

<https://doi.org/10.15407/knit2023.06.013>
УДК 629.78

А. П. АЛПАТОВ, член-кор. НАН України, проф., д-р техн. наук, зав. відділу системного аналізу та проблем керування
orcid.org/0000-0003-4411-2250

E-mail: aalpatov@ukr.net

О. С. ПАЛІЙ, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

orcid.org/0000-0002-7856-2615

E-mail: jerr_5@ukr.net

С. В. СЮТКІНА-ДОРОНІНА, канд. техн. наук, наук. співроб.

orcid.org/0000-0002-2612-0356

E-mail: svetasut2012@gmail.com

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ КОСМІЧНОЇ ІНДУСТРІАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Мета статті — сформулювати комплексну задачу оптимізації проектних параметрів космічної індустриальної платформи на етапі концептуального проектування.

Початковим етапом індустриалізації космосу є створення на орбіті Землі космічних індустриальних платформ. В даний час виконуються роботи, пов'язані з реалізацією низки технологічних процесів в умовах космічного простору, що досліджуються вченими та розробниками. Реалізація унікальних технологічних процесів в умовах космічного простору дозволяє отримувати матеріали з якісно новими характеристиками. Особливістю проектування космічної індустриальної платформи є те, що практично немає теоретичних розробок щодо вибору параметрів платформи і логіки її створення на етапі концептуального проектування. Цей етап характеризується тим, що окрім загального уявлення про компоновку платформи, передбачувані типи основних службових систем, деякі вихідні дані та параметри технологічних процесів, що планується реалізувати на платформі, нічого невідомо. Процес проектування нової складної космічної системи, такої як індустриальна платформа, є багаторівневим ітераційним і оптимізаційним процесом, під час якого визначаються і уточнюються її характеристики і масове зведення.

В статті аналізуються конфігурації наявних орбітальних станцій як прообразу космічних індустриальних платформ і визначено діапазони основних параметрів їхніх модулів. Сформовано комплекс параметрів технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості, що їх можна реалізувати на космічній індустриальній платформі. Показано взаємозв'язок між технологічними та базовими модулями індустриальної платформи. Розроблено структуру комплексної математичної моделі функціонування космічної індустриальної платформи. Для успішного проведення робіт на етапі концептуального проектування сформульовано загальну постановку задачі оптимізації маси космічної індустриальної платформи. Одержані в результаті оптимізації мінімальні маса і габарити космічної платформи використовуються надалі для уточнення оптимальних параметрів платформи і відтак впливають на формування умов для реалізації технологічного процесу. У загальному вигляді показано алгоритм послідовності операцій для розв'язання задачі оптимального проектування космічної індустриальної платформи.

Ключові слова: космічна індустриальна платформа, концептуальне проектування, технологічні процеси, функціональні особливості, комплекс параметрів, оптимізація, статистичні показники.

Цитування: Алпатов А. П., Палій О. С., Сюткіна-Дороніна С. В. Концептуальне проектування космічної індустриальної платформи. Постановка задачі. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 6 (145). С. 13—25. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.013>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ. Космічні індустріальні платформи передбачається створювати для промислового виробництва у ближньому космосі. Космічна індустріальна платформа (КІП) є новим класом великих складних систем. При її створенні на початкових стадіях концептуального проектування провадяться поглиблені наукові дослідження, на підставі яких приймаються принципи рішення щодо проектування системи. Однією із задач, які необхідно вирішити на стадії дослідження концепції, є визначення технічних шляхів створення нової системи. Для даної стадії притаманно початковий вибір основних параметрів, формування конструктивно-компонувального вигляду схеми та обрання загального підходу щодо проектування індустріальної платформи.

В умовах мікрогравітації на висоті орбіти функціонування індустріальної платформи на технологічне обладнання діють залишкові прискорення, викликані зовнішніми та внутрішніми факторами.

Із зовнішніх можна виділити такі фактори: сили аеродинамічного гальмування в атмосфері; відцентрові і доцентрові сили, що виникають при обертанні платформи навколо її центра мас; сили, що діють при роботі двигунних установок платформи під час корекції орбіти або при керуванні її рухом відносно центра мас; гравітаційні збурення, спричинені несиметричністю гравітаційного потенціалу Землі; збурення, пов'язані зі зміною магнітного поля Землі, яке залежить від сонячної активності; збурення, що виникають внаслідок взаємодії елементів основних модулів платформи (наприклад сонячних батарей) з магнітним полем Землі; збурення, що виникають при дії фрагментів космічного сміття на корпус платформи; збурення, пов'язані з тяжінням Сонця та сонячним тиском.

До внутрішніх факторів відносяться збурення, що виникають внаслідок дії сил при роботі різноманітних агрегатів основних та допоміжних модулів індустріальної платформи (насоси для перекачування палива або рідини холодоагенту, системи стикування сервісного космічного апарата, механізми повороту сонячних батарей тощо).

Приведені збурення умовно поділяються на дві групи: лінійні та динамічні. Під лінійними

розуміються прискорення, що повільно змінюються з часом, наприклад збурення внаслідок сили аеродинамічного опору атмосфери. До динамічних можна віднести віброприскорення з діапазоном частот 0...300 Гц, інколи до 400 Гц, та прискорення внаслідок впливу роботи технологічного обладнання на конструкцію платформи [1, 6, 7, 10, 17].

На даний час методичні засади для проектування КІП перебувають на стадії розробки концепції (концептуальне проектування). Для даної стадії використовується обмежений обсяг інформації, лише схематичне уявлення щодо проектного вигляду платформи та набір її основних і допоміжних модулів.

Орбіта базування космічної індустріальної платформи вибирається з урахуванням критеріїв: мінімального впливу збурень, мінімальних витрат палива на корекцію орбіти під час всього терміну її активного функціонування та мінімальних витрат на доставку сировини та відвантаження готової продукції і доставку її до замовника. Далі оцінюються зовнішні та внутрішні фактори, що впливають на конструкцію індустріальної платформи в залежності від типу технологічного процесу, та визначаються проектні параметри платформи. Для розв'язування цих задач необхідно розробити низку математичних моделей, а саме: модель впливу технологічних процесів на динаміку і відносний рух платформи, модель впливу факторів навколоземного простору на технологічний процес, власної мікрогравітації для певних точок орбіти і динамічних процесів платформи.

