

УДК 338.3

**Почерняєв Віталій Миколайович**

*доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри Телекомунікацій*

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку*

**Почерняев Виталий Николаевич**

*доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Телекоммуникаций*

*Государственный университет интеллектуальных технологий и связи*

**Pochernyaev Vitaly**

*Doctor of Technical Sciences, Professor*

*State University of Intellectual Technologies and Communications*

**Кадацька Тетяна Олександрівна**

*старший викладач кафедри менеджменту та маркетингу*

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку*

**Кадацкая Татьяна Александровна**

*старший преподаватель кафедры менеджмента и маркетинга*

*Государственный университет интеллектуальных технологий и связи*

**Kadatska Tetiana**

*Senior Lecturer*

*State University of Intellectual Technologies and Communications*

*ORCID: 0000-0002-1302-1260*

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАВЕДЕНИХ ВИТРАТ ПРИ  
ПРОЕКТУВАННІ КОМБІНОВАНОЇ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОЇ  
СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ ПРИ  
ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМБИНИРОВАННОЙ  
НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ  
PROCEDURE OF CALCULATING THE REDUCED COSTS FOR  
DESIGNING A COMBINED LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEM**

*Анотація.* В статті приводиться методика розрахунку приведених витрат при проектуванні перспективного варіанта побудови низькоорбітальної супутникової системи. Для України перспективність цього варіанту полягає в тому, що застосовуються власні кошти досягнення великої кількості супутників на орбіту. При цьому, супутники є багатофункціональними і використовуються для організації зв'язку і мовлення, зондування атмосфери і поверхні Землі, підповерхневої локації, космічного спостереження, збору даних від датчиків Інтернету -речей. Космічна угруповання складається з міні -, мікро-, наносупутників, які по загальній масі доставляють на орбіту вітчизняної ракето-носієм. Техніко-економічна ефективність супутникової системи полягає не тільки в перерахованих вище перевагах, але і в її ієрархічній побудові - комбінації кореневого супутника, мінісупутників-ретрансляторів, мікросупутників. У статті наводиться аналіз інших низькоорбітальних супутникових систем. Особливістю дослідження комбінованої низькоорбітальної супутникової системи є той факт, що запропонована побудова супутникової системи дозволяє використання технології розподілених реєстрів, як одної з наскрізних цифрових технологій. У цифровій трансформації економіки, технологія розподілених реєстрів грає таку ж роль, як Інтернет- речей, хмарні обчислення, технології 5G та Big Data. Методика розрахунку приведених витрат полягає в розрахунку вартості розробки, виробництва та експлуатації системи на етапі її проектування. Витрати на розробку космічного і наземного сегментів включені до складу

загальних капітальних витрат. Витрати на розробку космічного сегмента виділені на витрати розробки кореневого супутника, мінісупутника - ретранслятора, мікросупутника. Такий же підхід закладений і до витрат на експлуатацію космічного сегмента. При розрахунку наведених витрат на наземний сегмент в якості основних складових земних станцій взяті антенні системи, радіо передавальні НВЧ і радіоприймальні НВЧ тракти, пристрої обробки інформації, крайова апаратура. Вказана приблизна вартість серійного виробництва кореневого супутника, мінісупутника - ретранслятора, мікросупутника. Наведено орієнтовна вартість однієї хвилини доступу в досліджуваній комбінованій низькоорбітальній супутникової системи і в існуючій «близькою» за призначенням низькоорбітальній супутникової системі.

**Ключові слова:** наведені витрати, витрати на розробку, капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, комбінована низькоорбітальна супутникова система.

**Аннотація.** В статті приводиться методика расчета приведенных затрат при проектировании перспективного варианта построения низкоорбитальной спутниковой системы. Для Украины перспективность этого варианта заключается в том, что применяются собственные средства достижения большого количества спутников на орбиту. При этом, спутники являются многофункциональными и используются для организации связи и вещания, зондирования атмосферы и поверхности Земли, подповерхностной локаций, космического наблюдения, сбора данных от датчиков интернета-вещей. Космическая группировка состоит из мини, макро-, наноспутников, которые по общей массе доставляют на орбиту отечественной ракетой-носителем. Техно-экономическая эффективность спутниковой системы заключается не только в вышеперечисленных преимуществах, но и в ее иерархическом

