

УДК 629.7.054

М.В. Зосімович, канд. техн. наук, доц.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИЛОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДИСТАНЦІЙНО-ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРИРОДОРЕСУРСНОГО ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

Для заданого об'єкта проектування поставлено та розв'язано завдання декомпозиції структури силових конструкцій дистанційно-пілотованих літальних апаратів для оперативного природоресурсного та екологічного моніторингу довкілля на ранішніх етапах проектування.

For specific design object was posed and solved a decomposition task of a structure of force constructions by distant controlling of fighting vehicles for operating natural and environmental ecological monitoring on early design stages.

Постановка проблеми

У різних галузях сучасної екологічної науки виникають аналогічні з погляду методики дослідження завдання, вирішення яких потребує оперативної природоресурсної та екологічної інформації з важкодоступного району на заданий момент часу і з достатньою періодичністю.

Використання дистанційно-пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) дозволяє отримати важливу інформацію про стан природних ресурсів, екологічну і технологічну ситуації, особливо у важкодоступних та небезпечних місцях (про стан крони лісів, снігову і селеву ситуації, місця гніздів'я птахів, міграції тварин, риби, шкідливі техногенні викиди, місця підвищеної радіаційної безпеки тощо).

Порівняно з традиційними пілотованими літальними апаратами (ЛА), ДПЛА мають ряд наочних переваг: значно менші масогабаритні і вартісні характеристики, компактність та простоту виробництва, експлуатації і ремонту, можливість здійснення зльоту і посадки у непередбачених місцях (зліт за допомогою наземного або повітряного носія, стартового прискорювача, посадка з парашутом), незначні витрати палива, енергії та негативний вплив на довкілля (шум, викиди тощо) [1; 2].

На сьогодні методи параметричної оптимізації, які дозволяють визначити оптимальні значення параметрів технічної системи (ТС) – ДПЛА за заданої структури – достатньо розвинені та застосовані на практиці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В основу класифікації будь-яких об'єктів, як відомо, покладено найбільш істотні ознаки цих об'єктів. Дистанційно-пілотованими називають безпілотні ЛА, для телеуправління якими оператор виконує функції, близькі до дій пілота.

У багатьох країнах створено величезну кількість ДПЛА, які розрізняються за схемою, конструкцією та льотно-технічними характеристиками, до того ж спостерігається тенденція до створення багатоцільових ДПЛА із злітною масою до 100 кг. Можливість створення подібних ЛА зумовлена досягнутими успіхами в галузі композиційних матеріалів [3–5], економічних двигунів невеликої вартості [4], мікроелектроніки, датчиків, систем навігації, засобів збору і передачі даних.

Нові пристрої можуть використовуватися на таких апаратах у вигляді недорогих малогабаритних блоків.

Постановка завдання

З метою поліпшення техніко-економічних показників виробу, що проектується, проектно-конструкторські роботи виконують у три етапи. На кожному з етапів вирішують завдання певного типу.

Перший тип – це завдання вибору або пошуку найефективнішого фізичного принципу дії для конкретних умов.

В авіабудуванні та ракетобудуванні їх вирішують на етапі загального або зовнішнього проектування ЛА. Проектування конструкцій та конструювання – це не синоніми, а ієрархічно пов'язані поміж собою самостійні етапи проектно-конструкторських робіт.

Другий тип – це завдання вибору або пошуку найбільш раціонального технічного рішення за заданого фізичного принципу дії. Їх іноді називають завданнями структурної оптимізації (СО). Під структурою силової конструкції ЛА зазвичай розуміють її конструктивно-силову схему (КСС), що визначається конструктивними ознаками. Однак КСС неоднозначно визначає технічне рішення.

Технічне рішення визначають не лише за конструктивними, але й за технологічними ознаками. Під час обрання та обґрунтування раціонального технічного рішення потрібно відпрацювати його на технологічність.

Отже, результатом етапу проектування силових конструкцій ЛА має бути обґрунтований вибір конструктивно-технологічного рішення (КТР). Надалі під структурою, що однозначно визначає технічне рішення, будемо розуміти КТР.

