

УДК 697.92

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.73354

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ МОДУЛЯ УТРИМАННЯ ПТИЦІ

С. В. Щербовських

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань*

E-mail: shcherbov@gmail.com

Н. А. Сподинок

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра теплогазопостачання і вентиляції*

E-mail: n_spoduniuk@meta.ua

Т. О. Стефанович

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра проектування та експлуатації машин*

E-mail: stefanovych@lp.edu.ua

В. М. Желих

Доктор технічних наук, професор
Кафедра теплогазопостачання і вентиляції*

E-mail: v_zhelykh@msn.com

В. Б. Шепітчак

Асистент
Кафедра цивільної безпеки*

E-mail: shepitchak@gmail.com

*Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

Побудовано математичну модель надійності модуля для утримання птиці для аналізу причин його непрацездатності у формі дерева відмов. За допомогою марковської моделі визначено ймовірнісні характеристики всіх причин непрацездатності, а також відсотковий внесок кожної причини для заданого напрацювання до відмови. Показано, що найбільший внесок у загальну відмову вносять інфрачервоний нагрівач та повітрянагрівач

Ключові слова: модуль для утримання птиці, модель надійності, дерево відмов, марковська модель

Построена математическая модель надежности модуля для содержания птицы для анализа причин его неработоспособности в форме дерева отказов. С помощью марковской модели определены вероятностные характеристики всех причин неработоспособности, а также процентный вклад каждой причины для заданной наработки до отказа. Показано, что наибольший вклад в общий отказ вносят инфракрасный нагреватель и воздушнонагреватель

Ключевые слова: модуль для содержания птицы, модель надежности, дерево отказов, марковская модель

1. Вступ

Для вирощування птиці (курей, качок, гусей, індичок та ін.) використовують пташники, які входять до складу птахофабрики або ферми. Для підвищення збереження, приросту та продуктивності птиці її розміщують в модулях. Такий спосіб утримання дозволяє вирощувати різновікові групи птиці в межах одного пташника, а також може застосовуватися у фермерських господарствах в якості окремої одиниці. Кожний модуль обладнують інфрачервоним нагрівачем та системою загальнообмінної вентиляції. Застосування цих систем забезпечує необхідні зоогігієнічні умови у зоні перебування птиці, а також позитивно впливає на її фізіологічний стан. Створення штучного мікроклімату має як позитивні, так і негативні аспекти. До позитивних аспектів слід віднести підтримання стабільної температури, швидкості руху та вологості повітря в модулі, а також можливість їх зміни в процесі росту птиці. Негативним аспектом штучно створеного мікроклімату є те, що відмова систем опалення та вентиляції спричиняє загибель птиці. Це висуває підвищені вимоги до надійності функціонування таких систем. Тому актуальність досліджень полягає у необхідності надати науково-обґрунтовану оцінку показників на-

дійності модуля утримання птиці, зокрема кількісно визначити причини його непрацездатності. Ця проблема виникає під час проектування та експлуатації пташників, побудованих за модульним принципом.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Вирощування птиці у промислових умовах є складною задачею. Молодняк птиці особливо чутливий до змін у докільлі. У роботі [1] досліджено вплив підвищеної температури та відносної вологості повітря на організм курчат-бройлерів. В них зазначено, що під час вирощування птиці під впливом підвищеної температури та вологості повітря птиця споживала менше корму. Це негативно відобразилося на прирості маси її тіла. У роботі [2] показано, що в екологічно чистому навколишньому середовищі організм птиці краще засвоював поживні речовини та харчові добавки, тому підтримання необхідних температурно-вологісних параметрів в місцях розміщення птиці є важливим питанням. Для підвищення енергоефективності пташників рекомендується застосовувати системи локального опалення із інфрачервоними нагрівачами [3–5]. Це створює комфортні температурні умови безпосе-

редньо в зоні обігріву за допомогою випромінювання. У роботі [6] виконано оцінку різних систем теплозабезпечення пташника-бройлерника. Зокрема було розглянуто систему опалення з безпосереднім нагрівом повітря, систему із застосуванням інфрачервоних брудерів та систему “барабан” з інфрачервоними нагрівачами. Серед розглянутих система “барабан” виявилася найефективнішою. На основі проведеного аналізу показано, що для підтримання заданого температурного режиму доцільно використовуючи інфрачервоне опалення.