*построении - комбинации корневого спутника, миниспутников-ретрансляторов, микроспутников. В статье приводится анализ других низкоорбитальных спутниковых систем. Особенностью исследования комбинированной низкоорбитальной спутниковой системы является тот факт, что предложенное построение спутниковой системы позволяет использование технологии распределенных реестров, как одной из сквозных цифровых технологий. В цифровой трансформации экономики технология распределенных реестров играет такую же роль, как интернет- вещей, облачные вычисления, технологии 5G и Big Data. Методика расчета приведенных затрат заключается в расчете стоимости разработки, производства и эксплуатации системы на этапе ее проектирования. Затраты на разработку космического и наземного сегментов включены в состав общих капитальных затрат. Затраты на разработку космического сегмента выделены на затраты разработки корневого спутника, миниспутника-ретранслятора, микроспутника. Такой же подход заложен и к затратам на эксплуатацию космического сегмента. При расчете приведенных затрат на наземный сегмент в качестве основных составляющих земных станций взяты антенные системы, радиопередающие СВЧ и радиоприемные СВЧ тракты, устройства обработки информации, оконечная аппаратура. Указана примерная стоимость серийного производства корневого спутника, мини спутника- ретранслятора и микроспутника. Приведена ориентировочная стоимость одной минуты доступа в исследуемой комбинированной низкоорбитальной спутниковой системе и в существующей «близкой» по назначению низкоорбитальной спутниковой системе.*

**Ключевые слова:** *приведенные затраты, затраты на разработку, капитальные вложения, эксплуатационные расходы, комбинированная низкоорбитальная спутниковая система.*

**Summary.** *The article provides a method for calculating the costs when designing a promising embodiment of a low-bit satellite system. For Ukraine, the prospects for this option lies in the fact that their own means of achieving a large number of satellites in orbit are applied. At the same time, satellites are multifunctional and used to organize communication and broadcasting, the sounding of the atmosphere and the surface of the Earth, subsurface locations, cosmic observation, data collection from the Internet sensors. The space group consists of mini, macro-, nanosterans, which are delivered to the orbit of a domestic rocket carrier into orbit. The technical and economic efficiency of the satellite system lies not only in the above advantages, but also in its hierarchical construction - combination of the root satellite, ministerial repeater, macrovers. The article provides an analysis of other low-bit satellite systems. A feature of the study of the combined LEO is the fact that the proposed construction of the satellite system allows the use of technological distributed registries as one of the through digital technologies. In digital transformation of the economy, the technology of distributed registers plays the same role as Internet things, cloud computing, 5G and Big Data technologies. The method of calculating the presented costs is to calculate the cost of the development, production and operation of the system at the stage of its design. The costs of developing space and ground segments are included in the total capital costs. The costs of developing a space segment are highlighted on the cost of developing a root satellite, a minivan-repeater, microscope. The same approach is also laid for the cost of exploitation of the space segment. When calculating the costs of the ground segment as the main component of earth stations, antenna systems, radio transmission microwaves and radio receiving microwaves, information processing devices, terminal equipment are taken as the main components of earth stations. The approximate cost of serial production of root sieuine, mini satellite, retrograder, microsatellite is indicated. The estimated cost of one*

*minute of access in the studied combined LEO and in the existing "close" to the appointment of a low-bit satellite system is given.*

**Key words:** *Fixed cost, development cost, capital investments, operating costs, combined LEO.*

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На сьогодні, по всьому світу заявлено про розробки як мінімум 45 негеостаціонарних супутникових систем. Компанія OneWeb спроектувала систему з 649 супутників та отримала мільярдні інвестиції, в тому числі від уряду Великобританії. Вже запущено 104 супутника. Система Starlink поповнилася 833 супутниками (за один запуск ракети приблизно 60 супутників доставляється на задану орбіту). Система Starlin отримала 885 млн. дол. США інвестицій з Федерального бюджету США. Компанія Amazon планує вивести на орбіту 3226 супутників в рамках проекту Kuiper. Вартість проекту приблизно 10 млрд. дол. США. Компанія Telesat планує побудувати низькоорбітальну супутникову систему Telesat LEO, що складається з 300 супутників.

**Постановка завдання.** На сьогоднішній день ринок супутникових послуг в основному зростає за рахунок введення в експлуатацію низькоорбітальних супутникових систем. Низькоорбітальні супутникові угруповання припускаю наявність сотень і тисяч супутників. Фінансово економічна складова таких проектів є суттєвою.