Третій тип – це завдання визначення оптимального значення конструктивно-технологічних параметрів заданого технічного рішення. Результатом вирішення цих завдань на етапі конструювання є сукупність проектної, конструкторської, технологічної та іншої документації, яка передбачена стандартами.

За таких умов вирішення завдань будь-якого етапу проектування конструкцій стикається з двома ускладненнями [6–7]:

– виходить надто велика кількість змінних; для ЛА розмірність цього вектора становить $10^3 \dots 10^6$;
– структурні змінні на різних рівнях мають надто нерівномірний вплив на функціональні властивості конструкції, що наперед призводить до великої кількості малоефективних кроків пошуку.

Отже, необхідно мати узгоджені декомпозиційні схеми завдань проектування і структури об'єкта проектування.

Розроблення узгоджених декомпозиційних схем структури об'єкта і завдань проектування зменшує гостроту проблеми розмірності та дозволяє обрати структуру і параметри силових агрегатів не лише з позиції працездатності агрегату, як це часто буває на практиці, але й з урахуванням спільної роботи агрегатів у ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля.

Декомпозиція структури силових конструкцій

Визначимо структуру ТС та формалізуємо її з урахуванням предметної галузі дослідження – ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля.

Під час проектування силової конструкції планера ДПЛА маємо справу зі складною ТС, яка має багаторівневий ієрархічний поділ на дедалі простіші складальні одиниці [7]. Наприклад, планер ДПЛА функціонально і конструктивно складається з декількох силових агрегатів, які поділяються на вузли – конструктивні модулі (КМ), а кожний з вузлів нижчого рівня складається з технологічно неподільних деталей (рис. 1).

Очікувана декомпозиція структури силових конструкцій ДПЛА побудована за принципом відокремлення істотних ознак (ІО) структури з локалізацією на кожному рівні декомпозиційної схеми [7]. Ідея відокремлення істотних характеристик ТС та відношень між ними дозволяє значно прискорити знаходження найоптимальнішого варіанта та якісно вдосконалити сам процес проектування.

Табл. 1 являє собою трикутну матрицю ІО [7].

Таблиця 1

Матриця груп ІО за активністю їх впливу на різні функціональні властивості об'єкта

Рівень опрацювання	Функціонування ТС	Працездатність		
		планера ДПЛА	агрегатів	КМ
1	\tilde{x}_1	x_1	x_1	x_1
2		\tilde{x}_2	x_2	x_2
3			\tilde{x}_3	x_3
4				\tilde{x}_4

На перетині рядків (рівнів опрацювання) та стовпців (функціональних властивостей) розміщено головні елементи цієї матриці (\tilde{x}_i), які являють собою групу ІО, що визначаються під час аналізу відповідної функціональної властивості конструкції. Сукупність структурних ознак, що розміщена в стовпцях, являє собою структуру силової конструкції на певному рівні опрацювання.

Структурні ознаки силових конструкцій – це ієрархічно узгоджені за рівнями декомпозиції узагальнені параметри структури з поступовою деталізацією до рівня, що відповідає робочому проекту. На кожному рівні декомпозиції структури можна виокремити три групи структурних ознак [6; 8]:

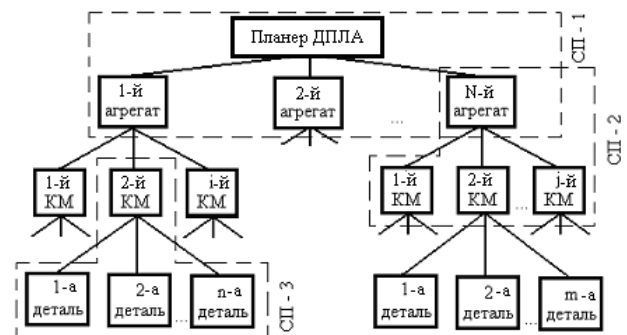


Рис. 1. Функціональні та конструктивні модулі силових агрегатів планера ДПЛА

- 1) фізико-механічні характеристики конструкційних матеріалів;
- 2) геометричні параметри з технологічними та експлуатаційними обмеженнями;
- 3) масово-інерційні характеристики.