Для визначення ймовірнісних характеристик причин непрацездатності систем їх надійність описують деревом відмов, аналіз якого можна виконати кількома підходами [7]. Перший підхід ґрунтується на логіко-ймовірнісному методі [8, 9]. Цей метод полягає у тому, що на основі дерева відмов складають логічні умови, які перетворюють у ймовірнісні вирази. Такий підхід простий у застосуванні, але під час аналізу причин непрацездатності вносить методичну похибку, величина якої залежить від параметрів елементів. Другий підхід базується на аналізі дерева відмов методом Монте-Карло [10]. Недоліком цього методу є спотворення результатів моделювання стохастичними флуктуаціями, а також значні часові затрати на обчислення. У третьому підході [11, 12] дерево відмов перетворюють у марковську модель, що забезпечує найвищу адекватність під час аналізу причин непрацездатності системи. Недолік цього методу полягає у високій розмірності марковської моделі, а також у її обмеженні експоненціальним розподілом. У даній роботі застосовано третій підхід, а для послаблення обмеження застосовано автоматизовану процедуру на основі тензорного аналізу [13–15]. Вибір даного підходу обґрунтований тим, що для аналізу причин непрацездатності модуля для утримання птиці він забезпечить максимально адекватне та ефективне моделювання надійності порівняно із логіко-ймовірнісним підходом та методом Монте-Карло.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розроблення математичної моделі надійності, яка призначена для аналізу причин непрацездатності модуля для утримання птиці.

Для досягнення даної мети були поставлені наступні завдання:

- побудувати дерево відмов модуля для утримання птиці;
- встановити на основі дерева відмов причини непрацездатності модуля;
- дати кількісну оцінку для кожної причини непрацездатності модуля.

4. Опис модуля для утримання птиці

Принцип роботи модуля (рис. 1) для утримання птиці полягає у наступному.

У боксі 1 розміщено птицю, яка обігрівается інфрачервоним нагрівачем 2. Вимірювальний пристрій 3 призначений для отримання інформації про параметри мікроклімату у боксі 1. Забруднене повітря з бокса 1

видаляється через витяжний зонт 4 та витяжний повітропровід 5 за допомогою витяжного вентилятора 6. Інтенсивність видалення забрудненого повітря регулюється за допомогою шибера 7, який встановлено у витяжному повітропроводі 5. Свіже повітря нагнітається в камеру статичного тиску 8 через припливний повітропровід 10 за допомогою припливного вентилятора 11. З камери 8 воно потрапляє у бокс 1 через повітророзподільник 9. Інтенсивність подачі свіжого повітря регулюється за допомогою шибера 12, який встановлено у припливному повітропроводі 10. Очищення припливного повітря від пилу відбувається у фільтрі 15, а витяжного від пір'я, тирси і залишків корму – у фільтрі 16. Рекуператор 13 використовується для передачі тепла від витяжного повітря до припливного і, таким чином, дозволяє заощаджувати тепло. Калорифер 14 призначений для додаткового нагрівання припливного повітря після рекуператора тепла.

Модуль містить дві взаємоінтегровані системи опалення та вентиляції, взаємодію яких треба описати в моделі надійності.

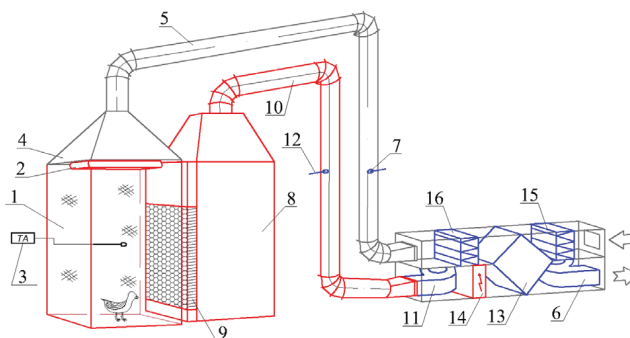


Рис. 1. Схема модуля для утримання птиці: 1 – бокс для утримання птиці; 2 – інфрачервоний нагрівач; 3 – вимірювальний пристрій; 4 – витяжний зонт; 5 – витяжний повітропровід; 6 – витяжний вентилятор; 7 – шибер; 8 – камера статичного тиску; 9 – повітророзподільник; 10 – припливний повітропровід; 11 – припливний вентилятор; 12 – шибер; 13 – рекуператор тепла; 14 – калорифер; 15 – фільтр припливного повітря; 16 – фільтр витяжного повітря

