

УДК 629.735.017

О. М. Нечипоренко, О. В. Малишко

МЕТОД АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНИХ СИГНАЛІВ ЛІТАКА

Вступ

Система повітряних сигналів (СПС), як автономна система, що складається з датчиків первинних аеродинамічних параметрів, обчислювача і показчиків, набула широкого використання в авіаційній техніці, внаслідок своєї здатності об'єднати у собі всі датчики і показчики в єдину систему, виключивши дублювання і неузгодженість інформації.

Під аналізом надійності СПС будемо розуміти визначення складу показників надійності, які потрібно розрахувати; розробка функціональної схеми надійності, що заснована на аналізі функціонування елементів системи; складання математичної моделі, що пов'язує показники надійності системи з показниками надійності елементів; виконання розрахунку надійності, аналіз отриманих результатів, коректування розрахункової моделі і структури системи.

Методам аналізу надійності присвячена велика кількість робіт [1 - 3]. Водночас, в доступній авторам літературі розглядається аналіз структурних схем надійності, а аналіз дерева відмов не набув належного висвітлення. З відомих робіт можна виділити лише роботи [4, 5], в яких розглянуті окремі питання побудови дерева відмов, в яких подано опис комбінацій подій, що призводять до певного збою системи. Описано три логічні можливості: логічний елемент «АБО», логічний елемент «І», логічний елемент «ОПИТУВАННЯ». Наведено метод, який використовує параметричну надійність [6], де параметри системи вносяться в кожен графічний елемент, що служать для відображення елементарних подій і логічних операцій. Метод, подібний до представленого, розглядався в роботі [7], але в цій роботі є лише кількісний аналіз надійності, без якісного аналізу надійності.

Постановка задачі

Мета роботи полягає у розробці методу комплексного аналізу надійності СПС літака на основі об'єднання аналізу структурної схеми надійності системи на основі її функціональної схеми, графу станів її відновлюваних і невідновлюваних елементів, подальшої розробки математичної моделі надійності СПС і методу побудови і аналізу дерева відмов.

Математична модель надійності СПС

Під час виконання розрахунків надійності працюють не з самим технічним виробом, а з певним математичним об'єктом, що відображає найбільш істотні властивості реального виробу і називається *математичною моделлю надійності*. Для розв'язання задач оцінювання надійності й прогнозування працездатності об'єкта потрібно мати математичну модель, яку можна подати аналітичними виразами одного з показників $P(t)$, $f(t)$, або $\lambda(t)$. Для побудови математичної моделі надійності СПС необхідно виконати наступні пункти: – побудова структурної схеми надійності; – вибір закону розподілу; – складання моделі у вигляді графа станів. Першим етапом для побудови математичної моделі СПС є побудова структурної схеми надійності системи на основі функціональної схеми СПС. На рис. 1 представлена функціональна схема СПС.



Рис. 1. Функціональна схема СПС

Структурна схема надійності являє собою послідовне, паралельне або комбіноване з'єднання елементів. До послідовного з'єднання належать такі елементи СПС: частотний перетворювач, аналогово-цифровий перетворювач, блок індикації. До паралельного з'єднання належать такі елементи: центральний процесор, датчики тиску (повного і статичного). Структурна схема надійності СПС показана на рис. 2.



Рис. 2. Структурна схема надійності СПС

Вибір закону розподілу полягає у підборі аналітичної функції, яка якнайкраще апроксимує емпіричні функції безвідмовності і визначенні адекватності обраної математичної моделі експериментальним даним. В основі методів розрахунку надійності, що враховують раптові відмови, покладений *експоненціальний закон розподілу*, в методиках розрахунку, що враховують вплив параметричних відмов – *нормальний закон*. Тому, для побудови математичної моделі надійності СПС будемо використовувати нормальний закон розподілу та експоненціальний. Експоненціальний розподіл має такі характеристики:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad T_0 = \frac{1}{\lambda}; \quad D = \frac{1}{\lambda^2}; \quad \lambda \geq 0.$$

Вважають, що випадкова величина наробітку об'єкта до відмови підлягає експоненціальному закону розподілу:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \exp(-\beta t),$$

де λ_0 – значення інтенсивності відмов в деякий початковий момент часу; t – інтервал часу, який пройшов з моменту оцінки λ_0 до моменту розрахунку надійності.

Для СПС експоненціальним законом розподілу будемо описувати наступні елементи: частотний перетворювач, аналогово-цифровий перетворювач, блок індикації, центральний процесор.

