі мікрохвильовим пучком на частоті 5,8 ГГц (рисунок 3). Передавальна антенна система складалася з 260 параболоїдів з комбінованим управлінням променем, діаметр передавальної решітки – 80 м, випромінювана потужність – 500 кВт [6].

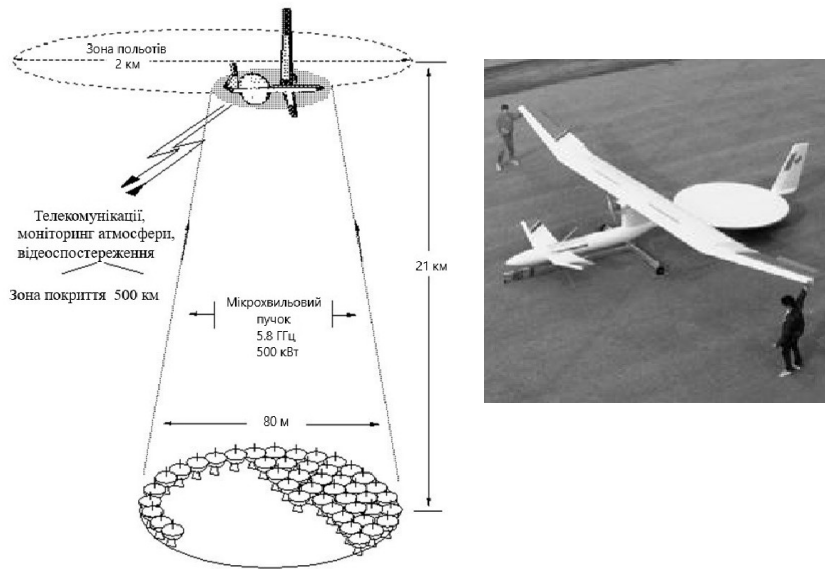


Рис. 3 – Модель і конфігурація системи SHARP [6]

В 1992 році був проведений експеримент MILAX (Microwave Lifted Airplane eXperiment) з бездротової передачі енергії на БПЛА, що рухався на висоті 10 м над поверхнею Землі, й на якому була встановлена 120-елементна ректенна решітка (рисунок 4) з ККД випрямлення 61 % та потужністю постійного струму 88 Вт. Передавальна фазована антенна решітка була встановлена на даху автомобіля [7].

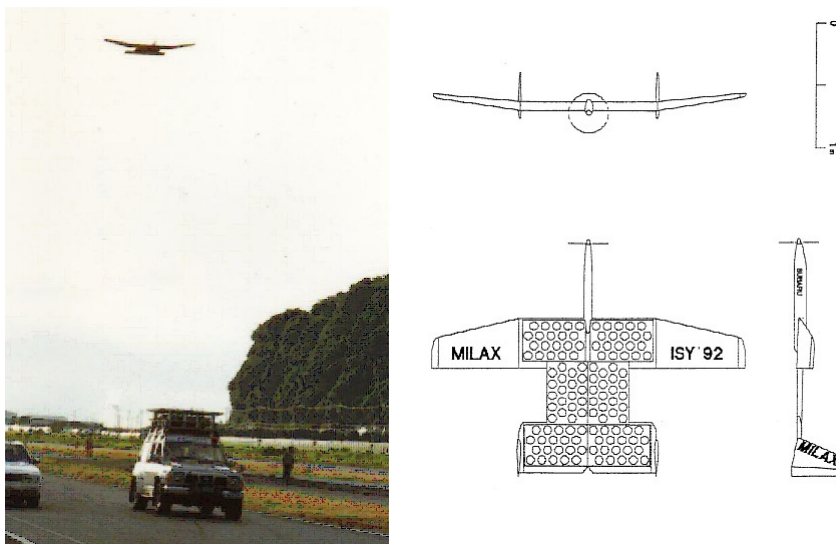


Рис. 4 – Експеримент з передачі енергії мікрохвильовим променем на БПЛА, що рухається [7]

У 1995 році для енергопостачання БПЛА японськими фахівцями в м. Кобе було проведено демонстраційний експеримент ETHER (Energy Transmission towards High altitude long endurance airship ExpeRiment) щодо передачі енергії на відстань 50 м на борт дирижабля за допомогою мікрохвильового променя. Довжина дирижабля становила 16 м, а діаметр – 6,6 м. Він був обладнаний двома електродвигунами, які живились енергією постійного струму, що подається від ректени розмірами $2,7 \times 3,4$ м, яка була встановлена на зовнішній поверхні дирижабля і опромінювалася електромагнітним полем на ортогональних поляризаціях потужністю 10 кВт на частоті 2,45 ГГц з поверхні Землі [8].

У 2008 році дослідницька група на чолі з Д. Манкінсом (США) та Н. Кая (Японія) за фінансової підтримки телевізійного каналу Дискавері провела експеримент з бездротової передачі енергії мікрохвильовим променем на відстань 148 км (Мауна Лоа, Гаваї). Переданий рівень потужності був близько 50 Вт [9].

Сонячна панель для передачі енергії із космосу успішно випробувана військовими США. Дослідницька лабораторія ВПС США (AFRL) і військово-промислова компанія Northrop Grumman в рамках проєкту з досліджень сонячної енергії в космосі SSPIDR у грудні 2021 року провели перші випробування розробленого обладнання (рис. 5). Представлений модуль складався з двох шарів. Перший шар – панель з вискоєфективних фотоелементів, які збирали сонячну енергію і забезпечували живлення другого шару, який, в свою чергу, складався з елементів, що перетворювали сонячну енергію на радіочастотну і формували промінь [10].