5. Дерево відмов модуля для утримання птиці

Побудуємо математичну модель надійності модуля для утримання птиці у формі дерева відмов, яке подано на рис. 2. Функція модуля полягає у підтриманні в боксі заданих параметрів мікроклімату. Катастрофічною відмовою модуля вважаємо формування такого мікроклімату в боксі, який потенційно загрожує життю та здоров'ю птиці. Катастрофічну відмову на дереві відмов позначено блоком “Top Event”. Оскільки модель побудована для найхолоднішої пори року з від'ємними температурами навколишнього повітря, то для модуля виділяємо два основних види порушення його функціонування. По-перше, порушення температурного режиму, яке полягає в тривалому зниженні температури в боксі. Цей фрагмент дерева позначено червоним. В результаті птиця може загинути через переохолодження. По-друге, порушення режиму вентиляції боксу. Цей фрагмент позначено синім. В результаті птиця

може загинути внаслідок нестачі свіжого повітря. Інші види порушень вважаємо такими, що перебувають у причинному зв'язку до описаних вище або є такими, якими можна знехтувати. Критична відмова модуля настає тоді, коли настає хоча б одне із двох перелічених вище порушень, що позначено операцією АБО у блоці "Gate 1".

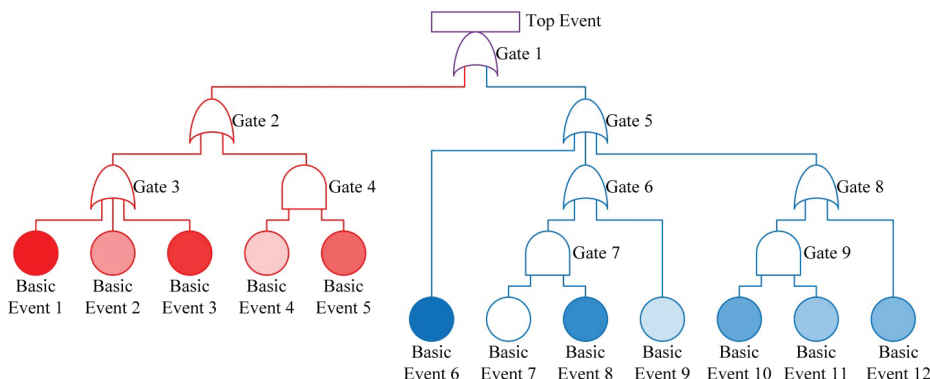


Рис. 2. Дерево відмов модуля для утримання птиці

Такі порушення мають слабкий взаємозв'язок. У разі припинення вентилявання боксу температура повітря в ньому зростає, але це не призведе до катастрофічної відмови. З іншого боку, припинення нагрівання повітря не впливатиме на роботу системи вентиляції, однак подальше вентилявання бокса спричинятиме зниження температури в ньому. Оскільки настання хоча б одного із вказаних порушень вже є критичною відмовою, то відображати описаний вище взаємозв'язок у дереві відмов немає потреби.