При виборі конструктивно-компонувальної схеми базової платформи з метою забезпечення відповідного рівня мікрогравітації необхідно забезпечити відстань між центром мас платформи та технологічним обладнанням, встановленим на ній. З метою зниження динамічної складової мікрогравітації необхідно забезпечити максимальну жорсткість конструкції та відсутність резонансних частот в діапазоні 0...400 Гц [1, 6, 7, 10, 17].

Не менш важливою є задача формування базової платформи. Оскільки можливості ракетносії щодо габаритів і мас корисного навантаження є обмеженими, постає питання, яким

чином реалізувати процес збирання великогабаритної космічної індустріальної платформи. Граничні обмеження маси та габаритів КІП, що залежать від можливостей ракети-носія, враховуються у процесі проектування.

Структура комплексної математичної моделі функціонування космічної індустріальної платформи. Математична модель функціонування індустріальної платформи, що дозволяє визначати проектні параметри індустріальної платформи для забезпечення надійного функціонування технологічного обладнання, містить сукупність взаємопов'язаних моделей, а саме: визначення масових та інерційних характеристик платформи її балістики, рівня мікрогравітації за модулем та напрямком для певних точок орбіти і чинників внутрішніх динамічних збурень, які супроводжують роботу технологічного обладнання; визначення параметрів системи забезпечення орієнтації і стабілізації; оцінювання зовнішніх та внутрішніх теплових потоків, що діють на платформу; визначення параметрів системи терморегулювання платформи; визначення параметрів системи кондиціонування і газовідведення; оцінювання впливу факторів космічного простору на базову конструкцію платформи; визначення параметрів оболонки та силових елементів платформи; визначення параметрів її енергетичного комплексу; оцінювання витрат на доставку сировини до платформи та на доставку готової продукції до відповідних об'єктів космічної інфраструктури; оцінювання витрат на створення та експлуатацію індустріальної платформи; оцінювання корисного ефекту від технологічного процесу виробництва в умовах космічного простору. Структуру даної моделі показано на рис. 1, де T_i — робоча температура i -го технологічного процесу, p_i — робочий тиск в камері i -го процесу, P_i — питома енергетична потужність i -го процесу, $m_{\text{КІП}}$ — маса КІП, $I_x^{\text{КІП}}, I_y^{\text{КІП}}, I_z^{\text{КІП}}$ — головний тензор інерції, $S_M^{\text{КІП}}$ — площа міделя платформи, $\mathbf{k}_{\text{осc}}$ — вектор оскулюючих параметрів орбіти, \mathbf{g}_i — мікрогравітаційне прискорення за модулем та напрямком для i -ї точки орбіти, $\mathbf{p}_{\text{МЗОС}}$ — вектор параметрів модуля забезпечення орієнтації і стабілізації, $\mathbf{p}_{\text{ДС}}^{\text{КІП}}, \mathbf{p}_{\text{СКА}}$ — вектори параметрів системи двигунів КІП та сервісного

космічного апарата, $C_{\text{ДС}}, C_{\text{ДП}}$ — показники витрат на доставку сировини до платформи та на доставку готової продукції до постачальника відповідно, $C_{\text{Ф}}$ — показник витрат на функціонування платформи, $p_{\text{БС}}^{\text{КІП}}$ — питома енергетична потужність службових систем платформи, $Q_{\text{С}}, Q_{\text{А}}, Q_{\text{З}}, Q_{\text{ТО}}, Q_{\text{БС}}$ — теплові потоки Сонця, альbedo Землі, власного випромінювання Землі, технологічного обладнання і бортових систем відповідно, $\mathbf{p}_{\text{МТР}}$ — вектор параметрів модуля терморегулювання, \mathbf{f}_i — вектор параметрів впливу факторів космічного простору на базову конструкцію платформи, $\mathbf{p}_{\text{К}}$ — вектор параметрів базової конструкції платформи, $\mathbf{p}_{\text{ЕК}}$ — вектор параметрів енергетичного комплексу, $\mathbf{p}_{\text{КІП}}$ — вектор параметрів космічної індустріальної платформи, $C_{\text{Е}}^{\text{КІП}}$ — показник ефективності КІП.

Параметри технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості, що реалізуються на космічній індустріальній платформі. Для визначення проектних параметрів промислового модуля проведено аналіз технологічних та функціональних схем різних процесів виробництва, які можна реалізувати в умовах ближнього космосу [13].

Запропоновано низку кластерів виробництв [13]:

- напівпровідникових матеріалів,
- продуктів космічної металургії,
- оптичних матеріалів,
- високочистих біологічних речовин,
- сировини з космічного сміття.

Функціональні схеми промислового технологічного обладнання КІП різні для різних альтернативних процесів виробництва в умовах космічного простору. У роботах [13, 14, 22] показано взаємозв'язок між технологічними та базовими модулями індустріальної платформи. Проведено систематизацію даних про технологічні процеси в умовах вакууму та невагомості для реалізації на КІП і сформовано комплекс їхніх параметрів, який наведено в табл. 1 [13], де T_3 — температура зразка, $P_{\text{ТП}}$ — енергетична потужність, p — тиск в камері, H — напруженість магнітного поля, що діє на зразок, E — напруженість електричного поля, dT/dx — градієнт температури, T — температура зберігання продукції.

