

УДК 005.4:629.7

doi: 10.32620/aktt.2025.4.10

Л. М. ЛУТАЙ

*Національний аерокосмічний університет**«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна***КОМПОНЕНТНО-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ
УТИЛІЗАЦІЇ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБІВ**

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційні технології, що впроваджуються в процеси утилізації складних технічних систем. Об'єктом дослідження є процеси етапу утилізації складних технічних систем. Після зняття високотехнологічних виробів з експлуатації настає перехід технічних систем до наступного етапу життєвого циклу – утилізації. До особливих видів складної техніки, що потребує перероблення із залученням організацій по утилізації, належать: військова техніка, медичне устаткування, джерела іонізуючого випромінювання і рентгени, авіаційна техніка, промислове обладнання та ін. Тому актуально проводити дослідження по створенню компонентно-орієнтованого методу аналізу процесів утилізації високотехнологічних виробів. Утилізація авіаційної техніки включає перероблення не тільки літальних апаратів та їх елементів конструкцій, а й відповідних приладів та обладнання. Завдання: системно дослідити логістику утилізації високотехнологічних виробів; розробити метод компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів; провести дослідження логістичних процесів утилізації з використанням мультиагентної моделі; сформулювати логістику зберігання та використання утилізованих компонент високотехнологічних виробів. Метою дослідження є розроблення сучасного підходу до взаємодії логістичних процесів етапу утилізації високотехнологічного виробу в рамках його життєвого циклу, а також оптимізаційного компонентно-орієнтованого методу утилізації авіаційної техніки, що базується на системному аналізі. Застосовуються такі математичні моделі та методи: системний аналіз, оптимізація, цілочисельне (булеве) програмування, експертні оцінки, мультиагентне моделювання. Шляхом декомпозиції здійснюється поділ високотехнологічного виробу, який знаходиться на етапі утилізації, на більш дрібні частини з метою ефективного впровадження процесу рециклінгу в даний етап життєвого циклу виробу. Запропонована модель оцінювання ефективності складу компонентів авіаційної техніки дозволяє оптимізувати характеристики складу, що зберігає компоненти, за рахунок визначення оптимального розміру складу і його комплектації.

Ключові слова: авіаційна техніка; утилізація високотехнологічних виробів; рециклінг; віртуальне підприємство; мультиагентне моделювання; логістичні процеси.

1. Вступ

На протязі минулого століття для більшості країн світу переважала лінійна економіка, що базується на принципі «take, make, waste» (брати, виробляти, викидати). З появою Індустрії 4.0 розвинені країни переходять від лінійної економіки до нової концепції «циркулярної економіки», в основі якої лежить ланцюжок "take, make, reuse" (брати, виробляти, використовувати повторно), а також принцип «нуль відходів». Суть сучасних принципів полягає у прагненні максимально можливого збереження матеріальних ресурсів, що містять у собі відпрацьовані прилади. Адже основні матеріальні ресурси розвинених країн світу витрачаються на виробництво високотехнологічних виробів, а рентабельність утилізаційних підприємств підвищується. Утилізація технічних систем, що досягли граничного стану, дає можливість отримати дохід від реалізації елементів високотехнологічної продукції.

Вивозити несправні застарілі прилади та обладнання на звичайні полігони твердих побутових відходів категорично заборонено. У конструкцію різних технічних пристроїв, крім придатних для вторинного виробництва елементів, входять також небезпечні та токсичні компоненти, які негативно впливають на довкілля. У зв'язку з цим цивілізовані країни запроваджують спеціальні правила та закони, що регулюють процес утилізації техніки. Збором та переробкою техніки можуть займатися виключно спеціалізовані організації та кваліфіковані спеціалісти. Залученням спеціальних організацій з утилізації є особливо затребуваним для підприємств металургійної, хімічної, машинобудівної, енергетичної галузей, медичних установ, об'єктів сільського господарства, оборонного промислу. Технічна база оборонної промисловості не перестає активно вдосконалюватися, що приводить до накопичення великих обсягів застарілих та відпрацьованих механізмів. Тисячі літальних апаратів щороку відпрацьовують свій ресурс, і більшість їхніх



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

складових потрапляють на цвинтарі та звалища. Отже подібні технічні системи потребують грамотної утилізації та контролю перероблення їхніх частин з урахуванням специфічних властивостей об'єктів (великі габарити, вищий клас небезпеки речовин, тощо), що, в свою чергу, дозволить не тільки мінімізувати шкоду від неправильно утилізованих відходів, а й дотримуватись норм екологічного законодавства.

Дослідження показують, що ринок утилізації літаків стає все дедалі актуальнішим через збільшення кількості списаних літаків, яке очікується в майбутньому [1]. Перероблення авіаційної техніки у безпечний для навколишнього середовища спосіб і використання складових літаків у різних сферах застосування забезпечить збереження певної вартості високотехнологічного виробу та зменшить виснаження природних ресурсів, і кількість звалищ [2]. Перероблення літаків можна розглядати як важливий крок на шляху до стійкої авіації, оскільки цінні ресурси, що використовуються в авіабудуванні, можуть бути повернуті для використання в економіці замкнутого циклу [1].

1.1. Аналіз стану питання

Рециклінг представляє із себе концепцію, що ґрунтується на принципі повторного використання ресурсів, отриманих із різноманітних вживаних речей. Він не тільки зменшує кількість відходів, що забруднюють довкілля, але й економить природні ресурси, знижує викиди парникових газів та створює нові робочі місця. У світі, та й в Україні, рециклінг набирає обертів і стає все більш актуальним. Впроваджуються нові технології перероблення відходів, а компанії все більше усвідомлюють важливість цієї сфери. Україна використовує різноманітні технології рециклінгу, включаючи механічний, хімічний та енергетичний. Один з найважливіших аспектів рециклінгу відходів виробництва і споживання стосується великої кількості матеріалів, які виробляються й використовуються у промисловості. Від металевих стружок до хімічних речовин, відходи виробництва можуть бути небезпечними та вимагають особливої уваги під час утилізації. Рециклінг цих матеріалів не тільки зберігає природні ресурси, але й зменшує забруднення довкілля.

Розглянемо сучасні проблеми рециклінгу високотехнологічної техніки (авіаційних виробів) аналізом існуючих публікацій:

1. Багатокомпонентність високотехнологічних виробів для потреб використання різних технологій рециклінгу.

Пропонується [3] здійснювати перероблення авіаційної техніки на основі багатфакторного ана-

лізу розбирання конструкції літака, що дозволяє підвищити ефективність перероблення. Управління даними в бізнесі перероблення має вирішальне значення для успіху циркулярної економіки. Використання Інтернету речей і наявність промислових патентів сприяють експорту вторинної сировини та створенню робочих місць у переробній галузі [4].

2. Наявність множини різних матеріалів (різних металів, композитів та пластмас, тощо), які потребують використання, для рециклінгу, складних та важко-хіміко-технологічних процесів.

Перероблення сировини здійснюється у сфері авіапромислу. Утворення відходів під час виробництва та на етапах завершення життєвого циклу, змушує великі авіаційні промислові підприємства переглянути підхід циклічної економіки до своїх матеріалів і дотримуватися нових нормативних актів [5]. Алюміній широко використовується в різних секторах, включаючи аерокосмічну та автомобільну промисловість. Розроблюються системи перероблення відходів аерокосмічної промисловості та сертифікації льотної придатності переробленого аерокосмічного алюмінієвого сплаву [6, 7]. В дослідженні запропоновано підхід по ефективному переробленню відходів розрізаної стрічки у високоякісні композитні матеріали, просуваючи, таким чином, екологічні практики в аерокосмічній галузі [8]. В публікації [9] запропоновано використовувати процеси пластичної деформації з метою перероблення алюмінію, що дозволяє отримати вторинну сировину вищої якості і економити енергію порівняно з використанням стандартних методів перероблення, що включають плавлення матеріалу. Авіаційна галузь переживає значний приплив нових, технологічних матеріалів та обладнання для літаків через зростаючий попит на авіаперевезення [10]. Нерідко впроваджується адитивне виробництво при створенні елементів конструкцій літальних апаратів [11]. Матеріали, що використовуються в літакобудуванні еволюціонують. Вуглецеві волокнисті полімери дедалі частіше використовуються в якості матеріалів в авіаційній промисловості завдяки легкій вазі, високій питомій міцності, пружності, стійкості до втомного руйнування, придатності для загального лиття великих елементів конструкцій і т.д [12]. У майбутньому переробка літаків зіткнеться з низкою серйозних проблем, оскільки кількість виведених з експлуатації літаків зростає, а частка композитних матеріалів, які підлягають переробленню, значно збільшиться в довгостроковій перспективі [3]. Відновлення композитних відходів є складним завданням, оскільки сьогодні не існує задовільного технологічного рішення щодо їх перероблення. В дослідженні [13] розглядаються методи перероблення полімерно-матричних композитів, які викори-

стовуються у багатьох галузях промисловості, включаючи аерокосмічну.

3. Мінімізація використання людського фактору для забезпечення безпеки процесу утилізації.

Електронні відходи вважаються одними із найшвидше зростаючих потоків відходів у світі. Відпрацьована електроніка становить велику небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я людей. Часто перероблення електронних відходів здійснюється неофіційно, що призводить до серйозного забруднення токсичними речовинами. Публікація [14] зосереджена на застосуванні аналізу матеріальних потоків обладнання і вивчає характеристики утворення нелегального та офіційного перероблення, економічні наслідки та екологічну небезпеку. Перероблення має бути підпорядковано законодавчому регулюванню, а технології перероблення потребують вдосконалення. Наразі в деяких країнах світу вивчається та впроваджується політика сприяння переробленню акумуляторів електромобілів. Одним із напрямків досліджень є поведінка споживачів [15]. У цих дослідженнях використовується моделювання на основі агентів і мережева еволюційна теорія ігор для розроблення моделі, що фіксує складну взаємодію між мешканцями та переробниками, аналізуючи вплив різних політик на ці коеволюційні системи [16].

4. Використання складних цифрових технологій в автоматизації процесів рециклінгу [17].