Нормальний розподіл або розподіл Гауса використовується при оцінці надійності виробів, на які впливає ряд випадкових факторів, кожен з яких незначно впливає на результуючий ефект; зазвичай наявний при поступових відмовах, що викликаються старінням. Розподіл Гауса характеризується щільністю ймовірності виду:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right\},$$

де a та σ – параметри розподілу. Вважають, що за результатами випробувань $a = T_0$; $\sigma^2 = D$, де T_0 , D – оцінки середнього наробітку і дисперсії, а параметр σ фактично відображає його наробіток і дисперсію.

Для СПС нормальним законом розподілу будемо описувати датчики тиску.

Граф станів – це схема, що відображає перехід системи зі стану в стан. Модель зображають у вигляді графа станів. Вигляд графа станів показано на рис. 3, де кола (вершини графа S_1, S_2, \dots, S_n) – можливі стани системи S , що виникають у разі відмов або відновлення елементів; стрілки – можливі напрямки переходів з одного стану S_i в інший S_j ; над/під стрілками вказують інтенсивності переходів. Враховуючи структурну схему надійності, закони розподілу елементів та графи станів, побудуємо загальну математичну модель надійності СПС.

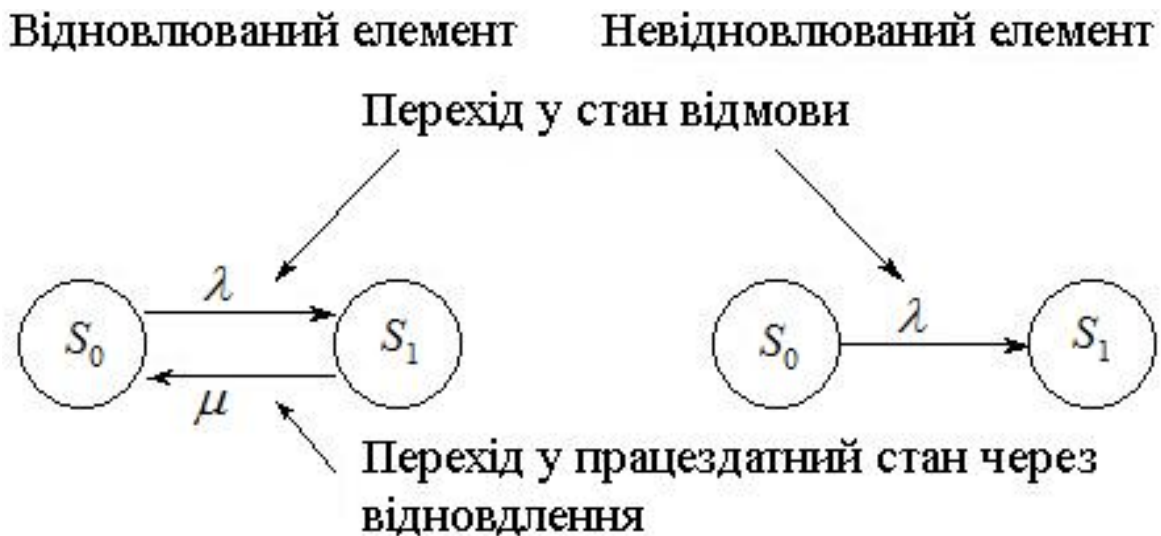


Рис. 3. Графи відновлюваного і невідновлюваного елемента

Для опису випадкового процесу переходу станів застосуємо імовірність станів:

$$P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t),$$

де $P_i(t)$ – імовірність знаходження системи в момент t в i -му стані.

За графом станів, для знаходження ймовірностей $P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t)$ складемо систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_4)P_0(t) + \mu_1P_1(t) + \mu_4P_4(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = (\lambda_1 + \lambda_4)P_0(t) - \mu_1P_1(t) - \mu_4P_4(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_1P_0(t) - \mu_1P_1(t); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_4(t) = 1. \end{cases}$$

Початкові умови за $t=0$: $P_0(0) = 1$; $P_1(0) = 0$; $P_2(0) = 0$; $P_4(0) = 0$.