Дані параметри будуть використовуватися як вихідні дані для системного аналізу технологіч-

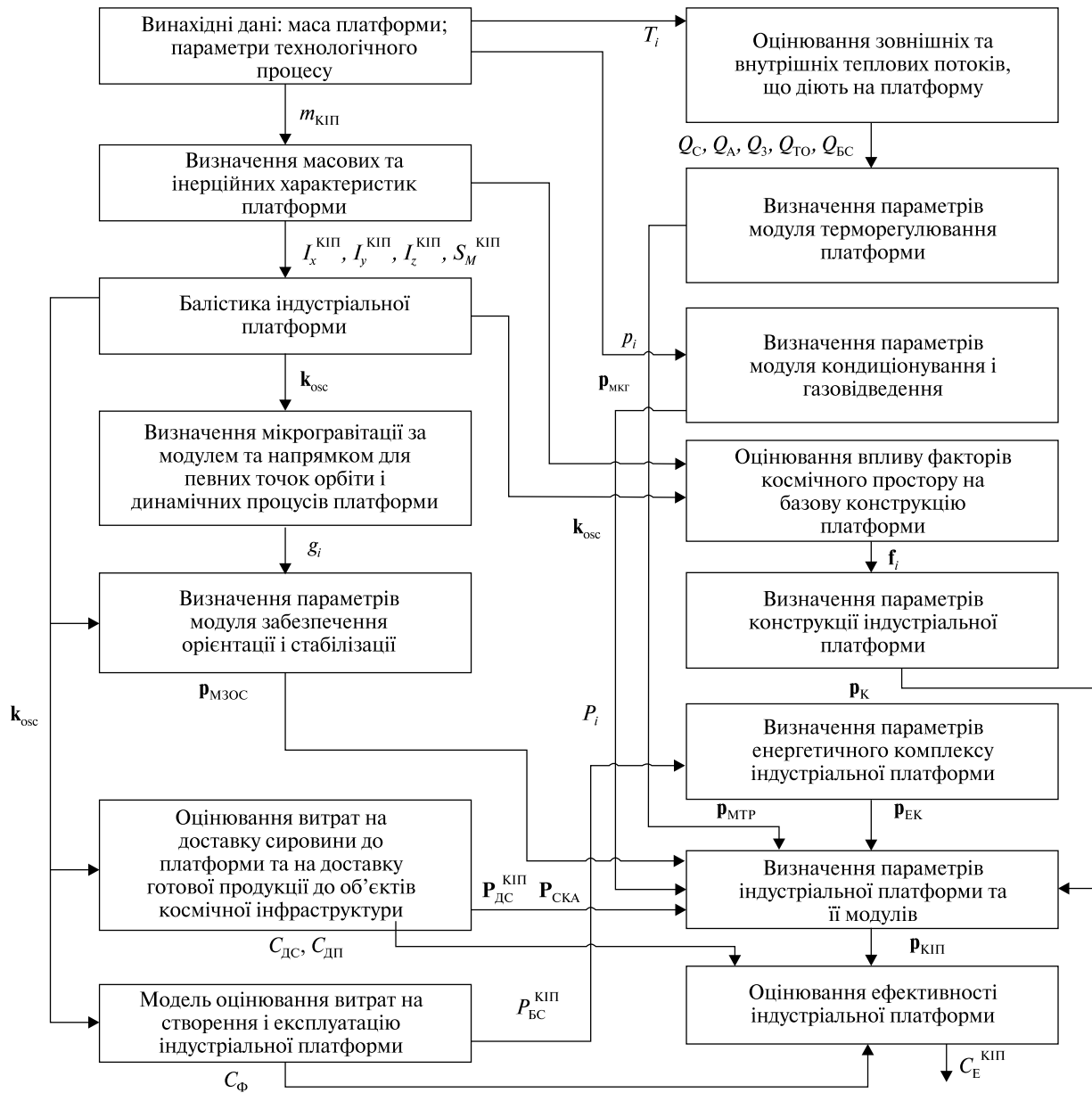


Рис. 1. Структура математичної моделі функціонування космічної індустріальної платформи

Таблиця 1. Комплекс параметрів для забезпечення реалізації технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості

Технологічний процес	$T_3, \text{К}$	$P_{\text{ТП}}, \text{Вт}$	$p, \text{Па}$	$H, \text{Тл}$	$E, \text{В/см}$	$dT/dx, \text{К/см}$	$T, \text{К}$
Напівпровідникові матеріали	300...1800	100...900	$10^{-5} \dots 10^{-7}$	$0 \dots 3.5 \cdot 10^{-3}$	—	0...350	—
Космічна металургія	400...3300	80...2600	10^{-5}	1.5	—	0...600	—
Оптичні матеріали	400...600	80...1500	10^{-5}	—	—	—	—
Високочисті біологічні речовини	270...350	55...600	10^{-5}	—	25...50	—	278
Сировина з космічного сміття	400...3000	80...1500	10^{-5}	—	—	—	—

них процесів та вибору оптимальних параметрів індустріальної платформи для забезпечення промислового виробництва в умовах космічного простору.

Постановка задачі. Різноманіття типів основних елементів КІП, схем їхньої електричної, теплової і механічної комутації, велика кількість зовнішніх факторів і зв'язків, які необхідно враховувати при виборі кращого варіанта, суттєво ускладнюють задачу оптимізації космічної індустріальної платформи і вимагають системного підходу до її розв'язування. Структура і параметри КІП визначають вимоги до вихідних електричних параметрів платформи, обмеження на її масові та габаритні показники, динамічні характеристики тощо. При цьому очевидно, що функціональні властивості КІП, які характеризуються вихідними параметрами, а також її надійність, стійкість до дії зовнішніх факторів та інші якості не є простою сумою властивостей її підсистем і елементів, тобто мають ефект синергії.

Постановка задачі структурно-параметричної оптимізації КІП формулюється так: необхідно визначити структуру (склад елементів і зв'язки між ними), а також показники, які повинні увійти в основний критерій оптимальності КІП.

Для обґрунтування рішення щодо вибору кращого варіанта КІП на етапі концептуального проектування доцільно використовувати методи техніко-економічного аналізу, які враховують показники двох видів — корисного ефекту і витрат [2, 4, 5, 11].

Отже, для успішного проведення робіт на цьому етапі доцільно сформулювати комплексну задачу оптимізації КІП як задачу мінімізації витрат на створення та експлуатацію при забезпеченні необхідного корисного ефекту від технологічного процесу виробництва в умовах космічного простору. Доцільно сформулювати показники корисного ефекту і витрат окремо для базового та промислового модулів КІП.

Для визначення показника корисного ефекту від продукції, що виготовляється на КІП, використовуються такі вихідні параметри [6]: напруженість технологічного магнітного поля \mathbf{H} [А/м], напруженість технологічного електричного поля \mathbf{E} [В/см], температура виробничого зразка T [К],

тиск в камері $p_{\text{ТП}}$ [Па], діаметр фракції сировини після її фрагментації $d_{\text{Фр}}$ [м], енергетична потужність $P_{\text{ЕК}}$ [Вт] та напруга $U_{\text{ЕК}}$ [В].