Нагальна потреба в сталому розвитку ринку літаків із закінченням терміну служби вимагає інноваційних досліджень передових методів перероблення з вищим рівнем відновлення та екологічно безпечнішими способами. Дослідження [10] заглиблюється у складність перероблення літаків, підкреслюючи її вирішальну роль у зменшенні залежності від первинних матеріалів та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Запропоновані сучасні технології перероблення мають вирішальне значення для створення циркулярної економіки та зниження викидів вуглецю, пов'язаних із виробництвом алюмінію, що робить їх важливим інструментом у прагненні до більш стійких виробничих процесів [9]. Завдяки переробці та повторному використанню компонентів літаків авіаційна галузь може значно скоротити видобуток та переробку нових матеріалів, що принесе суттєві економічні та екологічні вигоди. [10].

5. Забезпечення виконання сучасних екологічних вимог процесу рециклінгу.

Екологічні проблеми, які пов'язані з авіаційними викидами, стимулювали залучення додаткових зелених інвестицій [18] та розроблення нових підходів до зменшення викидів забруднюючих речовин. Запропонована модель [19] динаміки системи парку

літаків використовується для оцінки впливу технологічного прогресу на майбутні системи повітряного транспорту. З'являється тенденція сталого розвитку авіаційного палива, направлено на підвищення екологічної ефективності палива в авіаційній галузі [20, 21]. Пропонується високорівнева структура оцінювання життєвого циклу літальних апаратів (ЛА) в рамках технологічних розробок, включаючи дослідження різних шляхів декарбонізації авіації для досягнення нульового рівня викидів.

6. Мінімізація витрат та скорочення циклу рециклінгу.

Перероблення літій-іонних акумуляторів є актуальним через їх величезне застосування. Аналіз життєвого циклу підтвердив, що перероблення зменшує екологічний та економічний вплив. Виникає необхідність у посиленні регулятивних підходів та державної підтримки для покращення перероблення шляхом формулювання стратегії замкнутої економіки [22]. Для ефективної переробки літій-іонних батарей потрібен комплексний підхід. Повторне використання та перероблення вирішують різноманітні проблеми, зокрема дефіцит сировини та зростання витрат. Уряд має сприяти переробленню та спонукати до спрощення конструкцій батарей [23]. Прогнозування майбутніх відходів фотоелектричної енергії дає можливість забезпечити стабільний розвиток фотоелектричної індустрії. У дослідженні [24] пропонується багатофакторна модель, яка може бути використана для оцінювання потенційної економічної цінності перероблення. Запропонована модель допомагає приймати рішення по вживанню заходів на основі перероблених матеріалів з різних технологій. Питання щодо перероблення виникають не тільки для електронних чи електричних приладів, а й для цілих ландшафтів традиційної енергетики (шахти, свердловини, електростанції, підстанції, нафтопереробні заводи та сміттєзвалища, тощо). Покинуті енергетичні ландшафти є результатом прогалин і недоліків у нормативних актах щодо виведення з експлуатації енергетичних проєктів. Виникає необхідність удосконалення законодавчих документів щодо перероблення і утилізації енергетичних ландшафтів, що матиме вирішальне значення для забезпечення відновлення та переробки ландшафтів відновлюваної енергії в майбутньому [25]. Перероблення міді протягом багаторазового життєвого циклу виробів забезпечує стійке постачання міді, але спричиняє складні взаємопов'язані наслідки для економіки, ресурсів і навколишнього середовища. В дослідженні [26] запропонована модель оцінки стійкості перероблення міді з кількома життєвими циклами. В основі моделі лежить використання системної динаміки, моделі на основі агентів і оцінки життєвого циклу для побудови взаємопов'язаних шляхів для економіки під час перероблення.

7. Складність в реалізації управління рециклінгом через розподіленість підприємств, які проводять утилізацію високотехнологічної техніки [2, 27].

Утилізація авіаційної техніки є дуже складним багатофакторним процесом. Навіть такі великі виробники літаків, як Boeing і Airbus об'єднуються з технологічними фірмами, компаніями з демонтажу та іншими підприємствами, щоб вирішувати проблеми повного перероблення літаків та всіх матеріалів, які використовуються для виготовлення авіаційної техніки.

Це існуючий перелік проблем, який продовжує поповнюватися в умовах особливого стану країни та нових вимог до проведення утилізації, що вказує на актуальність та необхідність створення нових підходів до рециклінгу.

В даній публікації представлено можливе рішення щодо частини вказаних проблем, а саме:

- системне дослідження логістики утилізації високотехнологічних виробів;
- проведення багатошарової декомпозиції архітектури високотехнологічного виробу на компоненти для підвищення ефективності процесу утилізації;
- оптимізація витрат для проведення рециклінгу;
- формування логістики зберігання для повторного використання компонент високотехнологічних виробів.

1.2. Мета і задачі дослідження

Виникає протиріччя між необхідністю проведення утилізації високотехнологічної техніки (авіаційних виробів), з урахуванням сучасних технологій та екологічних вимог, а також відсутністю нових моделей, які дозволяють, з використанням компонентно-орієнтованого підходу та інформаційної технології, проводити процес рециклінгу, який буде задовольняти існуючим вимогам.

Метою дослідження є розроблення сучасного підходу до взаємодії логістичних процесів етапу утилізації високотехнологічного виробу в рамках його життєвого циклу, а також оптимізаційного компонентно-орієнтованого методу утилізації авіаційної техніки, що базується на системному аналізі.

У відповідності до поставленої мети дослідження, необхідно вирішити наступні завдання:

1. Системно дослідити логістику утилізації високотехнологічних виробів.
2. Розробити метод компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів.
3. Провести дослідження логістичних процесів утилізації з використанням мультиагентної моделі.
4. Сформувані логістику зберігання та використання утилізованих компонент високотехнологічних

виробів.

Стаття побудована наступним чином:

Розділ 2 присвячено системному аналізу логістичних процесів щодо утилізації високотехнологічних виробів.

Розділ 3 присвячено розробленню методу компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів.

Розділ 4 присвячено дослідженню логістичних процесів утилізації з використанням мультиагентної моделі.

Розділ 5 пов'язаний з логістикою зберігання та використання утилізованих компонент високотехнологічних виробів. Також розділ пов'язаний зі створенням мультиагентної моделі для дослідження логістики обслуговування складу компонент високотехнологічних виробів і моделі оцінювання ефективності логістики складських операцій.

Розділ 6 містить обговорення наукових результатів та їх представлення у вигляді методології дослідження етапу утилізації високотехнологічного виробу в рамках його життєвого циклу, яка дозволяє підкреслити значущість проведених досліджень для практичного застосування.

Розділ 7 завершує статтю підсумовуванням висновків, дає перспективу для подальших досліджень та створення прикладної інформаційної технології.

2. Системне уявлення логістичних процесів утилізації високотехнологічних виробів

Відсутність впровадження ефективних програм і застосування високотехнологічних способів організації на етапі утилізації складних технічних систем спонукає до створення моделей формалізованого опису етапу утилізації високотехнологічних виробів.

Авіаційна техніка відноситься до екологічно небезпечної як на етапі виробництва, так і на етапі експлуатації та утилізації. В результаті деградації здійснюється зниження вартості високотехнологічного виробу, а вартість процесу експлуатації збільшується. Закінченням стадії експлуатації вважають момент документального оформлення рішення про неможливість або недоцільність подальшої експлуатації даного виробу за технічним станом, через моральне або фізичне старіння, значні матеріальні витрати та інші чинники. Знятий з експлуатації виріб може бути переведено в навчальне приладдя, переобладнано для використання не за призначенням, або утилізовано. Сформована у даному дослідженні модель взаємодії логістичних процесів етапу утилізації складної технічної системи в рамках її життєвого циклу представлена на рис. 1.



Рис. 1. Модель взаємодії логістичних процесів утилізації високотехнологічного виробу

Запропонована модель передбачає замикання реалізації життєвого циклу високотехнологічного виробу на етапі утилізації за рахунок рециклінгу, тобто повторного використання справних компонентів при ремонті і технічному обслуговуванні авіаційної техніки, що знаходиться на етапі експлуатації. Крім того, перероблені складові елементи конструкцій знятої із експлуатації складної технічної системи можуть бути використані, як вторинна сировина, наявність якої враховується при підготовці виробництва, яке здійснюється в рамках віртуального підприємства [28].

В даному дослідженні розглядаються процеси утилізації авіаційної техніки, що мають свою специфіку і особливості. Нераціональним, а також екологічно і економічно не вигідним є рішення по звичайному розпилюванню і механічному подрібненню та відправленню на звалище повітряного судна після зняття його з експлуатації. Літальні апарати містять цінні компоненти і деталі, що можуть бути повернуті для обслуговування через вторинний ринок запчастин або впроваджені в процес авіарециклінгу чи комплексного утилізування авіаційної техніки.

Досвід закордонних авіакомпаній, на кшталт Boeing, Airbus, говорить про те, що утилізація літака може принести значні доходи. На борту пасажирського лайнера знаходиться більше 6 млн. різних деталей, близько 70 т. високоякісного алюмінію, і приблизно 30 % деталей, вузлів і конструкцій можуть бути впроваджені в експлуатацію інших пасажирських літаків.

До складу літака входять алюміній та його сплави, сталь, композиційні матеріали, титан та коштовні метали, екологічне та технологічно правильне вилучення яких сприяє повторному використанню сировини в авіабудівній та інших галузях машинобудування.

Авіаційна техніка, як і будь-який інший технічний об'єкт машинобудування, є об'єктом проектування і являє собою складну технічну систему. На етапі проектування високотехнологічного виробу здійснюється формування архітектури створюваної системи, що може здійснюватися на основі компонентно-орієнтованого підходу [29]. В даному дослідженні пропонується процеси етапу утилізації описати і формалізувати, використовуючи компонентно-орієнтований метод та оптимізаційні моделі утилізації авіаційної техніки.

3. Метод компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів

Розглянемо етапи запропонованого методу компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів:

1. Приймається рішення по зняттю із експлуатації зразка ЛА і подальшому переходу високотехнологічного виробу до утилізації, як до етапу життєвого циклу технічної системи. Таке рішення може бути прийнято як через фізичну деградацію повітряного

судна, так і через його моральне старіння [30, 31]. Зразок ЛА в аеропорту переміщується до критого ангара на аеродромі.