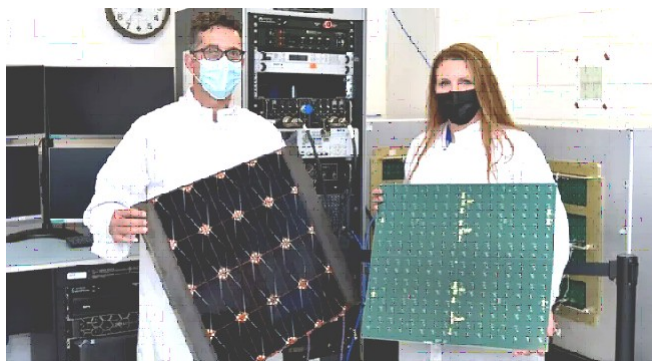


Рис. 5 – Інженери дослідницької лабораторії ВПС США (AFRL) та військово-промислової компанії Northrop Grumman провели випробування розробленого обладнання в рамках проєкту дослідження сонячної енергії в космосі SSPIDR [10]

У 2018 році AFRL уклала з Northrop Grumman контракт на суму понад 100 млн. доларів на розробку ключових компонентів прототипу орбітальної сонячної електростанції. Космічна сонячна панель стане основною частиною корисного навантаження для місії Agachne і згодом послужить будівельним блоком для великомасштабної операційної системи [10].

У березні 2021 року вчені з Пентагону успішно випробували невелику сонячну батарею, що є прототипом системи для збору енергії в космосі і відправлення її на Землю. Експериментальний фотоелектричний радіочастотний антенний модуль (PRAM) було запущено у травні 2020 року на орбітальному безпілотнику X-37B. Після успішних випробувань окремої

сонячної панелі для проєкту Arachne інженери мають намір побудувати блок площею 1 м^2 з перетворення сонячної енергії на радіовипромінювання. Очікується, що експеримент Arachne буде запущено у 2025 році [10].

Дослідження щодо можливості створення КСЕС. Дослідження щодо можливості створення та застосування космічних сонячних електростанцій має досить глибоке наукове опрацювання.

Вперше концепцію КСЕС було сформульовано та представлено доктором Пітером Глейзером [2, 3]. Згідно з концепцією Глейзера сонячне випромінювання збирається і перетворюється в мікрохвильову енергію за допомогою спеціальної системи, яку розміщено в космічному просторі (рис. 6). Потім мікрохвильова енергія передається на Землю й перетворюється в електричну енергію для розподілу.

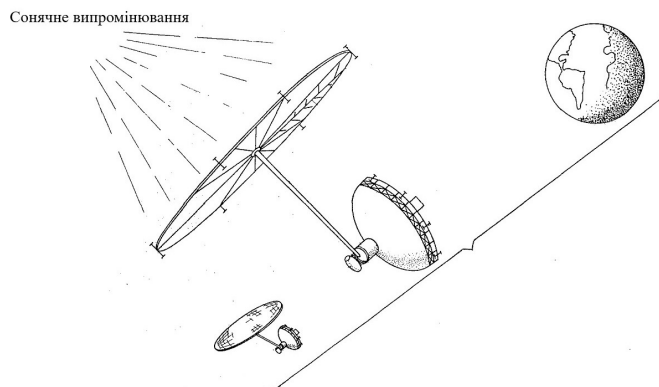


Рис. 6 – Концепція КСЕС Пітера Глейзера [3]

Космічна електростанція П. Глейзера була представлена у вигляді платформи розміром $5 \times 13 \text{ км}$ масою 12,3 тис. т з фотоперетворювачами з кристалічного кремнію з коефіцієнтом корисної дії 13,7 %. П. Глейзер запропонував розміщувати великі панелі сонячних батарей на геостационарній орбіті, а енергію, що виробляється ними, порядку (5–10) ГВт передавати на поверхню Землі сфокусованим пучком НВЧ-випромінювання, потім перетворювати її на енергію постійної або змінної частоти. Така схема дозволяє використовувати інтенсивний потік сонячного випромінювання $\sim 1,4 \text{ кВт/м}^2$, що існує на геостационарній орбіті, та передавати отриману енергію на поверхню Землі безперервно, незалежно від погодних умов та часу доби. За рахунок природного нахилу екваторіальної поверхні до поверхні екліптики з кутом $23,5^\circ$ супутник, розташований на геостационарній орбіті, висвітлений потоком сонячної радіації практично безперервно, крім невеликих відрізків часу – поблизу днів весняного і осіннього рівнодення, коли цей супутник потрапляє у тінь Землі (рис. 7). Такі проміжки часу можуть точно передбачатися й в сумі не перевищують 1 % від загальної тривалості року [2, 3].

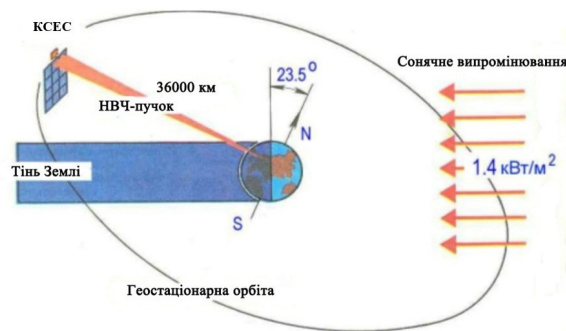


Рис. 7 – Загальна схема космічної сонячної електростанції

Частота електромагнітних коливань НВЧ-пучка повинна відповідати тим діапазонам, які виділені для використання у промисловості, наукових дослідженнях та медицині. Якщо ця частота обрана рівною 2,45 ГГц, то метеорологічні умови, включаючи густу хмарність та інтенсивні опади, практично не впливають на ККД передачі енергії.