У загальному випадку вихідні параметри КІП залежать від внутрішніх властивостей платформи, які визначаються її структурою і властивостями елементів, та характеризуються векторним показником \mathbf{X} , а також від зовнішніх умов функціонування платформи, що характеризуються векторним показником \mathbf{Y} . Крім того, оскільки зовнішні умови функціонування і властивості елементів КІП звичайно змінюються у процесі експлуатації платформи, вихідні параметри КІП у загальному випадку залежать від часу t .

Вихідні параметри базового модуля КІП визначаються як функції

$$P_{\text{ЕК}}(t) = P_{\text{ЕК}}[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)],$$

$$U_{\text{ЕК}}(t) = U_{\text{ЕК}}[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)].$$

Вихідні параметри промислового модуля КІП визначаються як функції

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)],$$

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)],$$

$$T(t) = T[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)],$$

$$p_{\text{ТП}}(t) = p_{\text{ТП}}[\mathbf{X}(t), \mathbf{Y}(t)].$$

Витрати, необхідні для отримання корисного ефекту від функціонування КІП, складаються з витрат на технологічне обладнання та комплектування, службові системи, механічні конструкції, а також з витрат виведення на орбіту та експлуатацію.

Безпосередніми показниками витрат є:

$C_{\text{КІП}}$ — вартість створення і експлуатації КІП у цілому,

$C_{\text{ОМ}}$ — вартість створення і експлуатації базового модуля КІП,

$C_{\text{ПМ}}$ — вартість створення і експлуатації промислового модуля КІП.

Опосередкованими показниками є різні параметри, які суттєво впливають на вартість КІП:

$m_{\text{КІП}}$ — маса КІП в цілому,

$m_{\text{ОМ}}$ — маса базового модуля КІП,

$m_{\text{ПМ}}$ — маса промислового модуля КІП.

Показники витрат, так само як показники корисного ефекту функціонування КІП, залежать

від внутрішніх властивостей платформи і зовнішніх факторів, що змінюються в часі:

$$C_{OM}(t) = C_{OM}[\mathbf{X}'(t), \mathbf{Y}'(t)],$$

$$C_{PM}(t) = C_{PM}[\mathbf{X}'(t), \mathbf{Y}'(t)],$$

$$C_{KIP}(t) = C_{OM}(t) + C_{PM}(t),$$

де \mathbf{X}' , \mathbf{Y}' — вектори внутрішніх властивостей платформи і зовнішніх факторів, які в загальному випадку включають компоненти, що відрізняються від компонентів векторів \mathbf{X} і \mathbf{Y} .

Критерій оптимальності вибору варіанта КІП — це сукупність вимог, які повинні задовольняти показники корисного ефекту і витрат. При техніко-економічному обґрунтуванні доцільності розробки нових складних технічних систем, таких як КІП, використовуються дві основні форми критерію оптимальності і відповідні їм два варіанти постановки задачі оптимізації [2, 5, 8, 12]. Перший передбачає досягнення максимального корисного ефекту при заданих витратах (принцип максимізації ефекту), другий — мінімізацію витрат при забезпеченні необхідного корисного ефекту (принцип економії ресурсів). Доведено, що в тому випадку, коли залежність показника корисного ефекту від вартості є зростаючою функцією, ці дві форми критерію оптимальності еквівалентні одна одній, і для пошуку оптимального розв'язку можна використовувати кожну з них [2, 5].

З урахуванням великої тривалості розробки, створення і експлуатації КІП, а також неточності прогнозування і умовності фіксування витрат на такий тривалий період, найкращою є постановка, при якій фіксується корисний ефект, а витрати мінімізуються [2, 16].

Критерій оптимальності базового модуля КІП, який можна розглядати як критерій його техніко-економічної ефективності, при детермінованій постановці задачі має вигляд

$$C_{OM}(\mathbf{X}', \mathbf{Y}') \rightarrow \min,$$

$$P_{EK}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \geq P_{EK}^{пот},$$

$$U_{min}^{доп} \leq U_{EK} \leq U_{max}^{доп},$$

$$t = t_{зад},$$

де C_{OM} — вартість створення і експлуатації базового модуля КІП, $t_{зад}$ — заданий момент часу, для якого встановлено потрібне значення вихід-

ної потужності $P_{EK}^{пот}$ і допустимий інтервал напруги $[U_{min}^{доп}, U_{max}^{доп}]$.

Витрати ресурсів, необхідних для забезпечення корисного ефекту від функціонування базового модуля КІП, складаються з витрат на створення і експлуатацію базового модуля платформи.

Суттєві витрати на експлуатацію базового модуля КІП пов'язані з орієнтацією енергетичного комплексу платформи на Сонце. Оцінити їх досить складно, тому що при цьому необхідно враховувати супутні витрати енергомасових ресурсів на забезпечення орієнтації і стабілізації КІП тощо.

Між тим, експлуатаційні витрати при виборі кращого варіанта КІП у першому наближенні можна не враховувати, якщо накласти обмеження на точність орієнтації платформи, і моменти інерції платформи:

$$v_x = v_x^{доп}, v_y = v_y^{доп}$$

$$J_x \leq J_x^{доп}, J_y \leq J_y^{доп},$$

де $v_{x(y)}^{доп}$ — допустимі кути відхилення оптичної осі енергетичного комплексу від напрямку на Сонце, $J_{x(y)}^{доп}$ — максимально допустимі значення моментів інерції платформи відносно осей обертання x , y .

Як показник витрат на створення КІП, що включає витрати на виведення у космічний простір, можна використовувати масу КІП. Дійсно, найбільш вагомими складовими вартості КІП у цьому випадку є вартість комплектування і вартість виведення. У першому наближенні можна вважати, що вартість КІП визначається за формулою

$$C \approx m \cdot \left(\frac{\bar{C}_k}{1+k_k} + \bar{C}_{вив} \right),$$

де \bar{C}_k , $\bar{C}_{вив}$ — питомі (на одиницю маси) вартості комплектування і виведення відповідно, k_k — коефіцієнт, що враховує збільшення маси КІП за рахунок маси конструкції у порівнянні з масою комплектування.