2. Для реалізації авіарециклінгу, такі компанії як Boeing і Airbus практикують створення «пулів», так званих об'єднань компаній-учасників авіапромислу, з метою накопичення і подальшого використання спільного фонду запчастин. Таке об'єднання дозволяє скоротити час і знизити вартість ремонту лайнера.

В даній публікації пропонується створювати віртуальне підприємство, поява якого здійснюється за державної підтримки Міністерства з питань стратегічних галузей промисловості України. Віртуальне підприємство, що створюється для реалізації етапу утилізації авіаційної техніки, представляє із себе організаційну структуру, до складу якої входять неоднорідні взаємодіючі між собою агенти, що розташовані в різних місцях і мають спільну мету по реалізації проєктів утилізації авіаційної техніки. Таким чином, створення віртуального підприємства пов'язано з моделюванням взаємодії складних, неоднорідних, віддалених один від одного агентів і охоплює управління всіма процесами утилізації авіаційної техніки як етапу життєвого циклу. Подальші етапи методу компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів виконуються в рамках створюваного віртуального підприємства.

3. Здійснюється видалення технічних рідин, залишків палива, газоподібних і токсичних речовин із резервуарів зразка ЛА.

4. Здійснюється формування бригади механіків (фахівців) для виконання подальшої декомпозиції зразка ЛА, який знаходиться на 0-му рівні декомпозиції технічної системи.

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_k\}$, де k – являє собою певну кількість фахівців, що потрібно задіяти для здійснення декомпозиції ЛА.

5. Сформована бригада механіків (фахівців) разом із необхідним спеціальним обладнанням для демонтажу транспортується до місця дислокації ЛА. Процес декомпозиції лайнера є трудомістким і пов'язаний з дотриманням підвищених норм санітарної безпеки проведення робіт.

6. Здійснення декомпозиції першого рівня архітектури зразка ЛА. Формування множини компонентів на цьому рівні: планер K^1_1 , силова установка K^1_2 , обладнання K^1_3 . Для формалізованого представлення декомпозиції архітектури зразка ЛА скористаємося теоретико-множинним описом:

$$\{K^0_1\} = \{\{K^1_1\}, \{K^1_2\}, \{K^1_3\}\}. \quad (1)$$

Декомпозиція архітектури технічної системи на етапі утилізації враховує особливості даного етапу

життєвого циклу.

7. Здійснення декомпозиції другого рівня архітектури зразка ЛА. Серед типових компонентів на даному рівні можна виділити такі: фюзеляж K^2_1 , шасі K^2_2 , система керування K^2_3 , крило K^2_4 , покрив K^2_5 , металева та пластикова обшивки K^2_6 , паливна система K^2_7 , двигуни K^2_8 , система управління двигунами K^2_9 , пасажирське обладнання K^2_{10} , контрольно-вимірювальне обладнання K^2_{11} , радіоелектронне обладнання K^2_{12} , пілотажно-навігаційне обладнання K^2_{13} , система кондиціонування повітря K^2_{14} , допоміжне технологічне обладнання K^2_{15} . Представимо даний рівень в теоретико-множинному описі:

$$\begin{aligned} \{K^1_1\} &= \{\{K^2_1\}, \{K^2_2\}, \{K^2_3\}, \\ &\quad \{K^2_4\}, \{K^2_5\}, \{K^2_6\}\}; \\ \{K^1_2\} &= \{\{K^2_7\}, \{K^2_8\}, \{K^2_9\}\}; \\ \{K^1_3\} &= \{\{K^2_{10}\}, \{K^2_{11}\}, \{K^2_{12}\}, \\ &\quad \{K^2_{13}\}, \{K^2_{14}\}, \{K^2_{15}\}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

8. Здійснюється формування групи експертів для подальшого аналізу компонентів багаторівневої архітектури зразка ЛА на етапі утилізації. Експерти є спеціалістами у галузі авіаційної промисловості.

9. Здійснюється транспортування та перевезення, отриманих в результаті декомпозиції другого рівня, компонентів до найближчого сортувального підприємства, яке було визначено в рамках віртуального підприємства, що здійснює етап утилізації ЛА.

10. На сортувальному підприємстві компоненти підлягають подальшому аналізу з боку залучених експертів. Компоненти, що були отримані на j -му рівні декомпозиції, оцінюються експертами і по результатам оцінювання мають бути віднесені до однієї із трьох категорій:

Категорія I – це компоненти, що можуть бути повторно використані при ремонті (заміні) комплектуючих на літальних апаратах, що, на цей момент, знаходяться на етапі експлуатації, і потребують заміни чи ремонту компонентів після діагностування під час технічного обслуговування.

Категорія II – компоненти, що підлягають переробленню до вторинної сировини. ЛА містить велику кількість металевих та композиційних компонентів. Шляхом перероблення компонента здійснюється виділення цінних сплавів і металів. В процесі перероблення компонента можна отримати чорні, кольорові метали, олово, мідь, тощо.

Категорія III – компоненти, що вже не приймають участі у рециклінгу і підлягають подальшому знищенню.

4. Дослідження логістичних процесів утилізації з використанням мультиагентної моделі

Складність процесів утилізації високотехнологічних виробів потребує урахування логістичної послідовності дій щодо рециклінгу на кожному рівні багаторівневої архітектури виробу. Тому актуально представити процес утилізації за допомогою логістичного підходу, який об'єднує допоміжні операції (наприклад, транспортування) з основними (демонтаж виробу).

Оцінювання компонента поточного j -го рівня декомпозиції архітектури ЛА на можливість його повторного використання здійснюється при виконанні певних кроків:

1.1. Для повторного використання компонентів необхідно враховувати середній рівень працездатності компонента.

В попередніх публікаціях за даною тематикою авторами було запропоновано компонентну модель визначення рівня впливу процесів деградації на стан авіаційної техніки, що дозволяє визначити рівень працездатності компонента, враховуючи вплив деградаційних процесів на складову архітектури ЛА. Середнє значення рівня працездатності компонента визначається за трьома показниками: коефіцієнтом варіації узагальненого процесу деградації, показником відносного напрацювання компонента та інтенсивності попередніх відмов компонента [32]. Отже однією із оцінок для прийняття рішення щодо повторного використання компонента виступає середній рівень працездатності компонента. Індекс середнього рівня працездатності компонента може коливатися в діапазоні $[0..4]$. Виходячи із запропонованої компонентної моделі визначення рівня впливу процесів деградації [32], в даному дослідженні будемо вважати: якщо округлений індекс середнього рівня працездатності компонента $avg\ index \leq 2$, то в цьому випадку компонент, що аналізується, буде віднесено до категорії I. Тобто до категорії компонентів, що можуть бути повторно використані при ремонті інших авіалайнерів, які знаходяться в експлуатації. Такий компонент буде транспортовано на склад віртуального підприємства, де компонент повторного використання буде зберігатися. Вартість такого компонента визначається таким чином:

$$W_{K_i}^j = W_{Li} + W_{Si} - W_{K_{Ui}}^j, \quad (3)$$

де W_{Li} – вартість логістики постачання i -го компонента повторного використання на склад, з урахуванням оптимальної завантаженості транспортного засобу, що буде здійснювати перевезення.

W_{Si} – вартість зберігання i -го компонента на складі.

$W_{K_{Ui}}^j$ – вартість i -го компонента з урахуванням його вживаності (даний показник має відношення до прибутку від реалізації даного етапу утилізації).

1.2. На даному етапі за рекомендацією експертів може бути додатково сформовано набір характеристик, значення яких визначають якість компонента, що розглядається, з точки зору можливості його повторного використання. Оцінювання значень характеристик здійснюється експертами.

2. Якщо середній рівень працездатності компонента (якість компонента), що розглядається не є прийнятним, експертним шляхом здійснюється аналіз компонента на можливість його перероблення в тому вигляді, в якому він є, з метою отримання вторинної сировини. Перероблення компонентів літальних апаратів у безпечний для навколишнього середовища спосіб і використання компонентів літаків у різних сферах застосування зменшить виснаження природних ресурсів і кількість звалищ.

Метою перероблення є отримання міді, олова, срібла, золота і платини з деталей комп'ютерів, навігаційного обладнання, засобів зв'язку. Залишки апаратури спочатку розбирають і розсортовують ручним способом. А далі в технологічних лініях здійснюється хімічне перероблення матеріалів.

У випадку можливості перероблення компонента до вторинної сировини, на даному рівні декомпозиції, експертно приймається рішення по віднесенню компонента до категорії II.

2.1. Формується логістичний маршрут постачання компонента на переробне підприємство.

2.2. Експертним шляхом формуються критерії оцінювання якості отриманої сировини після перероблення i -го компонента на j -му рівні декомпозиції:

$$C_i^j = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_R\}, \quad (4)$$

де R – кількість критеріїв оцінювання якості отриманої сировини.

2.3. Визначаються вагові коефіцієнти Q_i для R критеріїв, по яким здійснюється оцінювання якості отриманої сировини. Визначення вагових коефіцієнтів здійснюється експертним шляхом. При цьому

$$\sum_{g=1}^R Q_g = 1. \quad (5)$$

2.4. На наступному етапі здійснюється вибір шкали для подальшого оцінювання кожного g -го критерію.

Шкала для оцінювання може представляти із себе якісні оцінки (наприклад, «добре», «задовільно», «погано» і т.п.), можливі лінгвістичні значення (A, B, C, D) або числові значення (наприклад, від 1 до 10). Вибір шкали, а також оцінювання якості отриманої сировини здійснюється експертним шляхом.

На даному етапі будемо використовувати п'ятибальну числову шкалу для оцінювання кожного g -го критерію з урахуванням його важливості. У цьому випадку, узагальнена оцінка якості отриманої сировини після перероблення i -го компонента на j -му рівні декомпозиції визначається таким чином:

$$M_{av}^j = \sum_{g=1}^R \frac{Q_g * \sum_{e=1}^E M_g^e}{E}, \quad (6)$$

де $e = \overline{1, E}$, E – кількість експертів, що були задіяні в оцінюванні якості отриманої сировини після перероблення;

M_g^e – оцінка, визначена e -им експертом для g -го критерію.

Після визначення узагальненої оцінки якості отриманої сировини, здійснюється пошук підприємства, що займається організацією виробництва складних технічних систем і має потребу в, отриманій після перероблення, сировині.