Порушення температурного режиму відбувається внаслідок розгерметизації елементів модуля або припинення підігрівання повітря, що позначено операцією АБО у блоці "Gate 2". Розгерметизацію викликає пошкодження цілісності бокса 1 ("Basic Event 1"), камери статичного тиску 8 ("Basic Event 2") та припливного повітропроводу 10 ("Basic Event 3"). Для виникнення розгерметизації, яка призводить до катастрофічної відмови, достатньо пошкодження цілісності будь-якого одного із перелічених елементів, що позначено операцією АБО у блоці "Gate 3". Слід зазначити, що пошкодження цілісності витяжного зонта 4, витяжного повітропроводу 5 та рекуператора 13 погіршить показники мікроклімату в боксі та показники енергоефективності модуля в цілому, але не викликать катастрофічної відмови. Припинення підігрівання повітря спричиняє одночасна непрацездатність інфрачервоного нагрівача 2 ("Basic Event 4") та калорифера 14 ("Basic Event 5"), що позначено операцією І у блоці "Gate 4". Порушення режиму вентилявання відбувається внаслідок пошкодження припливної вентиляції, витяжної вентиляції або установки з рекуперацією тепла ("Basic Event 6"). Катастрофічна відмова внаслідок порушення вентилявання відбувається у випадку настання будь-якої із перелічених подій, що позначено операцією АБО у блоці "Gate 5". Пошкодження припливної вентиляції викликає непрацездатність припливної вентилятора 11 ("Basic Event 7") за умови, що шибер 7 ("Basic Event 8") закритий, або повна втрата пропускної спроможності фільтра 15 ("Basic Event 9"). Дана умова позначена

операціями АБО ("Gate 6") та І ("Gate 7"). Пошкодження витяжної вентиляції викликає непрацездатність витяжного вентилятора 6 ("Basic Event 10") за умови, що шибер 12 закритий ("Basic Event 11"), або повна втрата пропускної спроможності фільтра 16 ("Basic Event 12"), що позначено операціями АБО ("Gate 8") та І ("Gate 9"). Зауважимо, що пошкодження рекуператора 13 може бути двох типів. Перший тип полягає у втраті цілісності його корпусу, що викликає розгерметизацію системи вентиляції і сполучення її з атмосферою. Другий тип – втраті цілісності стінки, яка розділяє потоки вхідного і вихідного повітря, що спричиняє потрапляння забрудненого повітря у припливний повітропровід. Критична відмова внаслідок порушення режиму вентилявання настає у випадку пошкодження другого типу.

Вимірювальний пристрій 3 виконує діагностичну функцію і є засобом запобігання критичній відмові, але його непрацездатність не викликає порушення температурного режиму і режиму вентилявання бокса. Повітророзподільник 9 призначений для рівномірної подачі повітря. Напрямок руху повітря у ньому запобігає закупорюванню отворів, що унеможлиблює його непрацездатність.

6. Аналіз причин непрацездатності модуля для утримання птиці

Використовуючи дані із довідників MIL-HDBK-217F та NSWC Mechanical визначено параметри надійності елементів системи (табл. 1). Застосування таких довідників обґрунтовується тим, що вони чинні на даний час і використовуються для аналізу надійності у сертифікованому програмному забезпеченні провідних міжнародних компаній reliasoft, aldservice.

Грунтуючись на структурі дерева відмов та параметрах надійності елементів модуля складено однорідну марковську модель (рис. 3). Така модель містить 216 станів і 270 переходів. Із усієї множини 27 станів відповідає працездатності модуля, а 189 – катастрофічній його відмові. Працездатні стани позначені колами із порядковими номерами 216, 214, 212, 200, 198, 196, 194, 182, 180, 156, 154, 152, 140, 138, 136, 124, 122, 120, 96, 94, 92, 80, 78, 76, 64, 62 та 60. Початковим станом цієї моделі є стан 216, який відповідає працездатності усіх елементів модуля. Стани катастрофічної відмови об'єднано у 9 груп, кожна із яких відповідає окремій причині відмови. Групи станів катастрофічної відмови позначені квадратами із порядковими номерами 1..9. Для зручності відображення на рис. 3 для кожного квадрата подано кілька копій у різних частинах діаграми. Переходи, які спричиняють катастрофічну відмову модуля, позначені штриховими орієнтованими ребрами. Переходи, які переводять систему між працездатними станами, позначено суцільними орієнтованими ребрами. На

основі діаграми станів та переходів записано систему Колмогорова-Чепмена, яка містить 216 диференціальних рівнянь.