Якщо вважати значення \bar{C}_k , $\bar{C}_{вив}$ і k_k постійними, то, очевидно, мінімізацію вартості можна звести до мінімізації маси. При цьому потрібно мати на увазі, що масу КІП, яка має чітке фізичне значення, на етапі передескізного проектування можна визначити зі значно більшою точ-

ністю, ніж вартість, і маса має високу чутливість до зміни структури і параметрів КІП. Помітимо також, що як вартість, так і маса мають властивість адитивності, тобто визначаються як прості суми вартостей або мас елементів КІП. Масу КІП, як показник витрат у задачі оптимізації, можна вважати детермінованою величиною і користуватися її середньостатистичними значеннями (математичними очікуваннями).

В роботі [14] наведено модель визначення маси космічної індустріальної платформи та її модулів.

Сучасні орбітальні станції мають у своєму складі: модуль керування і службових систем, функціонально-вантажний модуль, шлюзовий відсік, вузловий модуль, лабораторний модуль. Результати аналізу конфігурацій наявних орбітальних станцій і діапазони основних параметрів їхніх модулів наведено у табл. 2 [14].

Для визначення діапазонів мас модулів КІП сформовано статистичну вибірку приведених мас складових космічних систем (див. табл. 3) [14]. Статистична вибірка становила 55 космічних систем.

В табл. 3 позначено: К — конструкція КІП, ЕМ — енергетичний модуль, МЗТР — модуль забезпечення теплового режиму, МЗОС — модуль

забезпечення орієнтації і стабілізації, МК — модуль керування, МС — модуль стикування, БМ — бортові маніпулятори, КН — корисне навантаження.

Результати статистичного аналізу приведених мас підсистем КІП наведено в табл. 4 [14], де \overline{m}_{cp_j} — математичне очікування (та його довірчі інтервали), S_j^2 — дисперсія (та її довірчі інтервали), S_j — стандартне відхилення.

Для середніх показників і дисперсії визначено довірчі інтервали з рівнем достовірності 99.9 %. Подальші дослідження з проектування космічної індустріальної платформи планується виконувати з урахуванням визначених масових часток систем КІП з урахуванням мінімально і максимально можливих мас для тієї чи іншої системи.

Критерій оптимальності вибору варіанта базового модуля КІП, що відповідає постановці задачі структурно-параметричної оптимізації, можна подати у вигляді такої сукупності співвідношень:

$$m_{OM} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$P_{EK}(X, Y) \geq P_{EK}^{пот}, \quad (2)$$

$$U_{min}^{доп} \leq U_{EK} \leq U_{max}^{доп}, \quad (3)$$

$$t = t_{зад}, \quad (4)$$

Таблиця 2. Параметри модулів орбітальних станцій [3, 9, 19–21]

Модуль станції	Початкова маса, т	Довжина по корпусу, м	Максимальний діаметр, м
Модуль керування і службових систем	4.989...20.295	1.4...13.11	3.96...4.35
Функціонально-вантажний блок	4.685...20.26	6.4...12.99	4.1...4.57
Шлюзовий відсік	1.36...6.064	1.8...5.5	2.04...6.55
Вузловий модуль	1.183...13.508	1.8...6.1	1.9...6.55
Лабораторний модуль	1.2...35.38	3.9...14.66	2.9...4.5

Таблиця 3. Фрагмент статистичної вибірки приведених мас модулів до маси космічних систем

Космічна система (КС)	Приведена маса модуля m_i до маси КС $m_{КС}$							
	К	ЕМ	МЗТР	МЗОС	МК	МС	БМ	КН
КС-1	0.15	0.12	0.10	0.09	0.05	0.05	0.05	0.41
КС-2	0.41	0.10	0.08	0.13	0.10	0.04	0.04	0.11
КС-3	0.03	0.11	0.04	0.11	0.02	0.10	0.10	0.50
...
КС-55	0.22	0.27	0.05	0.12	0.05	—	—	0.29

$$v_{x(y)} = v_{x(y)}^{\text{доп}}, \quad (5)$$

$$J_{x(y)} \leq J_{x(y)}^{\text{доп}}, \quad (6)$$

де $m_{\text{ОМ}}$ — маса базового модуля КІП, $t_{\text{зад}}$ — заданий момент часу, для якого встановлено потрібне значення вихідної потужності $P_{\text{ЕК}}^{\text{пот}}$ і допустимий інтервал напруги $[U_{\text{мін}}^{\text{доп}}, U_{\text{макс}}^{\text{доп}}]$, $v_{x(y)}^{\text{доп}}$ — допустимі кути відхилення оптичної осі енергетичного комплексу від напрямку на Сонце, $J_{x(y)}^{\text{доп}}$ — максимально допустимі значення моментів інерції платформи відносно осей обертання x, y .

Критерій оптимальності вибору варіанта промислового модуля КІП можна сформулювати у такому вигляді:

$$m_{\text{ПМ}} \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$|\mathbf{H}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})| \geq |\mathbf{H}^{\text{пот}}|, \quad (8)$$

$$|\mathbf{E}_{\text{мін}}^{\text{доп}}| \leq |\mathbf{E}| \leq |\mathbf{E}_{\text{макс}}^{\text{доп}}|, \quad (9)$$

$$T_{\text{мін}}^{\text{доп}} \leq T \leq T_{\text{макс}}^{\text{доп}}, \quad (10)$$

$$p_{\text{мін}}^{\text{доп}} \leq p_{\text{ТП}} \leq p_{\text{макс}}^{\text{доп}}, \quad (11)$$

$$t = t_{\text{зад}}, \quad (12)$$

де $m_{\text{ПМ}}$ — маса промислового модуля КІП, $|\mathbf{H}^{\text{пот}}|$ — потрібне значення вихідної напруженості магнітного поля, $|\mathbf{E}_{\text{мін(макс)}}^{\text{доп}}|$ — допустимі інтервали напруженості електричного поля,

$T_{\text{мін(макс)}}^{\text{доп}}$ — допустимі інтервали температури виробничого зразка, $p_{\text{мін(макс)}}^{\text{доп}}$ — допустимі інтервали тиску в камері.