Витрати на проектування, виробництво та експлуатацію супутникових систем можуть бути суттєвими як для великих промислово-фінансових корпорацій, так і бюджету держави. Зниження вартості супутникової системи всього на 5- 10% може дати економію в кілька десятків мільйонів доларів США. Україна має власну ракету-носій «Зеніт», за допомогою якої було здійснено десятки успішних запусків низькоорбітальних космічних апаратів на висоту ~ 700 км. Тому, при проектуванні супутникової системи



зв'язку одним з найважливіших вимог є зменшення їх вартості, яке не повинно призводити до погіршення інших показників якості системи. Тема такої роботи є актуальною.

**Метою** роботи є вирішення завдання щодо забезпечення техніко-економічної ефективності (ТЕЕ) комбінованої низькоорбітальної супутникової системи.

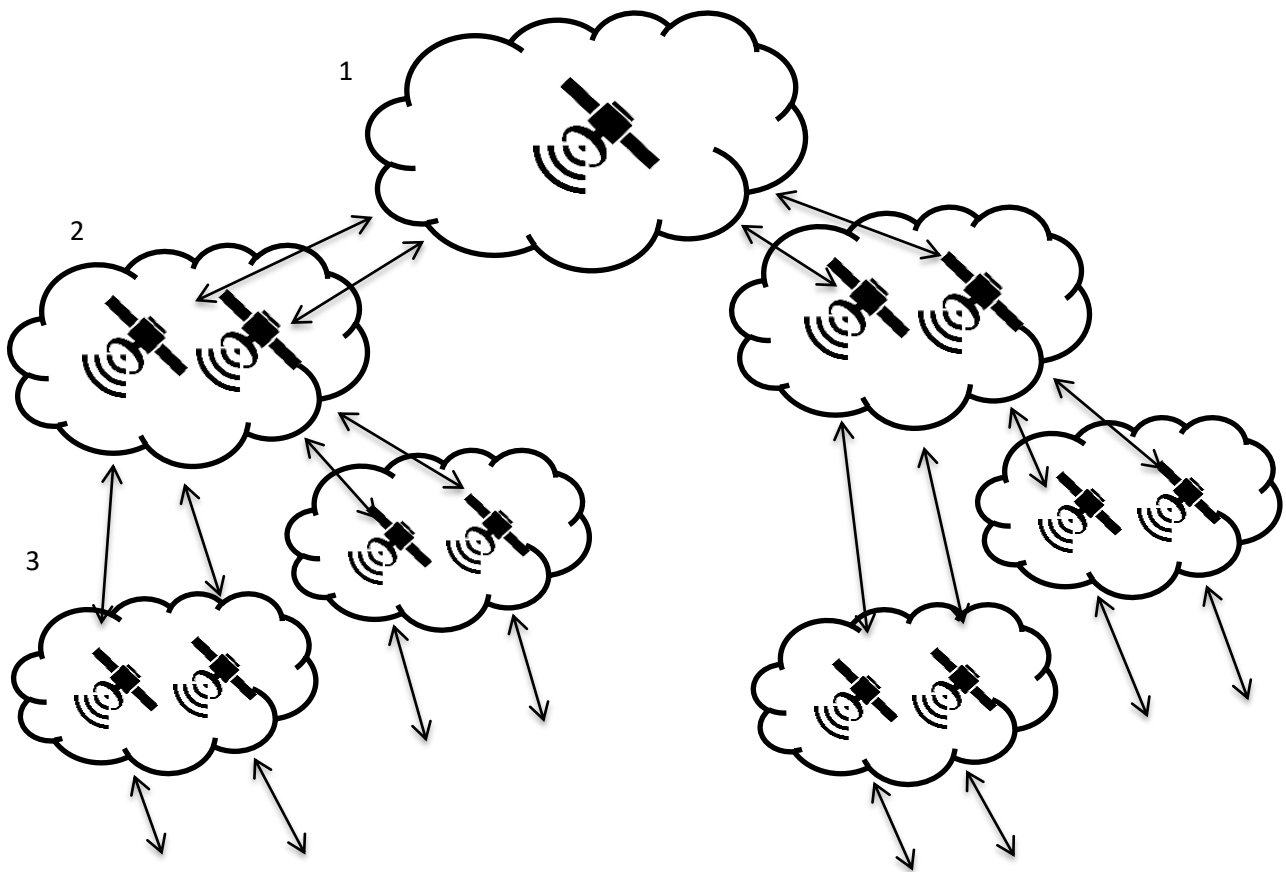
Основні етапи вирішення задачі:

- вибір оптимального варіанта побудови проекрованої супутникової системи;
- оцінка річного економічного ефекту, що досягається при застосуванні знайденого оптимального варіанта побудови супутникової системи;
- визначення вартості вже виготовленого виробу для встановлення його оптової ціни.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Оскільки наведені витрати на комбіновану низькоорбітальну супутникову систему в значній мірі залежать від варіантів її побудови, завдання забезпечення ТЕЕ необхідно вирішувати на ескізному етапі проектування. Також, при виборі оптимального варіанта побудови системи необхідно проводити оцінку річного економічного ефекту [1].