Отже, на кожному j -му рівні декомпозиційної схеми структура визначається трьома сукупностями параметрів [7]:

$$\{x_i\} = \{x_i'\} + \{x_i''\} + \{x_i'''\}$$

Перша група ознак $\{x_i'\}$ являє собою параметри, що не варіюють протягом аналізу та синтезу цієї структури, друга група $\{x_i''\}$ – варіюють у заданих межах геометричні параметри:

$$\{a_i'' \leq x_i'' \leq b_i''\},$$

де a_i'' і b_i'' – найменше та найбільше допустимі значення, які визначаються з технологічних та експлуатаційних умов.

Третя група $\{x_i'''\}$ – параметри, похідні від параметрів першої та другої груп.

Сукупність ознак, що варіюють на кожному рівні структури, являє собою рівень опрацювання топології силової конструкції (табл. 2) [6].

Таблиця 2

Рівні топології опрацювання силової конструкції

Рівень декомпозиції структури	Сукупність ознак, що варіюють	Декомпозиція топології силових конструкцій
1	$\{a_1'' \leq x_1'' \leq b_1''\}$	Зовнішня топологія силових агрегатів
2	$\{a_2'' \leq x_2'' \leq b_2''\}$	Внутрішня топологія силових агрегатів
3	$\{a_3'' \leq x_3'' \leq b_3''\}$	Зовнішня топологія КМ
4	$\{a_4'' \leq x_4'' \leq b_4''\}$	Внутрішня топологія КМ

Отже, якщо узагальнити та доповнити викладене і доповнити визначення структури вимогою мінімальної маси ДПЛА для оперативного природоресурсного та екологічного моніторингу довкілля, можна сформулювати загальне для всіх рівнів декомпозиції визначення структури [8].

Структура силової конструкції – це сукупність структурних ознак (що надають конструкції фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості), які з досить високою надійністю забезпечують функціонування конструкції за

умови мінімуму маси ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля [7].

У структурі складальних одиниць планера ДПЛА можна виокремити декілька груп структурних підсистем (СП) за активністю їх впливу на різні функціональні властивості об'єкта (табл. 1) [6; 7]:
– функціонування об'єкта як ТС, перед яким поставлені цілком визначені завдання;
– функціонування (працездатність) об'єкта та його складових елементів під впливом зовнішнього середовища.

Наведений аналіз структурних складових за їх впливом на функціональні властивості ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля дозволяє формалізувати декомпозицію структури силових конструкцій ДПЛА (табл. 3) [9].

Таблиця 3

Формалізація декомпозиції структури силових конструкцій

Рівень декомпозиції структури	Декомпозиція структури силових конструкцій ДПЛА
1	$\{x_1\}$ – конструктивно-технологічне членування планера
2	$\{x_1\} + \{x_2\}$ – структура планера
3	$\{x_1\} + \{x_2\} + \{x_3\}$ – структура силових агрегатів
4	$\{x_1\} + \{x_2\} + \{x_3\} + \{x_4\}$ – конструктивно-технологічне рішення

Таким чином, декомпозиція структури силових конструкцій ДПЛА ґрунтується на виокремленні істотних ознак, що віддзеркалюють конкретні конструктивно-технологічні закономірності утворення структури та узгодження з певними функціональними властивостями конструкції ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля [7]. Така декомпозиція структури не є штучним заходом зменшення розмірності. Вона зумовлена відмінностями експлуатаційних вимог, що ставляться до планера ДПЛА в цілому та до агрегатів і конструктивних модулів.

Декомпозиція завдань синтезу структури силових конструкцій

Рішення, які приймають на ранніх стадіях проектування ДПЛА, не лише передбачають множину рішень, які можуть бути прийняті на наступних стадіях, але й самі деякою мірою визначаються ними [4; 7].