З моменту представлення концепції Пітера Глейзера до нашого часу минуло понад півстоліття. За цей час провідні космічні держави розробили низку проєктів КСЕС.

Проекти КСЕС NASA. Національним управлінням з авіації та космонавтики і дослідження космічного простору (NASA) запропоновано концепцію КСЕС «Solar Power Satellite Concept» NASA/DOE [11], схему якої наведено на рисунку 8 [12]. Система «Solar Power Satellite Concept» потужністю 5 ГВт із великим масивом сонячних батарей площею 50 км на геостационарній орбіті, яка перетворює сонячне випромінювання в електричну енергію, що потім передається на Землю за допомогою мікрохвиль від антени діаметром 1 км. Мікрохвилі випрямляючою антеною діаметром 10 км збираються на Землі, а потім перетворюються в електричну енергію, яку можна подавати безпосередньо в електромережу на Землі [11], [12].



Рис. 8 – Концепція КСЕС «Solar Power Satellite Concept» [12]

Концепція КСЕС «Solar Power Satellite Concept» має декілька варіацій.

Зокрема, в рамках проєкта «Abacus» розроблено КСЕС потужністю 1,2 ГВт у вигляді інтегрованого симетричного концентратора, конструктивну схему якої наведено на рис. 9 [13]. КСЕС «Abacus» має конфігурацію подібну до КСЕС «Solar Power Satellite Concept», але вона менше, щоб наблизитися до більш керованої маси та масштабу для розгортання на орбіті та функціонування [13].

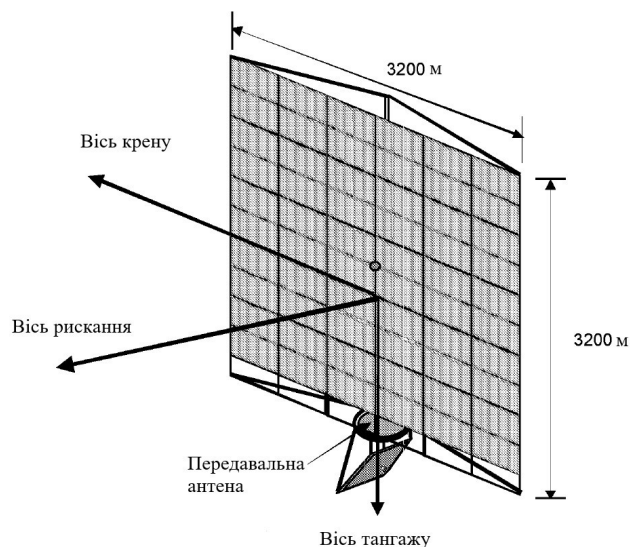


Рис. 9 – Концепція КСЕС «Abacus» [13]

Удосконалення схеми КСЕС відбувалось шляхом збільшення концентрації випромінювання та зменшення каркасної рами сонячної батареї. Також змінювалось компонування схеми КСЕС з метою виключення з конструкції громіздких тоководів. В жовтні 2007 року США вийшли з новою концепцією КСЕС «Інтегрований симетричний модуль-концентратор» (рисунок 10), що представляє собою 5-кілометрову конструкцію, в якій дві групи параболічних дзеркал через поворотні дзеркала концентрують сонячне випромінювання на високотемпературні фотоперетворювачі діаметром 500 м з арсеніду галію з ККД 35 %, конструктивно об'єднані з надвисокочастотним (НВЧ) перетворювачем та антеною, що транслює НВЧ-потік енергії на Землю [12]. Ця концепція КСЕС дозволяла зменшити площу дорогих фотоперетворювачів та виключити використання важких багатокілометрових кабельних тоководів. Разом з тим, ця концепція не пропонувала вирішення проблеми монтажу багатокілометрових конструкцій у космосі, виведення тисяч тон вантажів на геостационарну орбіту та створювала нові проблеми щодо забезпечення управління гігантськими концентраторами сонячного випромінювання з точністю їх наведення на фотоелектричну «мішень» не гірше $\pm 1,5^\circ$, та охолодження потужних електронних НВЧ-перетворювачів у безповітряному просторі. Після кількох років проєктного опрацювання фахівці NASA вважали цей проєкт технічно нереалізованим [12].

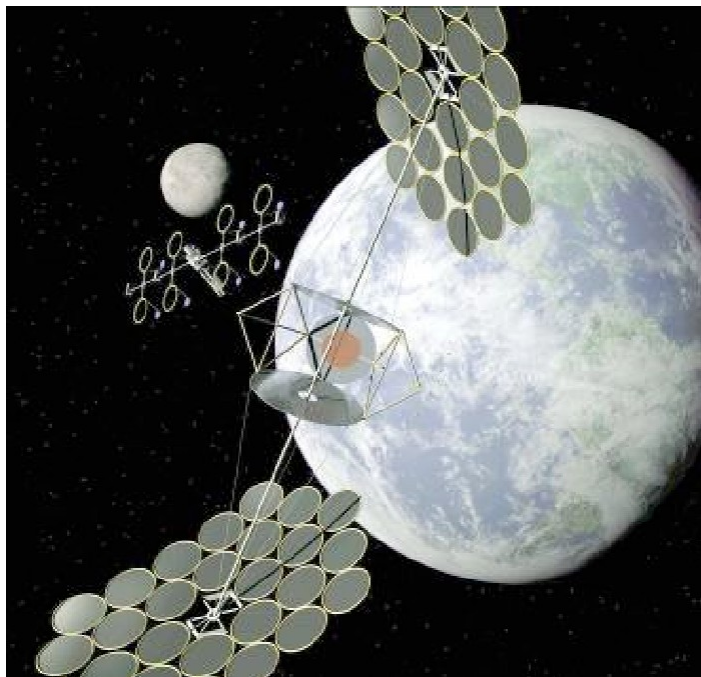


Рис. 10 – Концепція КСЕС «Інтегрований симетричний модуль-концентратор» [12]