Зазначимо, що перебирання різних схемних рішень КІП, які відрізняються типами комплектувальних систем, способами їхнього сполучення, компонованням тощо, в даний час не піддається строгій формалізації. Це призводить до використання евристичних методів формування альтернативних схемних рішень КІП, та їхнього порівняння за вартістю або масою після оптимізації кожного варіанта за критерієм оптимальності КІП (1)–(12). Найкращою слід вважати ту схему КІП, для якої виконується умова

$$C_{\text{КІП } j}^{\text{мін}} < \{C_{\text{КІП } i}^{\text{мін}}\}_{n-1}$$

або

$$m_{\text{КІП } j}^{\text{мін}} < \{m_{\text{КІП } i}^{\text{мін}}\}_{n-1},$$

де $C_{\text{КІП}}^{\text{мін}}$, $m_{\text{КІП}}^{\text{мін}}$ — мінімальні вартість та маса КІП після оптимізації за критерієм оптимальності, n — загальна кількість альтернатив схемних рішень КІП, i, j — порядкові індекси альтернатив.

Оскільки критерій переваги є окремим випадком критерію оптимальності, такий підхід до розв'язування задачі структурно-параметричної оптимізації КІП є досить коректним.

Таблиця 4. Результати статистичного аналізу приведених мас підсистем індустриальної платформи

Модуль	$\overline{m_{e_j}}$ (та довірчі інтервали)	S_j^2 (та довірчі інтервали)	S_j
К	0.2425 (0.199937...0.285619)	0.0092 (0.00522...0.018468)	0.0960
ЕМ	0.2295 (0.189525...0.267883)	0.0077 (0.004618...0.015446)	0.0880
МЗТР	0.0811 (0.053791...0.111395)	0.0043 (0.002496...0.008347)	0.0655
МЗОС	0.1007 (0.081246...0.121717)	0.0021 (0.001232...0.00412)	0.0457
МК	0.1705 (0.113352...0.231833)	0.0179 (0.010558...0.035314)	0.1336
МС	0.0633 Надмала статистика	0.0010 Надмала статистика	0.0321
БМ	0.0633 Надмала статистика	0.0010 Надмала статистика	0.0321
КН	0.2595 (0.21029...0.304524)	0.0114 (0.006679...0.02234)	0.1067

У загальному вигляді отримано алгоритм послідовності операцій для розв'язування задачі оптимізації КІП:

1) визначити умови функціонування КІП, сформулювати вимоги до вихідних параметрів КІП і охарактеризувати їх кількісно;

2) обґрунтувати вибір певного варіанта КІП з можливого набору альтернатив, представити схемне рішення КІП і зробити змістовний опис;

3) розробити математичні моделі КІП відповідно до показників корисного ефекту і витрат, що входять у критерій оптимальності вибору;

4) провести аналіз моделей КІП, вибрати методи оптимізації і розробити алгоритми їхньої комп'ютерної реалізації;

5) сформулювати початкову інформацію і здійснити чисельне розв'язування задачі оптимізації КІП;

6) проаналізувати розв'язок і зробити необхідні рекомендації.

На передпроектному етапі розглядається задача визначення оптимальних значень параметрів вектора \mathbf{p} за умови мінімізації цільової функції — маси КІП $m_{\text{КІП}}(\mathbf{X}, \mathbf{p}) \rightarrow \min$, що залежить тільки від вхідних даних (вектора \mathbf{X}) і k -вимірного векторного аргументу \mathbf{p} , де k — кількість параметрів КІП, що оптимізуються (1)–(12). Надалі необхідно виконати декомпозицію індустріальної платформи до рівня елементів конструкції її модулів.

Отримані в результаті оптимізації мінімальні значення маси і відповідні їм оптимальні розміри КІП використовуються надалі для уточнення оптимальних параметрів КІП і, відтак, впливають на формування вимог до вихідних параметрів КІП. У такий спосіб реалізується принцип зворотного зв'язку, що визначає ітераційний характер процесу оптимізації.

Застосування методів оптимізації для вибору проектних параметрів космічної індустріальної платформи. Вибір методу комп'ютерного розв'язування задачі оптимізації в першу чергу визначається видом розроблених математичних моделей. Від точності або достовірності моделей, що визначає ступінь їхньої адекватності властивостям реального об'єкта КІП, значною мірою залежить обґрунтованість рішення щодо

вибору кращого варіанта КІП. Разом з тим відомо, що врахування занадто великого числа факторів надмірно ускладнює модель і затрудняє розв'язування задачі. Тому на етапі концептуального проектування до математичних моделей, що розробляються для оптимізації параметрів КІП, висувається вимога максимальної простоти при достатній достовірності [8]. Задовольнити цю вимогу при розробці моделей можливо лише шляхом обґрунтованих компромісів і припущень.

Математична модель для оптимізації КІП є сукупністю співвідношень, які зв'язують показники корисного ефекту і витрат з параметрами, що характеризують внутрішні властивості КІП і зовнішні умови її функціонування. Таким чином, йдеться фактично про дві взаємопов'язані моделі:

- модель одержання корисного ефекту, що характеризується вихідними значеннями напруги, електричної потужності і комплексу параметрів технологічних процесів в умовах космосу,
- модель витрат, що характеризується вартістю або масою КІП.

Наявність у моделі отримання корисного ефекту нелінійних співвідношень, що описують фізичні процеси в КІП, визначає необхідність використання для оптимізації КІП методів нелінійного програмування, зокрема чисельних методів детермінованого або випадкового пошуку [15, 18]: метод Монте-Карло; генетичний алгоритм випадкового пошуку; методи нульового порядку конфігурацій (Ґука — Дживса) та деформованого багатогранника (Нелдера — Міда); градієнтні методи покоординатного спуску першого і другого порядків. Ці методи повинні стати основою побудови системи автоматичної оптимізації проектних параметрів КІП.

Чисельні ітераційні методи оптимізації по-роджують послідовність точок (векторів параметрів, що оптимізуються) відповідно до запропонованого набору правил, що включають критерій закінчення пошуку екстремуму цільової функції.

Ефективність чисельних методів оптимізації характеризується багатьма факторами: швидкістю збіжності до оптимуму цільової функції, ча-

сом виконання однієї ітерації, об'ємом використуваної комп'ютерної пам'яті, необхідної для реалізації методу і т. д. На практиці застосовуються тільки методи, що мають збіжність. Вони дозволяють за кінцеве число ітерацій одержати екстремум цільової функції або підійти до точки, досить близької до екстремуму. Обчислення припиняються при виконанні деяких умов зупинки ітераційного процесу — малості збільшення або зменшення аргументів цільової функції (параметрів, що оптимізуються) або малості зміни значення цільової функції [15, 18].