Узагальнена оцінка якості отриманої сировини після перероблення коливається в діапазоні значень $[0, \dots, 5]$. Визначена узагальнена оцінка якості впливає на вартість отриманої сировини після перероблення. Вартість отриманої сировини після перероблення i -го компонента, що знаходиться на j -му рівні декомпозиції визначається таким чином:

$$W_{Xi}^j = W_{Pi} + W_{Pi}^j - W_c^j(M_{av}^j) + W_m, \quad (7)$$

де W_{Pi} – вартість логістики постачання i -го компонента на переробне підприємство, з урахуванням оптимальної завантаженості транспортного засобу, що буде здійснювати перевезення.

W_{Pi}^j – вартість перероблення i -го компонента на j -му рівні декомпозиції з метою отримання вторинної сировини.

$W_c^j(M_{av}^j)$ – вартість отриманої сировини з урахуванням її якості (даний показник має відношення до

прибутку від реалізації даного етапу утилізації).

W_m – вартість транспортування вторинної сировини на виробниче підприємство.

Експерти відзначають, що утилізація авіалайнерів у відриві від процесу їх створення є економічно необґрунтованою. Вартість матеріалів, видобутих з літака, порівняно з витратами, які необхідні для його транспортування і розбирання є значно нижчою. Саме тому віртуальне підприємство, що займається організацією процесів утилізації ЛА, повинно існувати за рахунок державної підтримки.

3. Наступний етап виконується, якщо i -й компонент на j -му рівні декомпозиції не може бути перероблений у тому вигляді в якому він є, але при цьому архітектура виробу передбачає наявність нижчих рівнів декомпозиції. У такому випадку здійснюється перехід на наступний $(j+1)$ -й рівень декомпозиції. Після чого виконується перехід на етап 10 (розділ 3). Формується множина компонентів, що знаходяться на наступному рівні декомпозиції. Компоненти $(j+1)$ -го рівня декомпозиції підлягають подальшому аналізу з боку залучених експертів. По результатам оцінювання компоненти мають бути віднесені до I або II категорії.

4. Якщо декомпозицію здійснити вже не доцільно, або відсутні більш нижчі рівні декомпозиції в архітектурі виробу, множина компонентів на поточному рівні оцінюється на можливість повторного використання, перероблення чи знищення. Тобто, експертами здійснюється визначення, до якої із трьох категорій (I, II чи III) буде віднесено компонент, що розглядається.

У разі прийняття рішення щодо знищення компонента, здійснюється пошук найближчої організації, яка може реалізувати знищення компонента такого типу. Вартість знищення компонента визначається таким чином:

$$W_{Di}^j = W_{Hi} + W_{di}^j, \quad (8)$$

де W_{Hi} – вартість логістики постачання i -го компонента до організації, що здійснює знищення, з урахуванням оптимальної завантаженості і безпечності транспортного засобу, що буде здійснювати перевезення.

W_{di}^j – вартість знищення i -го компонента на j -му рівні декомпозиції.

Схема алгоритму методу компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів представлена на рис. 2.

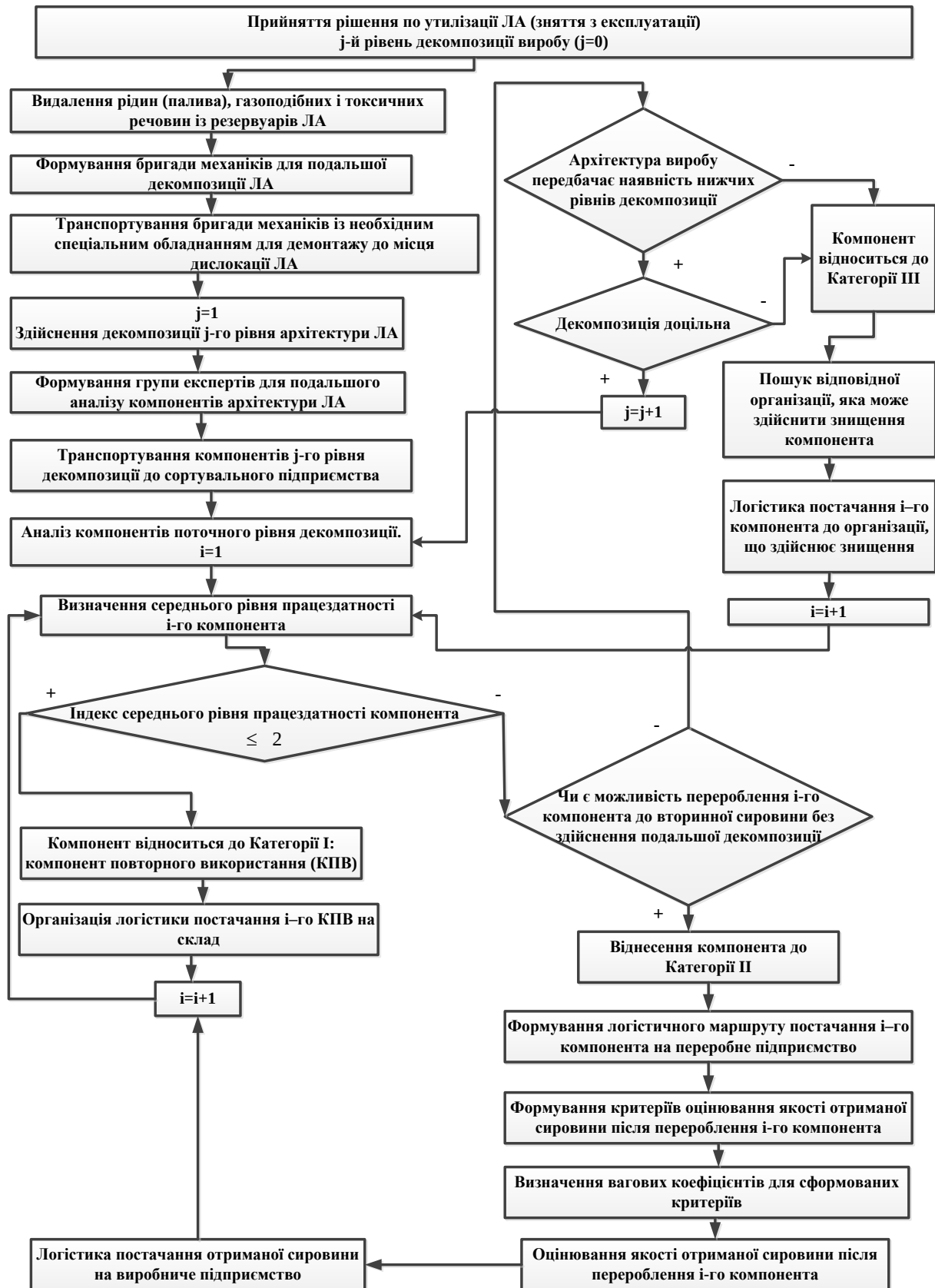


Рис. 2. Схема алгоритму методу компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів

По результатам здійснення цього етапу життєвого циклу утилізації авіаційної техніки, визначимо вартість:

$$W_{AE} = \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^l W_{K_i}^j + \sum_{j=1}^f \sum_{i=1}^q W_{X_i}^j + \sum_{j=1}^y \sum_{i=1}^v W_{D_i}^j, \quad (9)$$

де l – кількість компонентів повторного використання на поточному рівні декомпозиції;

t – поточна кількість рівнів декомпозиції, на яких було виділено компоненти повторного використання;

q – кількість компонентів на поточному рівні декомпозиції, які підлягали переробленню до отримання вторинної сировини;

f – поточна кількість рівнів декомпозиції, на яких було вибрано компоненти для перероблення з метою отримання вторинної сировини.

v – кількість компонентів на поточному рівні декомпозиції, які підлягали знищенню.

y – поточна кількість рівнів декомпозиції, на яких було виділено компоненти, що підлягали знищенню.

Ефективна робота віртуального підприємства, щодо планування та забезпечення процесів етапу утилізації, полягає у забезпеченні оптимальної вартості цього етапу життєвого циклу авіаційної техніки.

Отже мінімізуємо вартість реалізації етапу утилізації ЛА:

$$\min W_{AE}. \quad (10)$$

при виконанні умов:

$$R_{AE} \leq R'_{AE}, T_{AE} \leq T'_{AE}, \quad (11)$$

де R'_{AE} – допустимий ризик виконання процесів утилізації ЛА;

T'_{AE} – допустима тривалість виконання процесів утилізації ЛА.

Для дослідження послідовності логістичних дій, які необхідно виконувати в процесі утилізації високотехнологічного виробу була розроблена мультиагентна модель, яка дозволяє у часі, формувати план-графік виконання як основних, так і допоміжних операцій рециклінгу. На рис. 3 представлена структура мультиагентної моделі утилізації зразка ЛА.

Проведемо основні кроки дослідження процесу утилізації з використанням розробленої мультиагентної моделі.