Згодом концепція розміщення великих систем сонячної енергії супутника (SPS) у космосі стає однією з кількох нових технологічних варіантів, які можуть забезпечити великомасштабною екологічно чистою енергією базового навантаження наземного споживача. Концепція SPS була детально розглянута Міністерством енергетики США і NASA в кінці 1970-х років, й надалі вона удосконалювалася [12].

Тема космічної сонячної енергії (SSP) була повторно розглянута NASA в 1995–1997 роках у дослідженні «Свіжий погляд» («Fresh Look») і протягом 1998 року в SSP «Дослідження визначення концепції». Метою досліджень була оцінка доцільності створення КСЕС з урахуванням рівня розвитку технологій. В рамках дослідження «Свіжий погляд» було запропоновано проекти КСЕС «Сонячна вежа» («Sun Tower») (рис. 11) та «Сонячний диск» («SolarDisk») (рис. 12). За результатами цих досліджень у 1999–2000 роках NASA розпочало програму SSP Exploratory Research and Technology (SERT), яка проводила попередні стратегічні технологічні дослідження та розробки для створення великих багатомегаватних систем SSP та бездротової передачі електроенергії (WPT) для урядових місій і комерційних ринків (космічних та наземних). Протягом 2001–2002 років NASA проводило програму розвитку концепції та технології SSP (SCTM), яка продовжила діяльність SERT, з особливим акцентом на визначенні нових технологій із високим важелем, які могли б підвищити реалізацію майбутніх систем SSP [12].

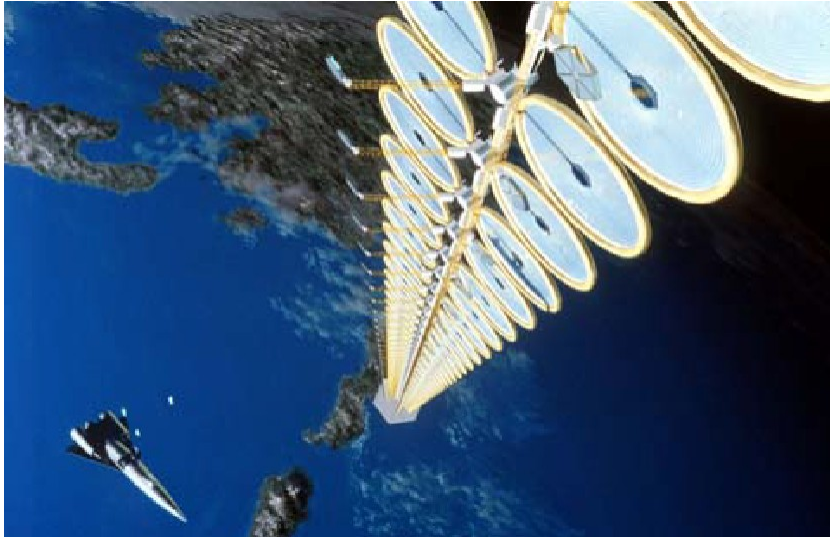


Рис. 11 – Проєкт КСЕС «Сонячна вежа» («Sun Tower») [12]

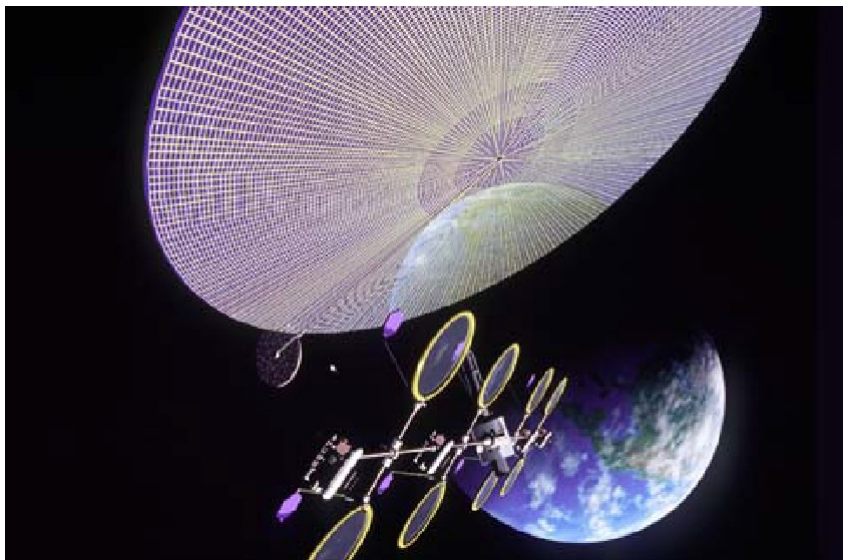


Рис. 12 – Проєкт КСЕС «Сонячний диск» («SolarDisk») [12]

В рамках програми NASA Innovative Advanced Concepts компанія Artemis Innovation Management Solutions LLC розробила проєкт КСЕС SPS-ALPHA (рис. 13) [14]. В рамках цього проєкту було проведено наскрізний систематичний аналіз концепції, який був запропонований для визначення її технічної здійсненності та архітектури концепції, а також проведення первісної оцінки економічної доцільності запропонованої концепції КСЕС. Запропоновано декілька конфігурацій КСЕС, діапазон потужностей яких для доставки енергії на Землю становить 100 МВт – 100 ГВт [14].