Визначити вартість виготовленої супутникової системи можливо тільки після завершення проектування всіх її елементів. Тому, при виборі варіанта побудови проекрованої супутникової системи слід визначити: по-перше, призначення супутникової системи. Для України, обмеженою в бюджетних та інвестиційних ресурсах, оптимальний варіант побудови супутникової системи полягає в поєднанні функцій системи зв'язку і мовлення та функцій системи дослідження клімату, зондування атмосфери і поверхні Землі та також підповерхневої локації, космічного спостереження, збору даних від датчиків Інтернету речей. По-друге,

визначити склад супутникової системи по масі корисного навантаження і можливостей вітчизняних засобів доставки такої маси на обрану орбіту. Значить, супутникова система повинна бути низькоорбітальною та складатися з поєднання міні -, мікро -, наносупутників. Тому, як оптимальний варіант побудови проектованої системи вибираємо комбіновану низькоорбітальних супутникову систему. Орієнтовна конфігурація такої системи показана на рис. 1, де позначено: 1 - кореневий супутник, 2 - мінісупутники-ретранслятори, 3 - мікросупутники.



**Рис. 1. Комбінована низькоорбітальна супутникова система**

Побудова комбінованої низькоорбітальної супутникової системи передбачає використання технології розподілених реєстрів, як однієї з наскрізних цифрових технологій. У цифровій трансформації галузей



економіки ця технологія відіграє таку ж роль, як і інтернет - речей, хмарні обчислення, технологія 5G, технологія Big Data.

Технологія розподілених реєстрів дозволяє:

- організувати та синхронізувати дані, спрямовані на удосконалення взаємозв'язків між частинами і елементами розподілених баз даних;
- забезпечити цілісність даних, спрямованих на приведення даних до єдиної внутрішньої структури за задалегідь визначеними правилами;
- створити та виконати децентралізовані додатки, спрямовані на забезпечення взаємодії необмеженого числа учасників розподіленої системи.

Методика розрахунку приведених витрат полягає в розрахунку вартості розробки, виробництва та експлуатації супутникової системи. Витрати на розробку космічного та наземного сегментів передують початку виробництва і їх включають до складу загальних капітальних вкладень  $K_{ЗАГ}$ .

Витрати на виробництво включають в себе три основні складові:

- капітальні вкладення  $K_{ПР}$ , які складаються з вкладень в основні виробничі фонди  $K_{ОСН}$  (витрати на будівництво будівель і споруд для забезпечення виробництва, закупівлю, встановлення та налагодження обладнання) і оборотні фонди  $K_{ОБОР}$ ;
- поточні річні витрати на зарплату персоналу, який бере участь в процесі виробництва (але не розробки)  $P_{ЗП}$ ;
- поточні річні витрати на виробництво  $P_{ВИР}$  (матеріали, інструменти, деталі, паливо, електроенергію, ремонти).

Загальні капітальні вкладення  $K_{ЗАГ}$  визначаються наступним чином:

$$K_{ЗАГ} = K_{РАЗР} + A (K_{ОСН} + K_{ОБОР}), \quad (1)$$

де  $K_{РАЗР}$  - витрати на розробку,  $A$  - коефіцієнт річних амортизаційних відрахувань на відновлення основних виробничих фондів. Величина витрат на розробку складається з наступних складових:

$$K_{\text{РОЗР}} = K_{\text{КОСМ}} + K_{\text{НАЗ}},$$

$$K_{\text{КОСМ}} = K_{\text{КОРН}} + K_{\text{РТР}} + K_{\text{МИКР}},$$

де  $K_{\text{КОСМ}}$ ,  $K_{\text{НАЗ}}$  - витрати на розробку космічного та наземного сегментів відповідно;  $K_{\text{КОРН}}$ ,  $K_{\text{РТР}}$ ,  $K_{\text{МИКР}}$  - витрати на розробку кореневого супутника, мінісупутників - ретранслятора, мікросупутника відповідно.