Найкращим способом вибору методу оптимізації, найбільш придатного для розв'язування поставленої задачі оптимального проектування КІП, слід визнати дослідження можливостей і досвіду застосування різних методів оптимізації. Пропонується підхід до оптимізації проектних параметрів КІП на основі порівняння декількох методів незалежних процесів оптимізації, гібридизації або комбінації різних методів оптимізації.

Висновки. Для обґрунтування створення космічної індустріальної платформи використовуються методи техніко-економічного аналізу, які враховують показники двох видів — корисного ефекту і витрат. Показниками корисного ефекту є показники ефективності технологічного процесу. Показник витрат на створення космічної індустріальної платформи включає витрати на технологічне обладнання та комплектування, службові системи, механічні конструкції, а також витрати на виведення на орбіту та експлуатацію.

В результаті аналізу технологічних процесів, що можуть бути реалізовані в умовах космічного

простору, сформовано параметри технологічних процесів в умовах вакууму та невагомості.

Наведено діапазони основних параметрів модулів наявних орбітальних станцій. Подано результати статистичного аналізу приведених мас підсистем космічної індустріальної платформи. Для середніх показників і дисперсії визначено довірчі інтервали з достовірністю 99.9 відсотка.

Розроблено структуру комплексної математичної моделі функціонування космічної індустріальної платформи.

Для успішного проведення передпроектних робіт сформульовано загальну постановку задачі оптимізації маси космічної індустріальної платформи. Одержані в результаті оптимізації мінімальні маса і габарити платформи використовуються надалі для уточнення оптимальних параметрів платформи і, відтак, впливають на формування умов для реалізації технологічного процесу. У такий спосіб реалізується принцип зворотного зв'язку, що визначає ітераційний характер процесу оптимізації.

У загальному вигляді показано алгоритм послідовності операцій для розв'язування задачі оптимального проектування космічної індустріальної платформи.

Обрано чисельні методи детермінованого та випадкового пошуку для розв'язування задачі оптимізації проектування космічної індустріальної платформи. Ці методи повинні стати основою побудови системи комп'ютерної оптимізації проектних параметрів платформи. Пропонується підхід до вибору проектних параметрів платформи на основі порівняння або комбінації різних чисельних методів оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алпатов А. П., Горбулин В. П. Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы. *Вісн. НАН України*. 2013. № 12. С. 26—39.
2. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. *Фотоэлектрическое преобразование концентрврованиого солнечного излучения*. Л.: Наука, 1989. 310 с.
3. Афанасьев И. Б., Батурина Ю. М., Белозерский А. Г. и др. *Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди*. Под ред. Ю. М. Батурина. М.: Изд-во «РТСофт», 2005. 752 с.
4. Бобровников Г. Н., Чувин В. А. *Технико-экономическое обоснование поиска новых технических решений*. М.: Акад. нар. хоз-ва при СМ СССР, 1983. 60 с.
5. Горичев Ю. В., Лебедев А. Н., Миронов В. И. *Обеспечение качества и надежности сложных технических систем на этапе проектирования*. Л.: МО СССР, 1984. 142 с.
6. Козлов Д. И., Аншаков Г. П., Агарков В. Ф. и др. *Конструирование автоматических космических аппаратов*. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.
7. Куренков В. И., Салмин В. В., Прохоров А. Г. *Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения*. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. унт-та, 2006. 160 с.
8. Лебедев А. А., Баранов В. Н., Бобровников В. Г. и др. *Основы синтеза систем летательных аппаратов*. Под ред. А. А. Лебедева. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
9. Лисов И. Земля осталась без «Мира». Последний месяц. *Новости космонавтики*. 2001. **11**, № 5. С. 2—11.
10. *Модель космоса: В 2 т.* Под. ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. 1144 с.
11. Морозов Л. М., Петухов Г. Б., Сидоров В. Н. *Методологические основы теории эффективности*. Л.: ВИИ им. А. Ф. Можайского, 1982. 236 с.
12. *Надежность и эффективность в технике: Справочник*. Под ред. А. И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. Т. 1. Методология. Организация. Терминология. 224 с.
13. Палій О. С. Класифікація технологічних процесів за їхньою реалізацією на космічній індустріальній платформі. *Техн. мех.* 2022. № 2. С. 123—136.
14. Палій О. С. Масові моделі космічної індустріальної платформи та її модулів. *Техн. мех.* 2022. № 3. С. 75—84.
15. Пантелеев А. В., Летова Т. А. *Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. для вузов (2-е изд., исправл.)*. М.: Высш. шк., 2005. 544 с.
16. Попырин Л. С. *Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок*. М.: Энергия, 1978. 416 с.
17. Пугаченко С. Е. *Проектирование орбитальных станций*. М: МГТУ им. Баумана, 2009. 175 с.
18. Сюткіна-Дороніна С. В. *Методичне забезпечення оптимізації основних характеристик одноступінчатих ракет з маршовим двигуном на твердому паливі: дис. ... кан. техн. наук*. Дніпро, 2021. 168 с.
19. Belew L. F., Stuhlinger E. *Skylab a Guidebook*. Periscope Film LLC, 2012. 264 p.
20. International Space Station Overview. European space agency. URL: https://www.esa.int/esapub/br/br137/Br_137-1.pdf (дата звернення: 10.01.2023).
21. Kitmacher G. H. *Reference Guide to the International Space Station: Assembly Complete Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform*, 2010. 140 p.
22. Pali O. S. State of the art in the development of orbital industrial platforms. *Techn. meh.* 2021. № 3. P. 70—82.