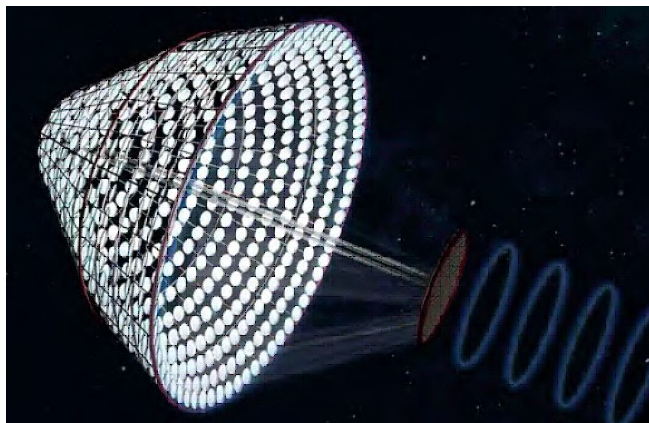


Рис. 13 – Проект КСЕС США SPS-Alpha [14]

Проекти КСЕС Японського космічного агентства. З початку 2000-х років в Японії проводяться дослідження щодо розробки конструкцій та макетів КСЕС, що демонструють процес передачі енергії з космосу на Землю від фотоперетворювачів до ректен [7, 15]. Діючий макет SPS2000 у виставочному залі Інституту космічних досліджень Японії представлено на рис. 14 [15].



Рис. 14 – Діючий макет SPS2000 у виставочному залі Інституту космічних досліджень Японії [15]

С. Сасакі та дослідницька група Японського космічного агентства представили поетапну програму створення комерційної КСЕС [16]. Для майбутнього комерційного використання запропоновано три принципові схеми КСЕС: базова НВЧ схема, покращена НВЧ схема та лазерна схема. Базова модель є генеруючою і випромінюючою панеллю, яка підвішена на чотирьох тросах і яка знаходиться в гравітаційній стабілізації (рис. 15). Ця схема досліджувалась в USEF (Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer) [16].

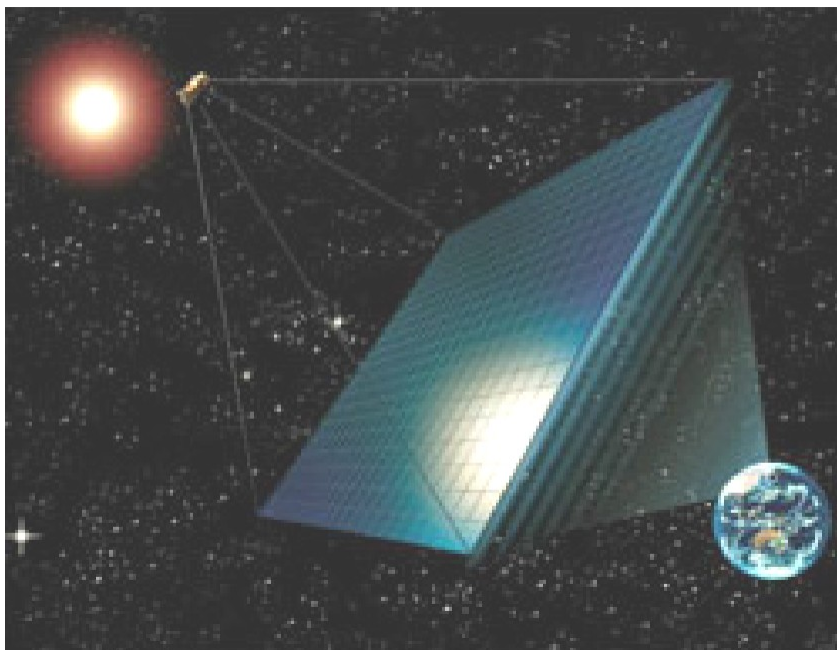


Рис. 15 – Базовий сегмент японської КЕСС [16]

Практична конфігурація японської КЕСС складається з великої кількості одиничних тросових панелей, що являють собою жорстку квадратну панель розміром 100×95 м і товщиною 0,1 м, яка підвішена за кути на чотирьох тросах довжиною (5–10) км, що виходять із одного контейнера розміром 10×15 м. Вага одиничної системи близько 5 т, випромінювана потужність 2,2 МВт. Було проведено відпрацювання технології виведення такої системи на орбіту. Слід зазначити, що японська схема значно ефективніша за американську, оскільки використовує гравітаційну стабілізацію та багатомодульну побудову [7, 16].

Проекти КЕСС Китаю. Китай планує побудувати першу в світі сонячну електростанцію в космосі. Китай вирішив прискорити свою програму зі створення сонячних електростанцій в космосі. Планується запускити амбітну програму космічних сонячних електростанцій у 2028 році – це на два роки раніше початкового графіка.

В оновленому плані, який опубліковано в рецензованому журналі China Space Science and Technology [17], зазначено про запуск супутника на висоту 400 км для тестування технології бездротової передачі енергії з космосу на Землю. В Китайській академії космічних технологій було проведено тестування технології бездротової передачі енергії (рисунок 16). Для початку потужність має досягти 10 кВт, що достатньо для задоволення потреб кількох домогосподарств. У документі заявлено, що супутник перетворюватиме сонячну енергію на мікрохвильове або лазерне випромінювання, а потім направлятиме енергетичні промені на різні цілі, зокрема, фіксовані точки на Землі й рухомі супутники [17].