Таблиця 1

Параметри надійності для базових подій дерева відмов модуля для утримання птиці

Назва базової події	Опис базової події	Значення параметра надійності, 1/год
Basic Event 1	Бокс розгерметизовано	$0.025 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 2	Камеру статичного тиску розгерметизовано	$0.020 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 3	Припливний повітропровід розгерметизовано	$0.015 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 4	Інфрачервоний нагрівач непрацездатний	$2.0 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 5	Калорифер непрацездатний	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 6	Рекуператор пошкоджено	$0.005 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 7	Припливний вентилятор непрацездатний	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 8	Шибєр у витяжному повітропроводі закритий	$1 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 9	Фільтр припливного повітря втратив пропускну здатність	$0.03 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 10	Витяжний вентилятор непрацездатний	$4.0 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 11	Шибєр у припливному повітропроводі закритий	$1 \cdot 10^{-6}$
Basic Event 12	Фільтр витяжного повітря втратив пропускну здатність	$0.04 \cdot 10^{-6}$

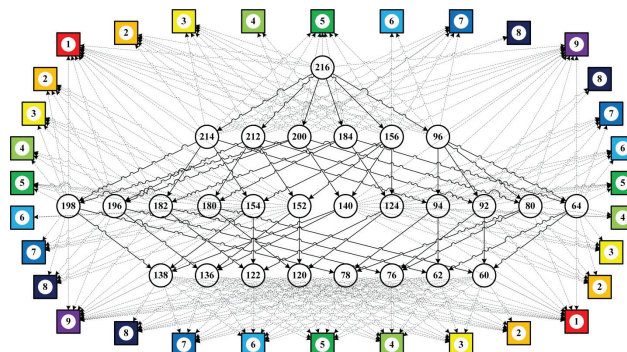


Рис. 3. Діаграма станів та переходів модуля для утримання птиці

Використовуючи марковську модель, обчислено ймовірнісні показники надійності модуля. Ймовірність катастрофічної відмови модуля для напрацювання 40 000 год. становить 0.02409. На рис. 4, а подано криві ймовірнісних характеристик для причин непрацездатності, а на рис. 4, б – діаграму розподілу за відсотками впливу кожної причини непрацездатності для напрацювання 40 000 годин. Для розв'язання системи із 216 диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами було застосовано метод Дорманда-Прінса, який вбудований у математичний пакет MATLAB. Оскільки усі стани моделі є поглинальними, то обчислювальних проблем із жорсткістю системи не виникало. Крок інтегрування чисельний метод вибирає автоматично.

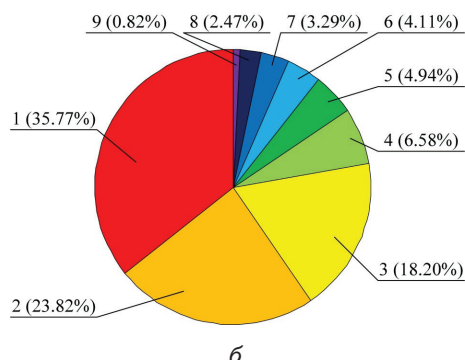
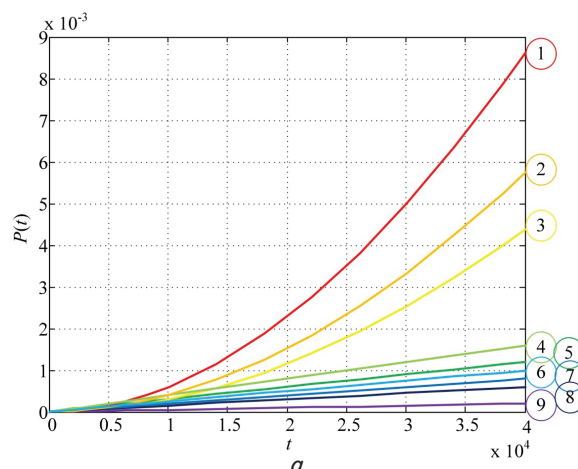


Рис. 4. Ймовірнісні характеристики надійності модуля: а – криві ймовірнісних характеристик для причин непрацездатності; б – діаграма розподілу за відсотками впливу кожної причини для напрацювання 40 000 год