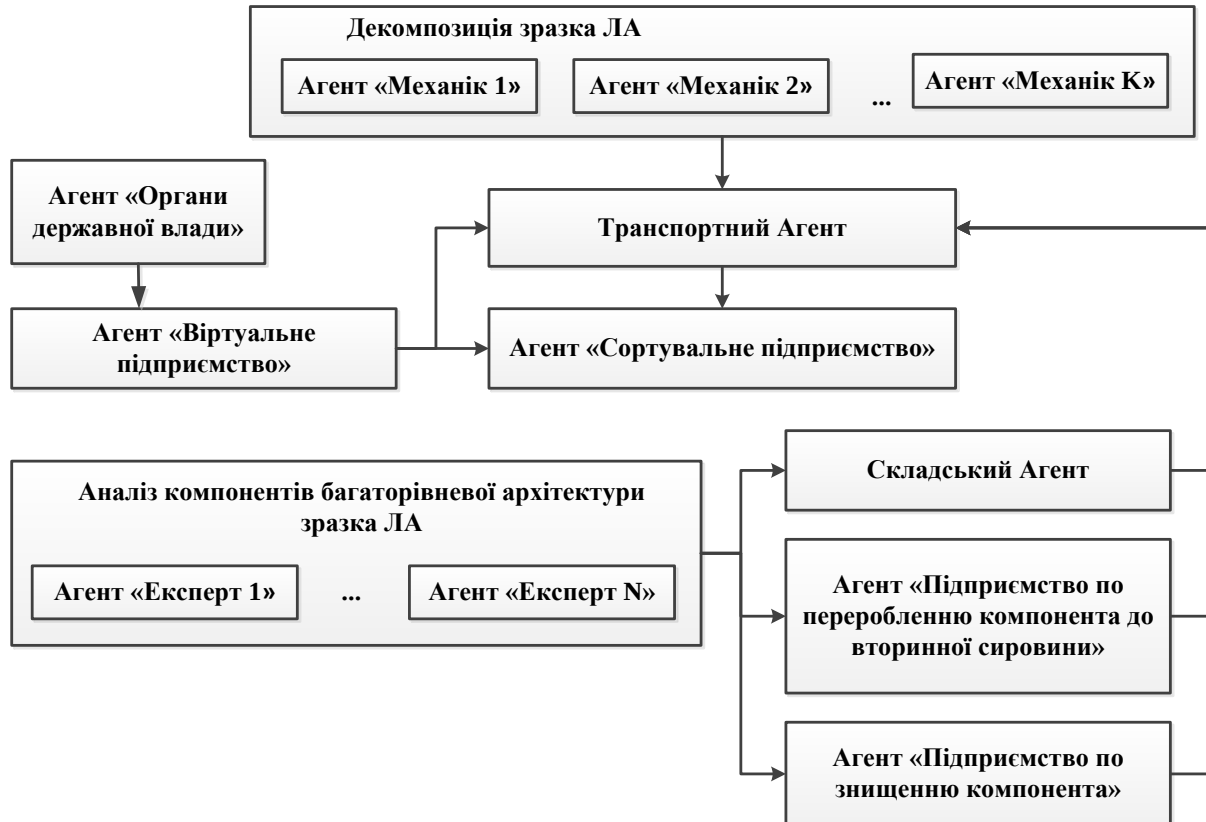


Рис. 3. Узагальнена мультиагентна модель утилізації авіаційної техніки

На першому кроці командою механіків здійснюється декомпозиція високотехнологічного виробу до другого рівня. На наступному кроці виконується транспортування, отриманих в результаті декомпозиції, компонентів до найближчого сортувального підприємства, яке було визначено в рамках віртуального підприємства, що здійснює етап утилізації високотехнологічного виробу. На подальшому кроці група експертів оцінює отримані, в результаті декомпозиції, компоненти і відносить їх до однієї із трьох категорій: компоненти, які можуть бути повторно використані при ремонті (заміні) комплектуючих на високотехнологічних výroбах, що знаходяться на етапі експлуатації; компоненти, що підлягають переробленню до вторинної сировини; компоненти, що вже не приймають участі у рециклінгу і підлягають подальшому знищенню.

На кінцевому кроці здійснюємо впровадження обґрунтованих рішень, які приймаються стосовно розглянутих і оцінених експертами компонентів.

5. Логістика зберігання та використання утилізованих компонент високотехнологічних виробів

Управління маршрутами та перевезеннями дозволяє скоротити час доставки та знизити витрати на транспорт. Серед завдань логістики постачання компонентів на склад можна виділити задачу оптимізації управління складом. Ефективність складської логістики напряму залежить від безпеки та мінімізації ризиків зберігання. Оптимізація логістики включає в себе не тільки управління процесами перевезення та доставки, але й забезпечення надійності зберігання. Правильна організація складських процесів дозволяє скоротити час інвентаризації та полегшити процес відвантаження компонентів. Це дозволяє скоротити час простоїв транспортних засобів на складі та знизити витрати на доставку необхідних компонентів. Автоматизація процесу обліку має здійснюватися із залученням сучасних інформаційних технологій і систем, що дозволяють прискорити оброблення даних, зменшити ймовірність помилок і підвищити ефективність роботи складу. Такі системи дозволяють швидко і точно ідентифікувати і відстежувати кожен компонент, що істотно полегшує процес його пошуку і переміщення.

Для створення оптимальної схеми переміщення компонентів на складі слід враховувати різні фактори. По-перше, необхідно проаналізувати потоки компонентів на складі і знайти найбільш ефективне розташування кожного компонента. Розподіл складу на зони, з урахуванням характеристик компонентів, може значно полегшити процес переміщення компо-

нентів і скоротити час, що витрачається на пошук необхідних компонентів. Оптимізація розміщення компонентів на складі може бути досягнута за допомогою системи кодування і додаткових засобів ідентифікації. Для створення оптимальної схеми переміщення компонентів на складі також важливо оптимізувати маршрути переміщення. Маршрутизація компонентів може включати в себе групування компонентів зі схожими характеристиками. Це дозволяє скоротити час переміщення компонентів і підвищити загальну ефективність логістичного ланцюга. Створення оптимальної схеми переміщення компонентів на складі є ключовим аспектом у досягненні високої ефективності складської логістики.

Використання механізмів і обладнання для прискорення процесів у складській логістиці дозволяє значно підвищити ефективність роботи та скоротити час виконання операцій. Це, в свою чергу, веде до підвищення загальної продуктивності та зниження витрат. Автоматизовані системи дозволяють скоротити час, що витрачається на виконання рутинних завдань, і зменшити ймовірність помилок. Сучасні склади все частіше оснащуються роботизованими системами, що дозволяє автоматизувати переміщення і сортування.

5.1. Мультиагентна модель для дослідження логістики обслуговування складу компонент високотехнологічних виробів

В попередніх дослідженнях вже було запропоновано модель пошуку несправностей і виконання ремонтних робіт чи заміни компонентів при здійсненні технічного обслуговування ЛА [28]. Під час реалізації етапу утилізації здійснюється виділення компонент повторного використання, що постачаються на склад авіакомпанії чи на склад ремонтного підприємства, яке здійснює технічне обслуговування ЛА. Саме для виконання технічного обслуговування і ремонту ЛА формується склад.

З метою здійснення оперативного ремонту ЛА, необхідно сформувати ефективну структуру складу і систему обліку компонентів ЛА, що знаходяться на складі і постачаються у вигляді компонентів повторного використання. Тому була розроблена мультиагентна модель для аналізу логістики переміщень на складі компонент високотехнологічної техніки. Запропонована структурна мультиагентної моделі, що враховує оптимальне переміщення компонентів на складі, представлена на рис. 4, де:

A_1 – агент, у вигляді ділянки розвантаження компонентів (у тому числі компонентів повторного використання) із транспорту прибуття;

A_2 – агент, у вигляді ділянки тимчасового зберігання компонентів, що прибувають на склад;

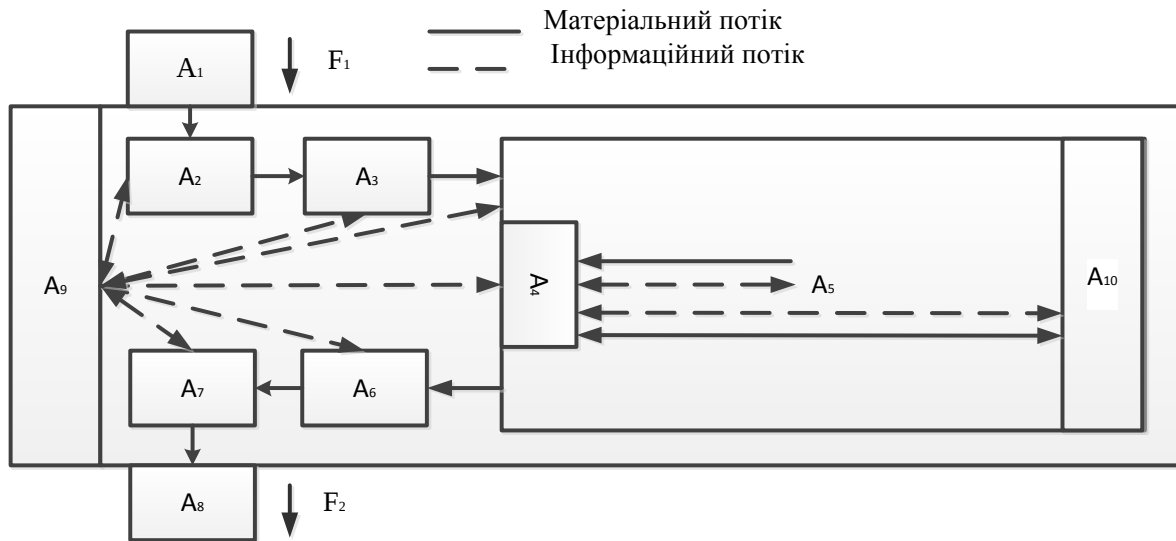


Рис. 4. Структурна схема мультиагентної моделі аналізу переміщень компонентів на складі

A₃ – агент, у вигляді ділянки прийому, сортування і здійснення обліку компонентів, що надходять на склад;

A₄ – агент, у вигляді ділянки вибору компонентів на замовлення авіакомпанії чи ремонтного підприємства;

A₅ – агент, у вигляді ділянки (зони) зберігання компонентів;

A₆ – агент, у вигляді ділянки комплектації компонентів на замовлення авіакомпанії чи ремонтного підприємства;

A₇ – агент, у вигляді ділянки тимчасового зберігання компонентів, що видаються зі складу;

A₈ – агент, у вигляді ділянки навантаження компонентів на транспорт відправлення;

A₉ – агент, у вигляді ділянки обліку і керування складом;

A₁₀ – агент, у вигляді ділянки розміщення стаціонарного підйомно-транспортного та іншого складського обладнання;

F₁ – агент, у вигляді транспорту доставки компонентів (у тому числі, компонентів повторного використання) на склад;

F₂ – агент, у вигляді транспорту видачі компонентів зі складу.

території складу. Коефіцієнт складського перероблення компонентів визначається таким чином:

$$C_R = \frac{P_R}{P_H}, \quad (12)$$

де P_R – величина складської вантажопереробки компонентів (загальна кількість компонентів, що підлягає складським процедурам і операціям – перевантаження, сортування, навантаження, розвантаження, складування, комплектування необхідних компонентів, формування логістичної партії, тощо);

P_H – величина складського вантажообігу компонентів, яка характеризується кількістю компонентів різних видів, що пройшли через склад на протязі певного періоду часу (вимірюється в роках). P_H визначає ступінь трудомісткості та інтенсивності виконання процедур і операцій, які виконуються на складі.