Для визначення сумарних витрат на виробництво, що враховують разові капітальні вкладення і поточні річні витрати як єдиний показник, користуються так званими наведеними витратами [3]:

$$П = P_{\text{ПР}} + P_{\text{З/П}} + \rho K_{\text{ПР}}, \quad (2)$$

де  $K_{\text{ПР}}$  - капітальні вкладення у виробництво,  $\rho$  - ваговий коефіцієнт, що враховує різний характер капітальних і поточних витрат. Величина капітальних вкладень у виробництво складається з наступних складових:

$$K_{\text{ВИР}} = K'_{\text{КОСМ}} + K'_{\text{НАЗ}},$$

$$K'_{\text{КОСМ}} = K'_{\text{КОРН}} + K'_{\text{РТР}} + K'_{\text{МИКР}},$$

де  $K'_{\text{КОСМ}}$ ,  $K'_{\text{НАЗ}}$  - витрати на виробництво космічного та наземного сегментів відповідно;  $K'_{\text{КОРН}}$ ,  $K'_{\text{РТР}}$ ,  $K'_{\text{МИКР}}$  - витрати на виробництво кореневого супутника, мінісупутників - ретранслятора, мікросупутника відповідно.

Собівартість річного виробництва визначається з виразу:

$$С = P_{\text{ПР}} + P_{\text{З/П}} + A K_{\text{ПР}}. \quad (3)$$

З формул (2) і (3) можна отримати залежність наведених витрат від собівартості:

$$П = С + K_{\text{ЕФ}}, \quad (4)$$

де  $K_{\text{ЕФ}}$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

За аналогією з формулою (2) наведені витрати на експлуатацію супутникової системи можна записати:

$$П_3 = P_{\text{Щ}} + P_{\text{ЩЗ/П}} + \rho K_{\text{ЕКСПЛ}}, \quad (5)$$

де  $P_{\text{Щ}}$  і  $P_{\text{ЩЗ/П}}$  - поточні щорічні витрати, що здійснюються в процесі експлуатації і на зарплату і на експлуатацію (витрати на електроенергію,

паливо, поточний і капітальний ремонт, орендну плату і охорону об'єктів);  $K_{\text{ЕКСПЛ}}$  - капітальні вкладення в процесі експлуатації, в тому числі витрати на розширення інфраструктури, будівництво необхідних для ефективної експлуатації або закупівлю будівель та споруд, розробку пристроїв, покупку і монтаж необхідних антенних, радіопередавальних пристроїв, радіоприймальних пристроїв кінцевого і допоміжного обладнання (витрат на ліцензії, дозволу, митні збори, реєстраційні документи, тестування обладнання).

Величина експлуатаційних витрат складається з наступних складових:

$$K_{\text{ЕКСПЛ}} = K''_{\text{КОСМ}} + K''_{\text{НАЗ}},$$

$$K''_{\text{КОСМ}} = K''_{\text{КОРН}} + K''_{\text{РТР}} + K''_{\text{МІКР}},$$

де  $K''_{\text{КОСМ}}$ ,  $K''_{\text{НАЗ}}$  - експлуатаційні витрати космічного і наземного сегментів відповідно;  $K''_{\text{КОРН}}$ ,  $K''_{\text{РТР}}$ ,  $K''_{\text{МІКР}}$  - експлуатаційні витрати на підтримку кореневого супутника, мінісупутників-ретранслятора, мікросупутника відповідно.

Залежно від вимог, що пред'являються до супутникової системи і способів їх реалізації технічні характеристики системи вартість її буде різною. Для того, щоб таке оптимальне рішення було знайдено, необхідна ретельна опрацювання тактико-технічного завдання (ТТЗ), детальне обговорення ТТЗ на науково-технічних радах всіх Виконавців, узгодження ТТЗ з усіма зацікавленими Сторонами.

Якщо цього не буде зроблено на етапі узгодження ТТЗ, то оптимальний варіант може бути і не знайдений. Рішення завдання техніко-економічної оптимізації є досить складним і дорогим. Виділимо два фактора найбільш суттєво впливають на вартість супутникової системи:

- принципи організації зв'язку;
- застосування досягнень в області наноелектроніки, обробки інформації, програмного забезпечення.