На рис. 4 використано такі позначення: 1 – причина відмови системи внаслідок непрацездатності інфрачервоного нагрівача та калорифера; 2 – внаслідок непрацездатності витяжного вентилятора та закритого шибера у припливному каналі; 3 – внаслідок непрацездатності припливного вентилятора та закритого шибера у витяжному каналі; 4 – внаслідок втрати пропускної здатності витяжного фільтра; 5 – внаслідок втрати пропускної здатності припливного фільтра; 6 – внаслідок розгерметизації бокса; 7 – внаслідок розгерметизації камери статичного тиску; 8 – внаслідок розгерметизації припливного повітропроводу; 9 – внаслідок розгерметизації рекуператора.

7. Обговорення результатів математичного моделювання причин непрацездатності модуля утримання для птиці

Усі причини непрацездатності модуля можна умовно розділити на три групи. Перша група причин 6, 7, 8 та 9 (рис. 4) полягає у розгерметизації елементів модуля. Ймовірність появи причин цієї групи у порівнянні з іншими причинами є найнижчою. Це пояснюється тим, що таке руйнування цілісності бокса, камери статичного тиску, припливного повітропроводу та рекуператора, яке викличе катастрофічну відмову, є подією малоюмовірною. Друга група причин 4 та 5 (рис. 4) полягає у втраті пропускної здатності витяжного та припливного фільтрів. Більший вплив на непрацездатність модуля чинить витяжний фільтр внаслідок дії більш агресивного забруднювача (залишки корму, пір'я, пташиного посліду та ін.) і, відповідно, швидшої втрати фільтруючої здатності. Для зменшення ймовірності виникнення цих подій потрібно періодично очищувати або замінювати робочі елементи фільтрів, особливо для витяжного фільтра. Третя група причин 1, 2 та 3 (рис. 4) полягає у непрацездатності вентиляторів, інфрачервоного нагрівача та калорифера. Надійність вентиляторів обмежена надійністю електричних двигунів. Як калорифер, так і інфрачервоний нагрівач, забезпечують необхідний мікроклімат у боксі. У випадку непрацездатності одного із них, інший здатний тимчасово забезпечити функціонування модуля, проте одночасна їх непрацездатність залишається основною причиною катастрофічної відмови модуля (внесок понад 35 %).

Основною перевагою дослідження є те, що під час математичного моделювання причин непрацездатності модуля застосовано однорідну марковську модель надійності. Така модель забезпечила уникнення впливу «недосяжних» станів, що підвищує точність одержаних результатів. Недоліком такого підходу є висока трудомісткість, порівняно із загальноживаними інженерними методами, які використовують для розв'язування аналогічних задач.

Результати даного дослідження можуть бути корисними під час проектування систем життєзабезпечення об'єктів сільського господарства.

Оскільки пташник складається із набору однотипних модулів, тому системи, які є спільними для всього пташника, наприклад освітлення та електрозабезпечення, не розглядалися. Наступним етапом даного дослідження є врахування перелічених вище систем.

8. Висновки

1. За результатами досліджень розроблено математичну модель надійності модуля для утримання птиці. Модель призначена для визначення причин його непрацездатності, а в її основу покладено дерево відмов, яке математично формує умову порушення життєзабезпечення. В дереві задано, що критична відмова системи настає у випадку порушення температурного режиму або режиму вентиляції. Для опису катастрофічної відмови у дереві використано дванадцять базових подій.

2. Для визначення причин непрацездатності модуля на основі дерева відмов побудовано однорідну марковську модель. Така модель містить 216 станів та 270 переходів. За цією моделлю встановлено, що система містить 9 причин, які призводять до катастрофічної відмови системи.

3. За допомогою марковської моделі визначено ймовірнісні характеристики всіх дев'яти причин непрацездатності, а також відсотковий внесок кожної із них. Показано, що найбільший внесок у загальну відмову вносять інфрачервоний нагрівач та повітронагрівач (35,77 %), витяжний вентилятор (23,82 %) та припливний вентилятор (18,2 %).

Метою подальших досліджень є розроблення моделі надійності для аналізу причин непрацездатності пташника, як набору однотипних модулів із спільними для них системами життєзабезпечення.