Тому обрання раціональної структури силових конструкцій має ґрунтуватися як на багатофакторному аналізі, так і на забезпеченні матеріалізації цієї структури. Для того щоб структура силових агрегатів мала змогу матеріалізуватися у вигляді конкретного КТР, потрібно обирати структуру агрегатів, спираючись на наперед сформовані КМ. Конструктивні модулі можуть складатися у свою чергу з більш простих КМ [6]. Сукупність КМ, розроблених для даного класу ДПЛА, має бути сформована заздалегідь і постійно поповнюватися за рахунок нових патентоздатних конструктивних рішень. Множина КМ є елементарною базою конструювання.

Отже, структурні ознаки, зокрема й конструкційний матеріал, мають обиратися на основі аналізу функціональних властивостей і технологічності конструкції ДПЛА. Це можливо лише при організації ітераційної процедури проектування ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля.

Організація зовнішніх ітераційних циклів на таких етапах, як загальне проектування, проектування конструкцій та конструювання, вкрай неефективна. Необхідно, крім зовнішніх циклів, організувати і внутрішні цикли між суміжними етапами, для зменшення розмірності завдання та забезпечення збіжності зовнішнього ітераційного циклу.

Подаватимемо структуру КТР на кожному рівні сукупності Ю двох сусідніх рівнів [6]:
 $x_i = \tilde{x}_i + \tilde{x}_{i+j}$.

У такому разі \tilde{x}_i є структурними ознаками, а \tilde{x}_{i+j} – параметрами структури i -го рівня декомпозиції. Таким чином, процедура обрання раціонального КТР силових агрегатів являє собою багаторівневу структурно-параметричну оптимізацію (СПО).

Сутність апробованих на практиці рекомендації за побудовою декомпозиційних схем багаторівневої СО полягає в такому:

- 1) багаторівневу СО розділяють на декілька дворівневих;
- 2) структурні змінні задають так, щоб за їх допомогою можна було описати множину можливих структур, які можуть задавати постачальники-фахівці і які можуть реалізувати математичне та програмне забезпечення;
- 3) перевірка обмежень (вилучаються наперед непридатні структури) має вводитися поетапно в процесі побудови структури, а не після;
- 4) сукупність обмежень має бути ієрархічно узгодженою системою за рівнями опрацювання конструкції.

Побудована на таких принципах багаторівнева СПО (рис. 2) узгоджується з декомпозицією структури силових конструкцій.

Багаторівнева декомпозиційна схема потрібна для зменшення розмірності завдання проектування. Вона показує конкретний ступінь деталізації проектного рішення [10].