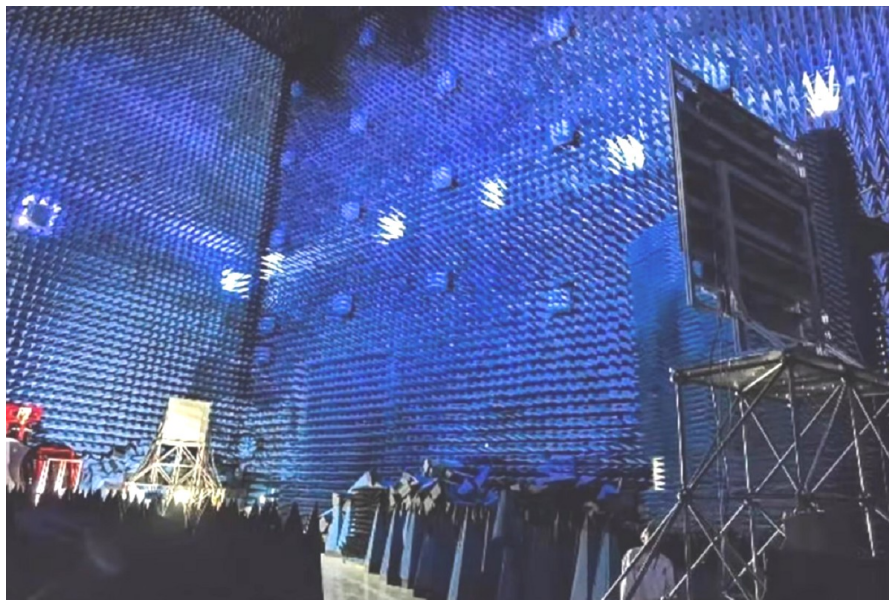


Рис. 16 – Китайська академія космічних технологій [17]

Вперше план про створення першої китайської сонячної електростанції в космосі було складено у 2014 році, але його було змінено. Згідно з новим планом КСЕС буде побудовано в чотири етапи. Відповідно до програми через два роки після першого запуску буде відправлено ще один потужніший супутник на геостационарну орбіту приблизно на висоту 36000 км над Землею для проведення додаткових експериментів. До 2035 року електростанція потужністю 10 МВт почне постачати енергію деяким військовим і цивільним споживачам. Очікується, що до 2050 року потужність станції зросте до 2 ГВт – це приблизно дорівнює потужності атомної електростанції, а вартість знизиться до комерційно доступного рівня [17].

Сіаньським Університетом електронної науки і техніки (Китай) запропонована концепція КСЕС «SSPS-OMEGA» – космічна сонячна електростанція з використанням мембранного масиву збору енергії у формі кулі [18]. Концепція «SSPS-OMEGA» має деякі технічні переваги в порівнянні з іншими концепціями, а саме: відсутність необхідності вбудованого регулювання основного відбивача, низькі вимоги до терморегулювання, провідна передача потужності від фотоелектричних ґрат до передаючої антени на невеликій відстані, легка сполучна структура відбивача та передавальної антени. «SSPS-OMEGA» – це концепція модульної сферичної системи, де сонячне світло збирається за допомогою основного відбивача, а енергія виробляється в серії фотоелектричних модулів. Електроенергія подається в мікрохвильові пристрої за допомогою електричних кабелів та струмопровідних з'єднань. На рис. 17 представлено зведену схему концепції «SSPS-OMEGA». Система «SSPS-OMEGA» складається з чотирьох основних елементів: сферичного сонячного колектора, масиву з гіперболоїдних фотоелектричних елементів, системи керування, розподільовача потужності та мікрохвильової антени передачі [18].

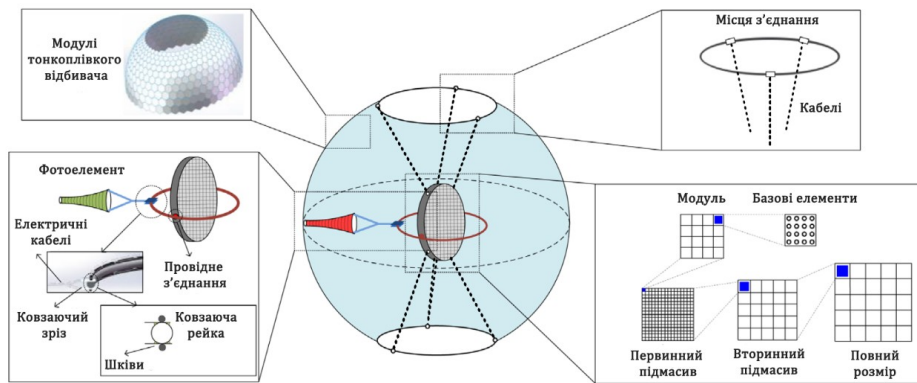


Рис. 17 – Зведена схема концепції «SSPS-OMEGA» [18]

«SSPS-OMEGA» – складний проєкт, який має довгострокову перспективу й може бути реалізований приблизно до 2050 року. Передбачається, що ця КЕСС буде здатна генерувати та передавати на Землю до 2 ГВт електроенергії [18].