REFERENCES

1. Alpatov A. P., Gorbulin V. P. (2013). Space platforms for orbital industrial complexes: problems and prospects. *Vysn. NAS of Ukraine*, № 12, 26—39.
2. Andreev V. M., Griliches V. A., Rummyantsev V. D. (1989). *Photoelectric conversion of concentrated solar radiation*. L.: Nauka, 310 p. [in Russian].
3. Afanasyev I. B., Baturin Y. M., Belozersky A. G., et al. (2005). *World manned cosmonautics. History. Technique. People*. Ed. by Yu. M. Baturin. Moscow: RTSoft Publ. House, 752 p. [in Russian].
4. Bobrovnikov G. N., Chuvin V. A. (1983). *Feasibility study of the search for new technical solutions*. Moscow: Acad. of National Economy under the USSR Council of Ministers, 60 p. [in Russian].
5. Gorichev Yu. V., Lebedev A. N., Mironov V. I. (1984). *Ensuring the quality and reliability of complex technical systems at the design stage*. L.: MO SSR, 142 p. [in Russian].
6. Kozlov D. I., Anshakov G. P., Agarkov V. F., et al. (1996). *Design of automatic spacecraft*. Moscow: Mashinostroenie, 448 p. [in Russian].
7. Kurenkov V. I., Salmin V. V., Prokhorov A. G. (2006). *Methodology for Selection of Basic Design Characteristics and Design of Observation Spacecraft*. Samara: Samara State Aerospace University, 160 p. [in Russian].
8. Lebedev A. A., Baranov V. N., Bobrovnikov V. G., et al. (1987). *Fundamentals of synthesis of aircraft systems*. Ed. by A. A. Lebedev. Moscow: Mashinostroenie, 224 p. [in Russian].
9. Lisov I. (2001). The Earth was left without «Mir». The last month. *News of Cosmonautics*, **11**, № 5, 2—11 [in Russian].
10. *Model of Space*: In 2 vol. (2007). Eds M. I. Panasyuk, L. S. Novikov. Moscow: KDU. Vol. 2. Impact of Space Environment on Materials and Equipment of Spacecrafts, 1144 p. [in Russian].
11. Morozov L. M., Petukhov G. B., Sidorov V. N. (1982). *Methodological foundations of the theory of efficiency*. L.: A. F. Mozhaisky Research Institute, 236 p. [in Russian].
12. *Reliability and efficiency in engineering: Handbook* (1986). Ed. by A. I. Rembeza. Moscow: Mashinostroenie. Vol. 1. Methodology. Organization. Terminology, 224 p. [in Russian].
13. Paliy O. S. (2022). Classification of technological processes by their implementation on the space industrial platform. *Techn. Mech.*, № 2, 123—136 [in Ukrainian].
14. Paliy O. S. (2022). Mass models of the space industrial platform and its modules. *Techn. Mech.*, № 3, 75—84 [in Ukrainian].
15. Panteleyev A. V., Letova T. A. (2005). *Optimization methods in examples and problems. Optimization methods in examples and problems* (2nd ed., corrected.). Moscow: Vyssh. shk., 544 p.
16. Popyrin L. S. (1978). *Mathematical modeling and optimization of thermal power plants*. Moscow: Energia, 416 p. [in Russian].
17. Pugachenko S. E. (2009). *Design of orbital stations*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 175 p. [in Russian].
18. Syutkina-Doronina S. V. (2021). *Methodological support for optimization of the main characteristics of single-stage rockets with a solid fuel propulsion engine*: PhD thesis. Dnipro, 168 p.
19. Belew L. F., Stuhlinger E. (2012). *Skylab a Guidebook*. Periscope Film LLC, 264 p.
20. International Space Station Overview. European space agency. URL: https://www.esa.int/esapub/br/br137/Br_137-1.pdf (Last accessed: 10.01.2023).
21. Kitmacher G. H. (2010). Reference Guide to the International Space Station: Assembly Complete Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, 140 p.
22. Paliy O. S. (2021). State of the art in the development of orbital industrial platforms. *Techn. Mech.*, № 3, 70—82.

Стаття надійшла до редакції 04.08.2023

Після доопрацювання 04.08.2023

Прийнято до друку 22.08.2023

Received 04.08.2023

Revised 04.08.2023

Accepted 22.08.2023

A. P. Alpatov, Head of Department of Systems Analysis and Control Problems,
Corresponding Member of NAS of Ukraine, Professor, Dr.Sci. in Techn.

orcid.org/0000-0003-4411-2250

E-mail: aalpatov@ukr.net

O. S. Palii, Senior researcher, Cand. Sci. in Tech.

orcid.org/0000-0002-7856-2615

E-mail: jerr_5@ukr.net

S. V. Siutkina-Doronina, Researcher, Cand. Sci. in Tech.

orcid.org/0000-0002-2612-0356

E-mail: svetasut2012@gmail.com

Institute of Technical Mechanics of NASU and SSAU

15, Leshko-Popel Str., Dnipro, 49005 Ukraine

CONCEPTUAL DESIGN OF THE SPACE INDUSTRIAL PLATFORM. PROBLEM STATEMENT

The objective of this paper is to formulate a complex problem of optimizing the design parameters of a space industrial platform at the conceptual design stage.

The initial stage of space industrialization was the creation of space industrial platforms in Earth orbit. At present, there are works related to the implementation of a number of technological processes in outer space, which are being studied by scientists and developers. Implementation of unique technological processes in outer space allows for obtaining materials with qualitatively new characteristics.

The peculiarity of designing a space industrial platform is that there are practically no theoretical works related to the choice of platform parameters and the logic of its creation at the conceptual design stage. This stage is characterized by the fact that, apart from the general idea of the platform layout, the expected types of main service systems, some initial data, and the parameters of the technological processes to be implemented on the platform, there is little else known. The process of designing a new complex space system, such as an industrial platform, is a multi-level iterative and optimization process, during which its characteristics and mass production are determined and refined.

The article analyzes the configurations of existing orbital stations as a prototype of space industrial platforms and determines the ranges of the main parameters of their modules. A set of parameters of technological processes in vacuum and zero gravity conditions that can be implemented on a space industrial platform is formed. The relationship between the technological and basic modules of the industrial platform is shown. The structure of a complex mathematical model of the space industrial platform functioning is developed. To ensure successful work at the conceptual design stage, a general statement of the problem of optimizing the mass of the space industrial platform is formulated. The minimum mass and dimensions of the space platform obtained as a result of the optimization are used to further refine the optimal parameters of the platform and, therefore, affect the formation of conditions for the implementation of the technological process.

The algorithm of the sequence of operations for solving the problem of optimal design of a space industrial platform is shown in general.

Keywords: space industrial platform, conceptual design, technological processes, functional features, set of parameters, optimization, statistical indicators.