Коефіцієнт складського перероблення компонентів може досягати величини два і більше. При цьому, чим менше значення цього коефіцієнта, тим раціональніше організовано технологічний процес на складі.

Із усіх складських процедур і операцій, у даному випадку, аналізу підлягає кількість перевантажень продукції (компонентів, шт). Це пов'язано з тим, що інші складські процедури і операції є обов'язковими, а кількість перевантажень залежить від ступеня раціональності організації складської діяльності, оптимізації використання складського обладнання і підйомно-транспортних засобів.

5.2. Оцінка ефективності логістики складських операцій

Одним із найважливіших показників роботи такого складу є складська переробка компонентів C_R . При цьому коефіцієнт складської переробки компонентів представляє із себе показник, що враховує кількість перевантажень і переміщень компонентів на

Другим показником ефективності складу компонент ЛА позначимо коефіцієнт використання площі складських приміщень. Рациональне використання площі складських приміщень (включаючи усі їх види) безпосередньо впливає на величину складських витрат – прийом і контроль компонентів, що надходять до складу, їх складування і зберігання.

Коефіцієнт використання площі складських приміщень пропонується розраховувати наступним чином:

$$C_U = \frac{S_{uf}}{S_g}, \quad (13)$$

де S_{uf} – корисна площа складу, яка зайнята компонентами, що зберігаються, m^2 ;

S_g – загальна площа складу, m^2 .

В свою чергу, корисна площа складу розраховується по наступній формулі:

$$S_{uf} = \frac{D_g}{L}, \quad (14)$$

де D_g – величина встановленого загального запасу компонентів, які зберігаються на складі, т;

L – навантаження на 1 m^2 площі підлоги в залежності від типу компонентів, що зберігаються, t/m^2 .

Величина D_g визначається таким чином:

$$D_g = \sum_{i=1}^n D_{K_i}, \quad (15)$$

де D_{K_i} – вага i -го компонента K , який зберігається на складі, кг;

n – кількість компонентів, що зберігаються на складі.

Загальна площа складу включає корисну і додаткову площі складу, які є необхідними для здійснення складських процедур і операцій. Отже, загальна площа складу розраховується таким чином:

$$S_g = S_r + S_{of} + S_{eq} + S_p, \quad (16)$$

де S_r – площа ділянок прийому, контролю, сортування, комплектування, пакування і відвантаження компонентів, m^2 ;

S_{of} – службова площа, що зайнята конторськими, санітарно-гігієнічними та іншими службовими приміщеннями, m^2 ;

S_{eq} – площа, яка зайнята стаціонарним підйомно-

транспортним та іншим складським обладнанням, m^2 ;

S_p – допоміжна площа, яка зайнята проїздами і проходами, m^2 .

Третім показником ефективності складу є вантажонапруженість складу. Вантажонапруженість складу характеризує завантаження в вагових одиницях (як правило, в тонах) 1 m^2 корисної площі складу на протязі року і є показником ефективності та інтенсивності використання складських площ. Вантажонапруженість складу пропонується розраховувати наступним чином:

$$H = \frac{D_{uf}}{S_g}, \quad (17)$$

де D_{uf} – величина застосованих під час технічного обслуговування і ремонту компонентів в вагових одиницях.

Величина D_{uf} визначається таким чином:

$$D_{uf} = \sum_{i=1}^s D_{K_i}, \quad (18)$$

де s – кількість компонентів, що були використані під час технічного обслуговування і ремонту на протязі року.

Четвертим показником виступає коефіцієнт використання складського підйомно-транспортного обладнання в часі.

Склад авіаційної техніки оснащений складським обладнанням, призначеним для зберігання компонентів ЛА, а також підйомно-транспортним обладнанням. Одним із важливих показників роботи підйомно-транспортного і складського обладнання є коефіцієнт його використання у часі. Цей показник характеризує ступінь організації складу і долю використання механізмів в проведенні процедур і операцій по переміщенню компонентів на складі. Коефіцієнт використання складського обладнання в часі розраховується наступним чином:

$$C_T = \frac{T_f}{T_g}, \quad (19)$$

де T_f – фактичний час перебування підйомно-транспортного обладнання в роботі, год/добу;

T_g – загальний час роботи складу, год/добу.

П'ятим показником ефективності роботи складу виступає собівартість складського перероблення компонентів, що зберігаються на складі. Собівартість характеризується складськими витратами і є певною

основою для порівняння логістичних витрат в різні планові періоди.

Собівартість складського перероблення однієї тони компонентів визначається по наступній формулі:

$$B = \frac{B_g}{D_{uf}}, \quad (20)$$

де B_g – загальна величина річних складських експлуатаційних витрат, у.о.

Величина B_g розраховується наступним чином:

$$B_g = B_s + B_{el} + B_m + B_p, \quad (21)$$

де B_s – річні витрати на заробітну плату робітникам, що обслуговують підйомно-транспортне обладнання і складські прилади, у.о.;

B_{el} – річна вартість електроенергії (для механізмів з електродвигуном і для освітлення приміщень) і палива (для паливних двигунів), у.о.;

B_m – річні витрати на допоміжні матеріали (масляні, профілактичні, тощо), у.о.;

B_p – річні відрахування на амортизацію і ремонт підйомно-транспортного обладнання і складських приладів, у.о.

Запропонована модель оцінювання ефективності складу компонентів авіаційної техніки передбачає розрахунок значень таких показників: складська переробка компонентів C_R , коефіцієнт використання площі складських приміщень C_U , вантажонапруженість складу H , коефіцієнт використання складського обладнання в часі C_T , собівартість складського перероблення компонентів B . Аналіз отриманих значень показників дозволяє оптимізувати характеристики складу компонентів, за рахунок визначення оптимального розміру складу і його комплектації. Оцінювання ефективності виконується для складу, що призначений для реалізації технічного обслуговування і ремонту ЛА. Саме до такого складу здійснюється постачання компонентів повторного використання, отриманих в результаті виконання процесів утилізації ЛА.

6. Результати і обговорення

На думку переробників складних технічних виробів, утилізація літальних апаратів у відриві від процесу їх створення економічно необґрунтована. Вартість матеріалів, видобутих з літака, порівняно з ви-

тратами, які необхідні для його розбирання, зберігання, вивезення багатьох (часто токсичних) речовин, сортування, логістики та перероблення не завжди забезпечує рентабельність процесів утилізації. Крім того, присутні висока вартість стартових інвестицій в рециклінг, обмежена ефективність, адже не всі матеріали можуть бути ефективно перероблені, і деякі втрачають якість після кількох циклів перероблення. Але впровадження процесів рециклінгу під час етапу утилізації спонукає до створення нових робочих місць і дозволяє отримати перероблені матеріали для подальшого використання їх у виробництві авіаційної чи інших галузей промисловості, зекономити ресурси та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Адже велика частка загальної маси конструкції повітряного судна може використовуватися повторно за певних витрат.

Запропонована така методологія дослідження:

1. Системний аналіз процесу утилізації високотехнологічних виробів.

2. Створення нового компонентно-орієнтованого методу рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів.

3. Розроблення моделей для дослідження логістики процесів утилізації.

4. Створення оптимізаційних моделей для підвищення ефективності утилізації високотехнологічних виробів.

5. Моделювання логістики зберігання та повторного використання компонентів високотехнологічних виробів.

В рамках запропонованого у публікації методу компонентно-орієнтованого рециклінгу для утилізації високотехнологічних виробів, компоненти, ще на вищих рівнях декомпозиції високотехнологічного виробу, пропонується розділяти на три категорії: компоненти, які можуть бути повторно використані при ремонтуванні (заміні) комплектуючих на літальних апаратах, що знаходяться на етапі експлуатації; компоненти, що підлягають переробленню до вторинної сировини; компоненти, що вже не приймають участі у рециклінгу і підлягають знищенню. В публікації побудовано алгоритм запропонованого методу, який забезпечує обґрунтованість прийняття рішень агентами створеного віртуального підприємства для реалізації процесів утилізації зразків авіаційної техніки. За рахунок обґрунтованого прийняття рішень, здійснюється визначення оптимальної вартості етапу утилізації авіаційної техніки. В публікації представлено розрахунок вартості реалізації етапу утилізації ЛА і ставиться задача оптимізації життєвого циклу.

Сьогоднішня тенденція полягає в тому, що літаки, які є достатньо новими і по своєму технічному стану не підлягають утилізації, але все ж знімаються

з експлуатації. Причина полягає в появі більш паливно-ефективних моделей літаків. Такі компанії, як Boeing, Airbus виробляють літаки, що дозволяють зменшити кількість споживаного палива і мають більш легкі елементи конструкцій. Незважаючи на достатньо високий технологічний рівень утилізації авіаційної техніки, що склався сьогодні, у найближчій перспективі, для здійснення утилізації будуть потрібні інші технології: замість металу підвищується питома вага композитних матеріалів, у компонентах не використовуються в такій кількості дорожчі метали, як це було раніше. Технології перероблення авіаційних композитних матеріалів на даний момент ще не є зрілими. Запропоновані в публікації наукові результати, що представлені у вигляді методу і моделей, у подальшому, будуть націлені на урахування цих аспектів рециклінгу.

В публікації представлена мультиагентна модель етапу утилізації авіаційної техніки, що окреслює чітку взаємодію між учасниками процесів утилізації з урахуванням створення віртуального підприємства, що забезпечує ефективність організації і виконання процесів утилізації авіаційної техніки.

Запропонована у публікації модель оцінювання раціонального складу компонентів ЛА, які необхідні для здійснення технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки на етапі експлуатації, враховує множину показників для здійснення чіткого оцінювання характеристик складу. Але в моделі не надаються рекомендації стосовно заходів, які потрібно застосувати по відношенню до складу для підвищення його ефективності. А також не розглядається залежність потрібних заходів від значень отриманих показників, що буде здійснено в подальшому. В статті представлена структурна схема мультиагентної моделі аналізу переміщень компонент на складі. Саме в такому вигляді пропонується досліджувати склад для компонентів, у тому числі, компонентів повторного використання, отриманих в результаті реалізації процесів утилізації авіаційної техніки.

Майбутні дослідження будуть зосереджені на вдосконаленні прикладної інформаційної технології дослідження процесів утилізації високотехнологічних виробів з використанням компонентно-орієнтованого підходу.