Проєкт КЕСС Великої Британії. Уряд Великої Британії заявив, що розглядає пропозицію вартістю 17 мільярдів фунтів стерлінгів щодо запуску пілотної сонячної електростанції в космосі до 2035 року за допомогою різних європейських оборонних підрядників, зокрема, Airbus. На основі нещодавнього звіту Frazer-Nash Consultancy [19] розробка КЕСС Великої Британії вважається життєздатною концепцією. Очікується, що проєкт розпочнеться з невеликих випробувань, які призведуть до роботи КЕСС в 2040 році. Супутник сонячної енергії буде мати діаметр 1,7 км і важити близько 2000 тон. Розміри наземної антени – приблизно 6,7 км x 13 км. Передбачається, що потужність КЕСС буде 2 ГВт [19].

Український проєкт з угрупованням енергетичних космічних апаратів. В даний час індустріалізація космосу є одним із перспективних напрямів розвитку промисловості в світі й, зокрема, в Україні. Розробка технологій космічної індустрії дозволить вирішити низку проблем виробництва унікальної продукції, що не була доступна в земних умовах. Але з огляду на те, що для виготовлення тієї чи іншої продукції необхідна певна кількість електроенергії й деякі технологічні процеси космічної індустрії можуть споживати значну кількість електроенергії, власних систем генерації енергії космічної індустріальної платформи може не вистачати. Тому для вирішення такої задачі фахівцями Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (м. Дніпро) був запропонований проєкт застосування додаткових енергетичних ресурсів шляхом розробки розподіленої системи живлення космічної індустріальної платформи. Згідно з проєктом передбачається наявність угруповання енергетичних космічних апаратів, що збирають, акумулюють і передають безконтактним шляхом електроенергію на апарати-приймачі космічної індустріальної платформи [20].

Структурно розподілена енергетична система складається з угруповання енергетичних космічних апаратів, приймаючого космічного апарата з установленою на ньому антеною-ректеною, які розміщено поблизу космічної індустріальної платформи. На рисунку 18 наведено схему функціонування розподіленої енергетичної системи космічної індустріальної платформи [20].

Передбачається, що енергетичні космічні апарати мають включати такі основні системи: система забезпечення теплового режиму, система наведення, орієнтації і стабілізації, система живлення і накопичення електроенергії (аккумуляторні батареї), система перетворення електричної енергії в мікрохвильове електромагнітне випромінювання, мікрохвильова система передачі енергії до приймаючого космічного апарата (мікрохвильова антена). Приймаючий космічний апарат має включати: систему забезпечення теплового режиму, систему наведення, орієнтації і стабілізації, систему приймання (мікрохвильова ректена) і перетворення мікрохвильового випромінювання в електричну енергію, систему передачі енергії до космічного об'єкта, який є споживачем енергії, в даному випадку – космічної індустріальної платформи [20].

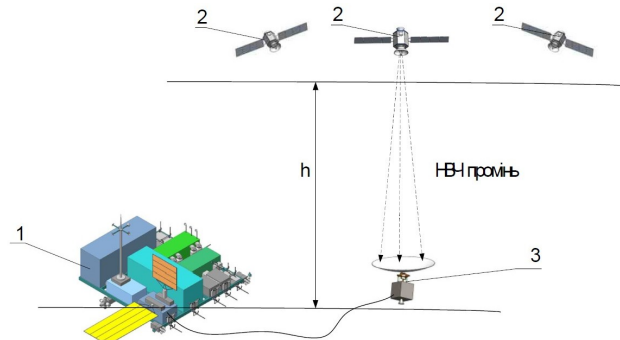


Рис. 18 – Схема функціонування розподіленої енергетичної системи космічної індустріальної платформи [20]

На рисунку 18 позначено: 1 – космічний об'єкт–споживач енергії, наприклад, космічна індустріальна платформа; 2 – енергетичні космічні апарати; 3 – космічний апарат, який приймає енергетичний надвисокочастотний сигнал.

В роботах [20, 21] представлено математичну модель для аналізу орбітального, кутового і відносного руху енергетичних космічних апаратів та космічних апаратів приймачів, запропоновано алгоритми для розрахунку параметрів системи орієнтації і стабілізації енергетичних космічних апаратів; проведено дослідження особливостей режимів роботи космічних енергетичних апаратів з огляду їх синхронізації з циклограмами роботи космічної індустріальної платформи; запропоновано узагальнену методику вибору проєктних параметрів системи орієнтації і стабілізації; проведено визначення проєктних параметрів, що мають обиратися при проєктуванні космічних апаратів з безконтактною передачею електроенергії до космічної індустріальної платформи.

Отже, створення КСЕС вирішує одночасно такі проблеми: проблему екологічних та кліматичних наслідків впливу існуючої зараз традиційної енергетики на довкілля; проблему глобальної енергетичної кризи, оскільки Сонце – це природне джерело енергії, яке є практично нескінченним за потужністю та часом існування. Завдяки застосуванню енергетичних космічних апаратів та КСЕС з безконтактною передачею енергії можуть бути вирішені такі актуальні задачі: високий рівень електропостачання наземним споживачам, ефективне енергозабезпечення довготривалих масштабних космічних проєктів, зокрема з вивчення та освоєння Марса, Місяця та

місячних сировинних ресурсів; промислове виробництво в космосі; очищення навколоземного простору від космічного сміття та ін.