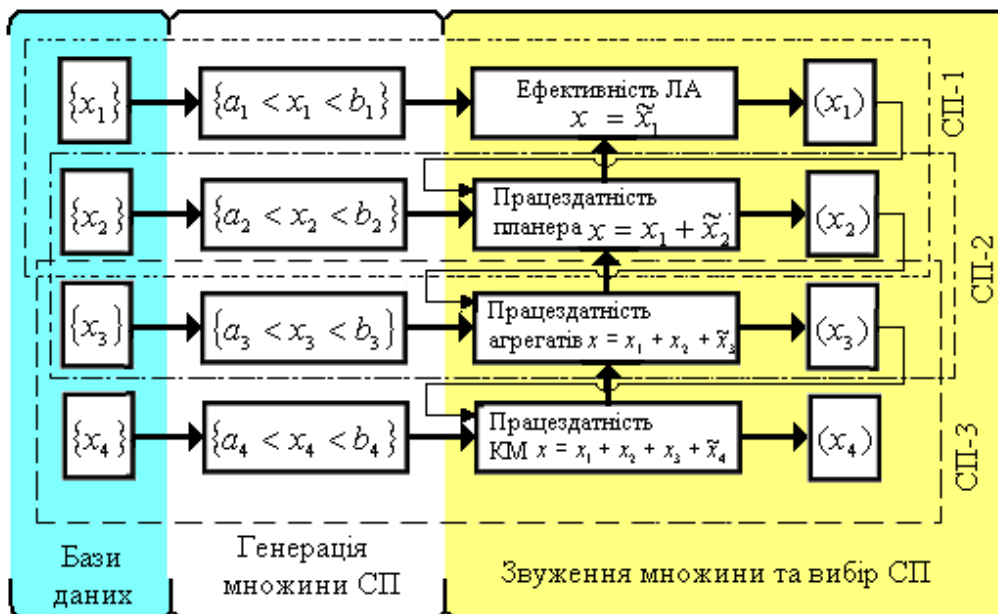


Рис. 2. Схема побудови багаторівневої СПО

Кожний рівень являє собою функціонально закінчену підзадачу з конкретним «фізичним» змістом. У послідовній декомпозиційній схемі інформація, яку отримано за результатом розв'язання однієї підзадачі, є вихідною для розв'язання наступної. В результаті підзадачі виявляються суворо впорядкованими і утворюють «ланцюжок» підзадач. Підзадача кожного рівня в свою чергу декомпозована на взаємопов'язані підзадачі, типові для кожного рівня декомпозиції:

- генерацію множини;
- звуження множини;
- синтез структурних ознак відповідного рівня [10].

Якщо для розв'язання перших двох підзадач використовують структурні ознаки власного рівня, то під час синтезу здійснюється взаємоузгодження (координація) структурних ознак суміжних декомпозиційних рівнів. Технологія проектування, що ґрунтується на поетапному відбракуванню варіантів, потребує більшої множини альтернативних варіантів. Немає потреби генерувати КТР з повною деталізацією структури всіх можливих варіантів, оскільки на різних етапах процесу проектування структура об'єкта локалізована сукупністю істотних для заданого рівня параметрів. Проблема розмірності та неформалізованості всіх факторів, що впливають на обрання ІО, призводить до того, що підзадачі рівнів не розв'язуються методами математичного програмування для побудови глобальної оптимізації. Для організації процедур прийняття рішень в таких умовах потрібно розробити систему імітаційних моделей та інтерактивних процедур взаємодії з ними. При цьому необхідно враховувати як математичну специфіку підзадач, так і їх інженерний зміст.

Розглянемо призначення підзадач різних рівнів декомпозиційної схеми, аналогічних за своїм «фізичним» змістом.

Генерація варіантів КТР декомпозована за структурними ознаками, такими ж, як і дві такі процедури: звуження множини КТР та обрання раціонального КТР. Процедури генерації множини структурних ознак $\{\tilde{x}_i\}$ на кожному рівні ієрархії пов'язані поміж собою. Процедури звуження множини ІО полягають в параметричній оптимізації та наступному відбракуванні векторів ІО протягом аналізу їх ефективності за допомогою імітаційних систем. Синтез ІО на кожному рівні

закінчується обранням вектора ІО свого рівня (\tilde{x}_i) за результатами структурно-параметричної оптимізації. При цьому ІО нижнього рівня виконує роль параметрів, що варіюють, за оптимальним поєднанням яких оцінюються та обираються ІО цього рівня. З обранням вектора (\tilde{x}_i) визначається відповідна до неї підмножина $\{\tilde{x}_{i+1}\}$ [6].

Процедури звуження множини та синтезу ІО реалізуються імітаційними системами конкретного «фізичного» змісту. Під імітаційною системою розуміють сукупність імітаційних моделей та інтерактивних процедур взаємодії з цими моделями. Імітаційні системи проблемно орієнтовані на власний рівень деталізації КТР. Вони імітують функціонування ДПЛА як ТС, працездатність конструкції планера, працездатність силових агрегатів, працездатність конструктивних модулів. Процедури прийняття рішень з використанням імітаційних систем потребують зазвичай розроблення нових методів розв'язання досить різноманітних екстремальних завдань. Існує велика кількість дослідницьких програм розрахунку авіаційних конструкцій, але використовувати їх для побудови імітаційних моделей досить складно. Річ у тім, що вони не економічні, погано пристосовані до багаторазового повторного розрахунку, не зовсім коректно поєднуються з іншими програмами, не мають уніфікованої бази. Крім обчислювальних процедур (основи імітаційних систем), прикладне програмне забезпечення має містити частину інтерактивних процедур, що формалізуються, які дозволяють конструктору вести діалог з імітаційними системами. Змістовна частина діалогу на етапі проектування силових конструкцій полягає в економічному способі організації пошуку найоптимальнішого конструктивно-технологічного рішення за допомогою спеціально розробленого для таких цілей прикладного програмного забезпечення, але не за рахунок огрублення розрахункових моделей і необґрунтованого ігнорування усієї складності функціонування конструкцій ДПЛА [7]. У таких умовах процедури діалогу з імітаційними моделями слід будувати на іншій математичній основі, що відрізняється від тієї, яка використовується під час розв'язання прямих задач. На думку автора, перспективним напрямом в організації інтерактивних процедур, є використання теорії некоректно поставлених задач у комбінації з апаратом лінійної алгебри.