7. Висновки

Проведене дослідження дозволяє планувати логістику утилізації зі створенням рециклінгу компонентів високотехнологічних виробів для ефективного повторного використання, з урахуванням витрат та екологічних вимог, а саме:

- системно дослідити логістику утилізації високотехнологічних виробів;

- провести багатопланову декомпозицію архітектури високотехнологічного виробу на компоненти для підвищення ефективності процесу утилізації;

- оптимізувати витрати для проведення рециклінгу;

- сформувати логістику зберігання для повторного використання компонент високотехнологічних виробів.

Наукова новизна дослідження пов'язана із створенням нового підходу до утилізації, заснованого на компонентно-орієнтованому представленні архітектури високотехнологічного виробу і розробленням оптимізаційних моделей для підвищення ефективності рециклінгу, що забезпечить економію ресурсів, за рахунок повторного використання компонентів високотехнологічної техніки (у тому числі військової) та підвищить обороноздатність країни.

Таким чином, можна зробити основний висновок щодо проведеного дослідження: запропонований компонентно-орієнтований метод та створені моделі дозволяють планувати логістику утилізації щодо створення рециклінгу для повторного використання компонентів високотехнологічних виробів з урахуванням часу, витрат та екологічних вимог. Це забезпечить ефективне використання високотехнологічних виробів в умовах особливого стану країни.

Конфлікт інтересів

Авторка декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Авторка зберігає всі авторські права та погоджується зробити представлену статтю доступною для наукової громадськості відповідно до умов на офіційному сайті журналу.

Використання штучного інтелекту

Авторка підтверджує, що не використовувала технології штучного інтелекту при створенні представленної роботи.

Авторка прочитала та погодилася з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Scheelhaase, J. *Economic and Environmental Aspects of Aircraft Recycling* [Text] / J. Scheelhaase, L. Müller, D. Ennen, & W. Grimme // *Transportation Research Procedia*. – 2022. – Vol. 65. – P. 3–12. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.11.002.
2. *Recycling and reusing of aircraft* [Text] / W. S. Khan, E. Asmatulu, N. Uddin, & R. Asmatulu // *Recycling and Reusing of Engineering Materials*. – Elsevier, 2022. – P. 233–254. DOI: 10.1016/B978-0-12-822461-8.00014-0.
3. Zahedi, H. *A multi-variable analysis of aircraft structure disassembly – A technico-economic approach to increase the recycling performance* [Text] / H. Zahedi, C. Mascle, & P. Baptiste // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2021. – Vol. 29. – Article No. e00316. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00316.
4. Islam, M. M. *Recycling through technology diffusion for circular economy in Europe: A decomposed assessment* [Text] / M. M. Islam, M. Mahmudul Alam, & K. Sohag // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2025. – Vol. 214. – Article No. 124052. DOI: 10.1016/j.techfore.2025.124052.
5. *Smart electroactive self-repairable coating involving end-of-life aircraft prepregs by mechanical recycling* [Text] / E. Espeute [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 469. – Article No. 143111. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143111.
6. *Sustainable recycling of aluminum scraps to recycled aerospace-grade 7075 aluminum alloy sheets* [Text] / S. Du [et al.] // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2024. – Vol. 41. – Article No. e01100. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e01100.
7. *Microstructure evolution and properties of 7075 aluminum alloy recycled from scrap aircraft aluminum alloys* [Text] / R. Lin, B. Liu, J. Zhang, & S. Zhang // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 19. – P. 354–367. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.011.
8. *Influence of strand size and morphology on the mechanical performance of recycled CF/PEKK composites: Harnessing waste for aerospace secondary load-bearing applications* [Text] / Y. Özbek [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2025. – Vol. 296. – Article No. 112232. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112232.
9. *Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing* [Text] / S. Al-Alimi [et al.] // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 23. – Article No. 102566. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102566.
10. *Current Practices in Recycling and Reusing of Aircraft Materials and Equipment* [Text] / A. Habib [et al.] // *Materials Circular Economy*. – 2025. – Vol. 7. DOI: 10.1007/s42824-025-00165-w.
11. Oliveira, J. *Additive Manufacturing adoption in aviation: A literature review* [Text] / J. Oliveira, & P. Espadinha-Cruz // *Procedia Computer Science*. – 2025. – Vol. 253. – P. 892–901. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.151.
12. *Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review* [Text] / X. Xu [et al.] // *Thin-Walled Structures*. – 2025. – Vol. 209. – Article No. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
13. *Recycling of polymer-matrix composites used in the aerospace industry-A comprehensive review* [Text] / N. Ramawat, N. Sharma, P. Yamba, & M. A T. Sanidhi // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.386.
14. *Material flow analysis and risk evaluation of informal and formal E-waste recycling processes in Bangladesh: Towards sustainable management strategies* [Text] / I. J. Ankhi [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2025. – Article No. 145090. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145090.
15. Feng, J. *Moving towards a circular economy: A systematic review of barriers to electric vehicle battery recycling* [Text] / J. Feng, W. Liu, & F. Chen // *Sustainable Production and Consumption*. – 2025. – Vol. 54. – P. 241–260. DOI: 10.1016/j.spc.2025.01.006.
16. *Exploring the coevolution dynamics of residents and recyclers in electric vehicle battery recycling decisions on the two-layer heterogeneous complex networks* [Text] / Y. Wang [et al.] // *Applied Energy*. – 2025. – Vol. 382. – Article No. 125235. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.125235.
17. *Advancing sustainable electronic waste management: An overview of mechatronics solutions for health, environment, and recycling* [Text] / N. K. Bhoi, M. Patel, S. K. Kamarapu, & P. Kushwaha // *Chemosphere*. – 2025. – Vol. 383. – Article No. 144501. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144501.
18. *Sustainable aviation finance: Integration of environmental impact mitigation and green investment strategies* [Text] / B. Kumar [et al.] // *Research in Transportation Business & Management*. – 2025. – Vol. 61. – Article No. 101410. DOI: 10.1016/j.rtbm.2025.101410.
19. *The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions* [Text] / I. Abrantes [et al.] // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 223. – Article No. 119937. DOI: 10.1016/j.renene.2024.119937.
20. *A new high-level life cycle assessment framework for evaluating environmental performance: An aviation case study* [Text] / J. W. Whittle [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 471. – Article No. 143440. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143440.
21. *Properties of Components of Renewable Motor Fuel Based on Plant Oils and Assessment of Their Compatibility with Traditional Fuels* [Text] / S. Boichenko [et

al.] // *Energies*. – 2024. – Vol. 17(24). – Article No. 6390. DOI: 10.3390/en17246390.

22. Evaluating the recycling potential and economic benefits of end-of-life power batteries in China based on different scenarios [Text] / D. Yang [et al.] // *Sustainable Production and Consumption*. – 2024. – Vol. 47. – P. 145–155. DOI: 10.1016/j.spc.2024.04.001.

23. Srinivasan, S. Sustainable lithium-ion battery recycling: A review on technologies, regulatory approaches and future trends [Text] / S. Srinivasan, S. Shanthakumar, & B. Ashok // *Energy Reports*. – 2025. – Vol. 13. – P. 789–812. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.12.043.

24. Projected waste and recycling potential of China's photovoltaic industry [Text] / B. Liu, M. Li, J. Chen, & Z. Sun // *Waste Management*. – 2025. – Vol. 191. – P. 264–273. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.11.022.

25. Abandoning renewable energy projects in Europe and South America: An emerging consideration in the recycling of energy landscapes [Text] / M. Frolova, J. C. Osorio-Aravena, B. Pérez-Pérez, & M. J. Pasqualetti // *Energy for Sustainable Development*. – 2025. – Vol. 85. – Article No. 101676. DOI: 10.1016/j.esd.2025.101676.

26. Sustainability assessment of multi-life cycle recycling of copper based on the economic, resource and carbon criteria [Text] / H. Li [et al.] // *Sustainable Production and Consumption*. – 2025. – Vol. 54. – P. 476–486. DOI: 10.1016/j.spc.2025.01.016.

27. Ding, Z. Barriers and countermeasures of construction and demolition waste recycling enterprises under circular economy [Text] / Z. Ding, X. Wang, & P. X. W. Zou // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 420. – Article No. 138235. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138235.

28. Sobchak, A. Development of information technology elements for decision-making support aimed at re-structuring production at virtual instrument-making enterprises [Text] / A. Sobchak, L. Lutai, & M. Fedorenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – No. 5/4 (101). – P. 53–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.182039.

29. The Creation of an Optimisation Component-Oriented Model for the Formation of the Architecture of Science-Based Products [Text] / O. Fedorovich, L. Lutai, V. Kompanets, & I. Bahaiev // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* – 2023. ICTM 2023. – Springer, Cham, 2024. – Vol. 996. – P. 415–426. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9_31.

30. Models for Reducing the Duration and Cost of the Aviation Equipment Diagnostics Process Using the Decomposition of the Component Architecture of a Complex Product [Text] / O. Fedorovich [et al.] // *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST*

2024. – Springer, Cham, 2024. – Vol. 221. – P. 108–125. DOI: 10.1007/978-3-031-71801-4_9.

31. Models and information technology of aging management of man-made systems in the conditions of modern risks [Text] / O. Fedorovich [et al.] // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2024. – No. 3 (111). – P. 175–189. DOI: 10.32620/reks.2024.3.12.

32. Lutai, L. Component models of degradation assessment for recovery of aviation equipment during its maintenance [Text] / L. Lutai // *Management Information System and Devices*. – 2024. – No. 183. – P. 14–35. DOI: 10.30837/0135-1710.2024.183.014.

References

1. Scheelhaase, J., Müller, L., Ennen, D., & Grimme, W. Economic and Environmental Aspects of Aircraft Recycling. *Transportation Research Procedia*, 2022, vol. 65, pp. 3-12. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.11.002.

2. Khan, W. S., Asmatulu, E., Uddin, N., & Asmatulu, R. Recycling and reusing of aircraft. *Recycling and Reusing of Engineering Materials*, 2022, pp. 233-254. DOI: 10.1016/B978-0-12-822461-8.00014-0.

3. Zahedi, H., Mascle, C., & Baptiste, P. A multi-variable analysis of aircraft structure disassembly – A technico-economic approach to increase the recycling performance. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021, vol. 29, article no. e00316. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00316.