Висновки. В результаті проведеного аналізу можна зробити такі висновки. Розглянута у статті задача бездротової передачі енергії на відстань є актуальною. У всьому світі проводяться активні дослідження у цьому напрямі. Результати проведених досліджень сприятимуть подальшому розширенню можливостей ефективного застосування систем бездротової передачі енергії для вирішення низки важливих завдань у різних галузях промисловості, сільського господарства, медицини, озброєння. Також можна зазначити високий рівень науково-теоретичного та технічного опрацювання розробок та проєктів космічних сонячних електростанцій, що дозволяє зробити висновки про можливість реалізації цих проєктів. Застосування енергетичних космічних апаратів та космічних сонячних електростанцій з безконтактною передачею енергії дадуть можливість вирішення важливих задач, серед яких: високий рівень електропостачання наземним споживачам, ефективне енергозабезпечення довготривалих масштабних космічних проєктів, промислове виробництво в космосі, очищення навколоземного простору від космічного сміття. Реалізація проєктів космічних сонячних електростанцій дозволить вирішити одночасно декілька проблем: проблему глобальної енергетичної кризи, проблему екологічних та кліматичних наслідків впливу традиційної енергетики на довкілля.

1. Brown W. C. The history of power transmission by radio waves. IEEE Trans. 1984. V. MTT-32. No. 9. P. 1230–1242. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1984.1132833>
2. Glaser P. E. Power from the Sun: its future. Science. 1968. 168. P. 857–886. <https://doi.org/10.1126/science.162.3856.857>
3. Патент США № US3781647, МПК B64G1/42; B64G1/44; H02J17/00; H02N6/00; H02S99/00. Method and apparatus for converting solar radiation to electrical power. Glaser P. US05/165893; заявл. 26.07.1971; опубл. 25.12.1973.
4. Brown W. C., Eves E. E. Microwave power transmission and its application to space. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40. No. 8. P. 1239–1250. <https://doi.org/10.1109/22.141357>
5. Celeste A., Jeanty P., Pignolet G. Case study in Reunion Island. Acta Astronautica. 2004. Vol. 54. P. 253–258. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(02\)00302-8](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(02)00302-8)
6. Jull G. Project SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform). Friends of Communications Research Centre. URL: <https://www.friendsofrc.ca/Projects/SHARP/sharp.html> (Last accessed: 05.03.2025).
7. Shinohara N. Beam Control Technologies with a High Efficiency Phased Array for Microwave Power Transmission in Japan. Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101. Issue 6. P. 1448–1463. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2253062>
8. Fujino Y., Fujita M., Kaya N., et al. A Dual Polarization Microwave Power Transmission System for Microwave Propelled Airship Experiment. ISAP 96 Proceedings. Chiba, Japan. P. 393–396.
9. Franceschetti G., Gervasio V., Mittra R. A Look at the Wide Spectrum of Wireless Power Transmission. Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT). 2014. Vol. 6. 19 p.
10. Delaney R. Northrop Grumman demonstrate solar to radio frequency conversion. 2021. URL: <https://www.afrl.af.mil/News/Article/2878401/afrl-northrop-grumman-demonstrate-solar-to-radio-frequency-conversion/> (Last accessed: 05.03.2025).
11. DOE/NASA, Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program Assessment Report U.S. Department of Energy, Office of Energy Research, DOE/ER/0085. November 1980. 322 p. URL: <https://space.nss.org/wp-content/uploads/SSP-DOE-1978-space-solar-power-Reference-System-Report.pdf> (Last accessed: 05.03.2025).
12. Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security. Phase o Architecture Feasibility Study: Report to the Director. National Security Space Office. October 10, 2007. URL: <https://space.nss.org/wp-content/uploads/Space-Based-Solar-Power-Opportunity-for-Strategic-Security-assessment.pdf> (Last accessed 05.03.2025).
13. Wie B., Roithmay C. M. Integrated Orbit, Attitude, and Structural Control Systems Design for Solar Power Satellites. NASA/TM-2001-210854. June 2001. 137 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20010071579/downloads/20010071579.pdf> (Last accessed: 05.03.2025).
14. SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array (A 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project). Final Report. Principal Investigator Mr. John C. Mankins. Artemis Innovation Management Solutions LLC, Santa Maria, California, 15 September 2012. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002466/downloads/20190002466.pdf> (Last accessed 05.03.2025).

15. Nagatomo M. Approach to develop space solar power as a new energy system for developing countries. *Solar Energy*. 1996. Vol. 56. No. 1. P. 111–118. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00098-C](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00098-C)
16. Sasaki S., Tanaka K., Higuchi K., Okuizumi N., Kawasaki S., Shinohara N., Senda K., Ishimura K. A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS. *Acta Astronautica*. 2006. Vol. 60. P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.07.010>
17. Chen S. China plans to start building first-ever solar power plant in space by 2028. June 2022. URL: https://www.scmp.com/news/china/science/article/3180627/china-brings-forward-plans-space-solar-power-plant?module=perpetual_scroll_0&pgtype=article&campaign=3180627 (Last accessed 05.03.2025).
18. Yang Y., Zhang Y., Duan B., Wang D., Li X. A novel design project for space solar power station (SSPSOMEGA). *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 121. P. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.029>
19. Space Based Solar Power. De-risking the pathway to Net Zero. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1020631/space-based-solar-power-de-risking-pathway-to-net-zero.pdf (Last accessed 05.03.2025).
20. Палій О. С., Лапханов Е. О., Своробін Д. С. Модель керування рухом космічних розподілених енергетичних систем. *Технічна механіка*. 2022. № 4. С. 35–50. <https://doi.org/10.15407/itm2022.04.035>
21. Лапханов Е. О., Палій О. С., Своробін Д. С. Визначення проєктних параметрів системи керування енергетичних космічних апаратів для безконтактного живлення космічної індустріальної платформи. *Технічна механіка*. 2023. № 4. С. 15–30. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.015>

Отримано 06.03.2025,
в остаточному варіанті 18.06.2025