Література

1. Oliveira, R. F. M. Effects of temperature and relative humidity on performance and yield of noble cuts of broilers from 1 to 49 days old [Text] / R. F. M. Oliveira, J. L. Donzele, M. L. T. Abreu, R. A. Erreira, R. G. M. V. Vaz, P. S. Cella // Revista Brasileira de Zootecnia. – 2006. – Vol. 35, Issue 3. – P. 797–803. doi: 10.1590/s1516-35982006000300023
2. Toledo, R. S. Lysine nutritional requirements of broilers reared in clean and dirty environments during the pre-starter and starter phases [Text] / R. S. Toledo, H. S. Rostagno, L. F. T. Albino, M. A. Dionizio, D. C. de O. Carvalho, E. T. Nogueira // Revista Brasileira de Zootecnia. – 2011. – Vol. 40, Issue 10. – P. 2205–2210. doi: 10.1590/s1516-35982011001000021
3. Dudkiewicz, E. The Influence of Infrared Heaters Efficiency on the Energy Consumption Cost [Text] / E. Dudkiewicz, N. Fidorow, J. Jezowiecki // Rocznik Ochrona Srodowiska. – 2013. – Vol. 15. – P. 1804–1817.
4. Brown, K. J. Energy efficiency of electrical infrared heating elements [Text] / K. J. Brown, R. Farrelly, S. M. O'shaughnessy, A. J. Robinson // Applied Energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 581–588. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.064
5. Zhelykh, V. Specificity of Temperature Mode Formation in Production Premises with Infrared Heating System [Text] / V. Zhelykh, N. Spodyniuk, O. Dzeryn, V. Shepichak // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2015. – Vol. 4, Issue 9. – P. 8–16.

6. Cordeiro, M. B. Thermal comfort and performance of chicks submitted to different heating systems during winter [Text] / M. B. Cordeiro, I. D. F. Tinoco, J. N. da Silva et. al. // Revista brasileira de zootecnia-brazilian journal of animal science. – 2010. – Vol. 39, Issue 1. – P. 217–224.
7. Chiacchio, F. Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches [Text] / F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, G. Manno, N. Trapani // Reliability Engineering & System Safety. – 2011. – Vol. 96, Issue 11. – P. 1515–1526. doi: 10.1016/j.ress.2011.06.014
8. Vega, M. Algorithm to evaluate substation reliability with cut and path sets [Text] / M. Vega, H. G. Sarmiento // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2008. – Vol. 44, Issue 6. – P. 1851–1858. doi: 10.1109/tia.2008.2006351
9. Yeh, W.-C. A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out-of-n networks [Text] / W.-C. Yeh // Reliability Engineering & System Safety. – 2006. – Vol. 91, Issue 1. – P. 36–43. doi: 10.1016/j.ress.2004.11.020
10. Nguyen, T. P. K. Method for evaluating an extended Fault Tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a satellite-based railway system [Text] / T. P. K. Nguyen, J. Beugin, J. Marais // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – Vol. 133. – P. 300–313. doi: 10.1016/j.ress.2014.09.019
11. Manno, G. Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism [Text] / G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, N. Trapani // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – Vol. 121. – P. 250–262. doi: 10.1016/j.ress.2013.09.002
12. Codetta-Raiteri, D. Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power [Text] / D. Codetta-Raiteri // Reliability Engineering & System Safety. – 2011. – Vol. 96, Issue 5. – P. 534–544. doi: 10.1016/j.ress.2010.12.027
13. Shcherbovskykh, S. Failure intensity determination for system with standby doubling [Text] / S. Shcherbovskykh, O. Lozynsky, Ya. Marushchak // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – Vol. 87, Issue 5. – P. 160–162.
14. Mandziy, B. Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component [Text] / B. Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskykh // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – Vol. 89, Issue 11. – P. 244–247.
15. Stefanovych, T. The reliability model for failure cause analysis of pressure vessel protective fittings with taking into account load-sharing effect between valves [Text] / T. Stefanovych, S. Shcherbovskykh, P. Drożdziel // Diagnostyka. – 2015. – Vol. 16, Issue 4. – P. 17–24.