До основних елементів космічного і наземного сегментів супутникової системи зв'язку віднесемо три складові, які визначають енергетичний потенціал радіолінії і як показує практика, є домінуючими в вартості системи [3]:

- антенні пристрої, особливо багатопроменеві;
- вихідні підсилювачі потужності радіопередавальних пристроїв;
- малошумні вхідні підсилювачі радіоприймальних пристроїв.

При цьому враховується: кількість радіопередавальних пристроїв земних станцій (ЗС) і окремо космічних апаратів (КА); кількість радіоприймальних пристроїв ЗС і окремо КА; кратність резервування різних пристроїв; кількість антенно-фідерних пристроїв кожного типу.

Окремо слід врахувати площі розкриву антен кожного типу, середня вихідна потужність кожного радіопередавального пристрою, шумову температуру кожного радіоприймального пристрою; склад і кількість пристроїв обробки інформації і кінцевої апаратури. Тому, ескізний проект як всієї системи, так і кожного великого вузла системи з декількома варіантами побудови, кожен з яких закінчується економічним розрахунком є вкрай необхідним.

При виборі варіантів проектування, крім витрат, необхідно враховувати терміни створення системи і окупність проекту. Якщо порівняти комбіновану низькоорбітальну супутникову систему з повно-низькоорбітальною супутниковою системою типу «Гонець» за приведеними витратами, то комбінована система має більш високу техніко-економічну ефективність. Капітальні вкладення в формулах (1) - (3) за рахунок запуску КА масою ~ 300 кг декількома ракетними носіями «Циклон» або «Рокот» роблять наведені витрати супутникової системи типу «Гонець» вище, ніж у комбінованій низькоорбітальній супутниковій системі, у якій кореневої КА ~ 300 кг, мінісупутників-ретрансляторів ~ 150 кг, мікросупутників ~ 50 кг. Тривалий час створення системи типу

«Гонець» з мінливими головними виконавцями, а отже з мінливими концептуальними положеннями проекту значно збільшили терміни створення системи і збільшили наведені витрати на експлуатацію згідно за формулою (5). Термін окупності проекту перевищив 10 років. Інтегральна характеристика порівняння доповнюється тим, що для функціонування комбінованої низькоорбітальної супутникової системи обрані діапазон НВЧ, система «Гонець» функціонує в діапазоні УВЧ і вартість основних складових - антен, радіопередавальних та радіоприймальних пристроїв вище. Пропускна здатність діапазону НВЧ потенційно вище, ніж діапазону УВЧ, що також зменшує терміни окупності проекту.

**Висновки та перспективи.** На закінчення відзначимо, що запропонований підхід до вирішення поставленого завдання, заснований на обліку виділених елементів системи, факторів і параметрів, які найбільш істотно впливають на вартість супутникової системи, дозволяє оцінити ТЕЕ системи. Викладена методика і отримані вирази для розрахунку приведених витрат на проектування, виробництво і експлуатацію супутникової системи дозволяють оцінити різні варіанти побудови системи по ТЕЕ на стадії її проектування. Як приклад економічної ефективності комбінованої системи може бути наступне порівняння: вартість однієї хвилини доступу до системи типу «Гонець» становить 0,6 дол. США, а вартість однієї хвилини доступу в комбінованій низькоорбітальної супутникової системі - 0,3 дол. США (орієнтовно).

Серійне виробництво КА для такої системи приблизно становить: кореневий супутник - 0,6 млн. дол. США, мінісупутника-ретранслятора - 0,2 млн. дол. США, мікросупутника-0,05 млн. дол. США.

### **Література**

1. Юрлов Ф.Ф. Технично-економическая ефективность сложных радиоэлектронных систем. М.: Сов. радио, 1980. 278 с.
2. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Гладких В.М., Сивкова Н.М. «Інноваційне рішення для LEO-системи з архітектурою «розподіленого супутника» // Журнал: Безпека інформаційних систем і технологій. 2020. Том 1, № 2. С. 77-83.
3. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств. Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.

### **References**

1. Yurlov F.F. Technical and economic efficiency of complex electronic systems. Moscow: Soviet radio,1980. 278 s.
2. Saiko V.G., Sivkova N.M. "Innov'yin Risnia for Leo-Systems with the Architecturian" Ripped Lady Supporter ".Magazine: Unforgettable Systems II Technologies. 2020. Vol. 1, No. 2. S. 77-83.
3. Gutkin L.S. Design of radio systems and radio devices. Textbook for universities. Moscow: Radio and Communication,1986. 288 s.