4. Islam, M. M., Mahmudul Alam, M., & Sohag, K. Recycling through technology diffusion for circular economy in Europe: A decomposed assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, 2025, vol. 214, article no. 124052. DOI: 10.1016/j.techfore.2025.124052.

5. Espeute, E., Martinez-Diaz, D., Vázquez Sánchez, P., Martín, Z., Del Rosario, G., Jiménez-Suárez, A., & Prolongo, S. G. Smart electroactive self-repairable coating involving end-of-life aircraft prepregs by mechanical recycling. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 469, article no. 143111. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143111.

6. Du, S., Zhang, S., Wang, J., Wang, M., Lv, Z., Xu, Z., Ma, L., Liu, C., Wang, J., Liu, J., & Liu, B. Sustainable recycling of aluminum scraps to recycled aerospace-grade 7075 aluminum alloy sheets. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, vol. 41, article no. e01100. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e01100.

7. Lin, R., Liu, B., Zhang, J., & Zhang, S. Microstructure evolution and properties of 7075 aluminum alloy recycled from scrap aircraft aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 19, pp. 354-367. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.011.

8. Özbek, Y., Al-Nadhari, A., Eskizeybek, V., Yıldız, M., & Şaş, H. S. Influence of strand size and morphology on the mechanical performance of recycled CF/PEKK composites: Harnessing waste for aerospace secondary load-bearing applications. *Composites Part B: Engineering*, 2025, vol. 296, article no. 112232. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112232.
9. Al-Alimi, S., Yusuf, N. K., Ghaleb, A. M., Lajis, M. A., Shamsudin, S., Zhou, W., Altharan, Y. M., Abdulwahab, H. S., Saif, Y., Didane, D. H., S T T, I., & Adam, A. Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing. *Results in Engineering*, 2024, vol. 23, article no. 102566. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102566.
10. Habib, A., Subeshan, B., Kalyanakumar, C., Asmatulu, R., Rahman, M. M., & Asmatulu, E. Current Practices in Recycling and Reusing of Aircraft Materials and Equipment. *Materials Circular Economy*, 2025, vol. 7. DOI: 10.1007/s42824-025-00165-w.
11. Oliveira, J., & Espadinha-Cruz, P. Additive Manufacturing adoption in aviation: A literature review. *Procedia Computer Science*, 2025, vol. 253, pp. 892-901. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.151.
12. Xu, X., Peng, G., Zhang, B., Shi, F., Gao, L., & Gao, J. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review. *Thin-Walled Structures*, 2025, vol. 209, article no. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
13. Ramawat, N., Sharma, N., Yamba, P., & Sanidhi, M. A T. Recycling of polymer-matrix composites used in the aerospace industry-A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.386.
14. Ankhi, I. J., Hossain, G. A., Faisal, A. K. M., Hasan, M. R.-U., Barua, S., & Masud, M. H. Material flow analysis and risk evaluation of informal and formal E-waste recycling processes in Bangladesh: Towards sustainable management strategies. *Journal of Cleaner Production*, 2025, article no. 145090. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145090.
15. Feng, J., Liu, W., & Chen, F. Moving towards a circular economy: A systematic review of barriers to electric vehicle battery recycling. *Sustainable Production and Consumption*, 2025, vol. 54, pp. 241-260. DOI: 10.1016/j.spc.2025.01.006.
16. Wang, Y., Fan, R., Chen, R., Xie, X., & Ke, C. Exploring the coevolution dynamics of residents and recyclers in electric vehicle battery recycling decisions on the two-layer heterogeneous complex networks. *Applied Energy*, 2025, vol. 382, article no. 125235. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.125235.
17. Bhoi, N. K., Patel, M., Kamarapu, S. K., & Kushwaha, P. Advancing sustainable electronic waste management: An overview of mechatronics solutions for health, environment, and recycling. *Chemosphere*, 2025, vol. 383, article no. 144501. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144501.
18. Kumar, B., Kumar, J., Amjad, A. Q., Kumar, L., & Sassanelli, C. Sustainable aviation finance: Integration of environmental impact mitigation and green investment strategies. *Research in Transportation Business & Management*, 2025, vol. 61, article no. 101410. DOI: 10.1016/j.rtbm.2025.101410.
19. Abrantes, I., Ferreira, A. F., Magalhães, L. B., Costa, M., & Silva, A. The impact of revolutionary aircraft designs on global aviation emissions. *Renewable Energy*, 2024, vol. 223, article no. 119937. DOI:10.1016/j.renene.2024.119937.
20. Whittle, J. W., Callander, K., Akure, M., Kachwala, F., & Koh, S.C.L. A new high-level life cycle assessment framework for evaluating environmental performance: An aviation case study. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 471, article no. 143440. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143440.
21. Boichenko, S., Yakovlieva, A., Zubenko, S., Konovalov S., Shkilniuk, I., Artyukhov, A., Wit, B., Czarnocki, K., & Wołowiec, T. Properties of Components of Renewable Motor Fuel Based on Plant Oils and Assessment of Their Compatibility with Traditional Fuels. *Energies*, 2024, vol. 17(24), article no. 6390. DOI: 10.3390/en17246390.
22. Yang, D., Wang, M., Luo, F., Liu, W., Chen, L., & Li, X. Evaluating the recycling potential and economic benefits of end-of-life power batteries in China based on different scenarios. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, vol. 47, pp. 145-155. DOI: 10.1016/j.spc.2024.04.001.
23. Srinivasan, S., Shanthakumar, S., & Ashok, B. Sustainable lithium-ion battery recycling: A review on technologies, regulatory approaches and future trends. *Energy Reports*, 2025, vol. 13, pp. 789-812. DOI: 10.1016/j.egy.2024.12.043.
24. Liu, B., Li, M., Chen, J., & Sun, Z. Projected waste and recycling potential of China's photovoltaic industry. *Waste Management*, 2025, vol. 191, pp. 264-273. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.11.022.
25. Frolova, M., Osorio-Aravena, J. C., Pérez-Pérez, B., & Pasqualetti, M. J. Abandoning renewable energy projects in Europe and South America: An emerging consideration in the recycling of energy landscapes. *Energy for Sustainable Development*, 2025, vol. 85, article no. 101676. DOI: 10.1016/j.esd.2025.101676.
26. Li, H., Wu, Y., Gu, Y., Yang, H., Bian, Z., Song, H., Zhou, G., & Yuan, Q. Sustainability assessment of multi-life cycle recycling of copper based on the economic, resource and carbon criteria. *Sustainable Production and Consumption*, 2025, vol. 54, pp. 476-486. DOI: 10.1016/j.spc.2025.01.016.

27. Ding, Z., Wang, X., & Zou, P. X.W. Barriers and countermeasures of construction and demolition waste recycling enterprises under circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 420, article no. 138235. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138235.

28. Sobchak, A., Lutai, L., & Fedorenko, M. Development of information technology elements for decision-making support aimed at re-structuring production at virtual instrument-making enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, no. 5/4 (101), pp. 53-62. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.182039.

29. Fedorovich, O., Lutai, L., Kompanets, V., & Bahaiev, I. The Creation of an Optimisation Component-Oriented Model for the Formation of the Architecture of Science-Based Products. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Cham, 2024, vol. 996, pp. 415-426. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9_31.

30. Fedorovich, O., Lutai, L., Trishch, R., Zabolotnyi, O., Khomiak, E., & Nikitin, A. Models for Reducing the Duration and Cost of the Aviation Equipment Diagnostics Process Using the Decomposition of the Component Architecture of a Complex Product. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham, 2024, vol. 221, pp. 108-125. DOI: 10.1007/978-3-031-71801-4_9.

31. Fedorovich, O., Lutai, L., Uruskiy, O., Gubka, S., & Leshchenko, Y. Models and information technology of aging management of man-made systems in the conditions of modern risks. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024, no. 3 (111), pp. 175-189. DOI: 10.32620/reks.2024.3.12.

32. Lutai, L. Component models of degradation assessment for recovery of aviation equipment during its maintenance. *Management Information System and Devices*, 2024, no. 183, pp. 14-35. DOI: 10.30837/0135-1710.2024.183.014.

Received 10.06.2025, Accepted 18.08.2025

COMPONENT-ORIENTED MODELING OF LOGISTICS PROCESSES OF DISPOSAL OF HIGH-TECH PRODUCTS

Liudmyla Lutai

The subject of this study is methods, models, and information technologies that are implemented in the processes of recycling complex technical systems. **The object** of this study is the processes of the recycling stage of complex technical systems. After the decommissioning of high-tech products, the technical systems transition to the next stage of the life cycle – recycling. Special types of complex equipment that require recycling with the involvement of recycling organizations include: military equipment, medical equipment, sources of ionizing radiation and X-rays, aviation equipment, industrial equipment, etc. Therefore, it is relevant to research the creation of a component-oriented method for analyzing the processes of recycling high-tech products. Utilization of aviation equipment includes the recycling of not only aircraft and their structural elements, but also relevant devices and equipment. **Tasks:** to systematically investigate the logistics of recycling high-tech products; to develop a method of component-oriented recycling for the recycling of high-tech products; to conduct a study of the logistics processes of disposal using a multi-agent model; to form the logistics of storage and use of disposed components of high-tech products. **The purpose** of this study is to develop a modern approach to the interaction of logistics processes of the disposal stage of a high-tech product within its life cycle, as well as an optimization component-oriented method of disposal of aviation equipment based on system analysis. The following **mathematical models and methods** were used: system analysis, optimization, integer (Boolean) programming, expert assessments, multi-agent modeling. By decomposition, a high-tech product that is at the disposal stage is divided into smaller parts to effectively implement the recycling process at this stage of the product's life cycle. The proposed model for assessing the efficiency of the warehouse of aviation equipment components allows you to optimize the characteristics of the warehouse that stores components by determining the optimal size of the warehouse and its configuration.

Keywords: aviation technology; utilization of high-tech products; recycling; virtual enterprise; multi-agent modeling; logistics processes.

Лутай Людмила Миколаївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. мехатроніки та електротехніки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Liudmyla Lutai – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Mahatronics and Electrical Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: l.lutay@khai.edu, ORCID: 0000-0003-1822-8938.