Природно припустити, що конкретна проблемна орієнтація САПР ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля тією або іншою мірою може вплинути на вигляд декомпозиційної схеми за кількістю рівнів та кількістю підзадач. У будь-якому разі реалізація пропонованої концепції потребує високого рівня технічних засобів, базового програмно-інформаційного забезпечення, спеціального прикладного програмного забезпечення [10]. Це саме те ресурсне забезпечення технічного прогресу, що має високу вартість, без якого важко сподіватися на успіх у галузі автоматизації ПКР в авіабудуванні.

Висновки

1. Для початкових етапів проектування ДПЛА оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля поставлена та розв'язана задача декомпозиції структури силових конструкцій об'єкта проектування.
2. Для обрання раціональної структури силових конструкцій виконано декомпозицію завдань синтезу ДПЛА для оперативного природоресурсного і екологічного моніторингу довкілля.

Література

1. *Беспилотники* // Аэрокосмический вестник. – К.: СПЕЙС-ИНФОРМ, – 2005. – № 8. – С. 32–33.
2. *Зосимович Н.В.* Использование сельскохозяйственной авиации в Украине для решения задач экологического мониторинга и рационального использования природных ресурсов // *Авиация общего назначения*. Х.: АОН, – 2004. – № 4, – С. 12–16.
3. *Голубев И.С., Самарин А.В.* Проектирование конструкций летательных аппаратов: Учеб. для студ. вузов. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
4. *Проектирование самолетов: Учеб. для вузов* / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисейцев и др. / Под ред. С.М. Егера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
5. *Технология* виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук та ін. / Під ред. чл.-кор. ІАУ, д-ра техн. наук, проф. В.Є. Гайдачука. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.
6. *Голубев И.С., Андреев В.В., Парафесь С.Г.* Методы структурно-параметрической оптимизации силовых авиационных конструкций: Учеб. пособие. – М.: МАИ, 1991. – 68 с.
7. *Зосимович Н.В.* Структурно-параметрическая оптимизация силовых конструкций дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов оперативного природоресурсного и экологического мониторинга окружающей среды // *Региональный вестн. молодых ученых*. – М.: Academia, 2005. – №3. – С. 97–98.
8. *Зосимович Н.В.* Задача декомпозиции структуры силовых конструкций ДПЛА для природоресурсного и экологического мониторинга окружающей среды // *Матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. “Наука і освіта 2005”*, 20-30 черв. 2005 р. Т. 53. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 14–17.
9. *Беспилотные летательные аппараты* / П.М. Афонин, И.С. Голубев, Н.И. Колотков и др. / Под ред. Л.С. Чернобровкина. – М.: Машиностроение, 1967. – 439 с.
10. *Зосимович Н.В.* Декомпозиция задач синтеза структуры силовых конструкций летательных аппаратов для оперативного природоресурсного и экологического мониторинга окружающей среды // *Международ. науч.-практ. конф. молодых ученых «Методы исследований и результаты разработок техники для ресурсосберегающих технологий сельского хозяйства»*, 18-20 окт. 2005 г. Минск: Республиканское унитарное науч.-исслед. предприятие «Институт механизации сельского хозяйства НАН Беларуси», 2005.

Стаття надійшла до редакції 09.11.07.