Працездатна система Неpracездатна система

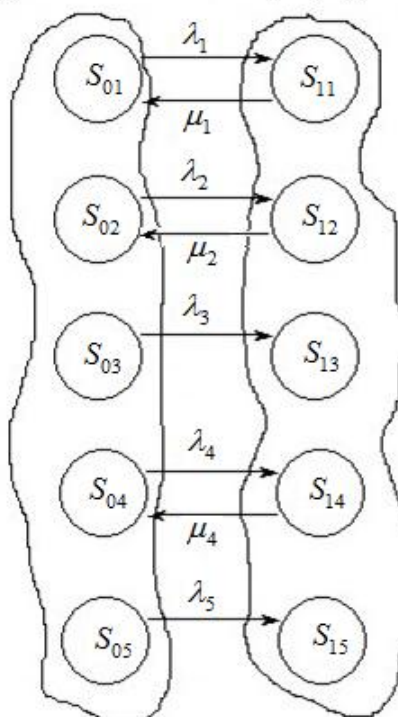


Рис. 4. Математична модель СПС у вигляді графа станів

За диференціальними рівняннями Колмогорова-Чепмена визначимо коефіцієнт готовності $k_{\bar{A}}$, прирівнявши до нуля їх ліві частини $\frac{dP_i(t)}{dt} = 0$, оскільки $P_i = \text{const}$ за $t \rightarrow \infty$. Тоді система перетворюється у систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_1 + \lambda_4)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_4 P_4(t); \\ 0 = (\lambda_1 + \lambda_4)P_0(t) - \mu_1 P_1(t) - \mu_4 P_4(t); \\ 0 = \lambda_1 P_0(t) - \mu_1 P_1(t); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_4(t) = 1. \end{cases}$$

Вирішуючи цю систему відносно P_0 за правилом Крамера знайдемо:

$$P_0 = \begin{vmatrix} 0 & \mu_1 & \mu_4 \\ 0 & \mu_1 & \mu_4 \\ 0 & -\mu_1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \left\{ \begin{vmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_4) & \mu_1 & \mu_4 \\ (\lambda_1 + \lambda_4) & \mu_1 & \mu_4 \\ \lambda_1 & -\mu_1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \right\}^{-1} =$$

$$= \frac{\mu_1 \mu_4}{\lambda_1 \mu_4 + \mu_1 \mu_4 + \lambda_4 \mu_1} = \frac{1}{1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_4 / \mu_4},$$

де коефіцієнт готовності: $k_{\bar{A}} = P_0$.

Знайдемо імовірність відмов системи:

$$P_{\text{СПС}} = P_{\text{ДТ}} + P_{\text{ЧП}} + P_{\text{АЦП}} + P_{\text{ЦП}} + P_{\text{БІ}},$$

$$P_{\text{ДПТ}} = (1 - P_{11})(1 - P_{12}),$$

$$P_{\text{ДСТ}} = (1 - P_{21})(1 - P_{22}),$$

$$P_{\text{ЧП}} = P_3,$$

$$P_{\text{ЦП}} = (1 - P_{41})(1 - P_{42}),$$

$$P_{\text{БІ}} = P_5.$$

Звідки, інтенсивність відмов СПС дорівнює:

$$\lambda_{\text{СПС}} = (\lambda_1 t)^2 + (\lambda_1 t)^2 + \lambda_3 + (\lambda_4 t)^2 + \lambda_5.$$

Застосування методу дерева відмов для аналізу надійності СПС літака

Аналіз дерева відмов є систематичним методом, який використовується для отримання інформації про систему, в разі нормальної поведінки, але й зокрема, у присутності відмови, для того, щоб підтримувати дуже складний процес прийняття рішення на стадії проектування, а також при керуванні й контролі. Дерево відмов – це цілий набір об'єктів, званих «логічні елементи». Дерево будується зверху вниз. Вища подія, називається «головна подія». Головна подія є виходом зі схеми, в той час як події на більш низькому рівні називаються «нижчі події» і є вхідними. У даній роботі було розглянуто якісний та кількісний аналіз дерева відмов.

Мета якісного аналізу полягає у визначенні мінімальних перерізів в дереві відмов, визначених для конкретної головної події в системі. Мінімальні перерізи – набір елементів, одночасний переклад яких із працездатного стану в непрацездатний викликає відмову всієї системи. Для ідентифікації мінімальних перерізів було побудовано дерево відмов СПС та еквівалентне дерево відмов (рис. 5) СПС.

В цілому система має 8 мінімальних перерізів, 6 основних події (немає електричного живлення, брак виготовлення, перегрів, відмову РК дисплея, відмову плати, відмова центрального процесора) і 2 другорядні події (коротке замикання, відмова збудника коливачів струни, розрив електричного кола, брак виготовлення, недоліки конструкції).

Мета кількісного аналізу полягає у побудові аналітичної функції надійності та отриманні функцій ймовірності відмови $F(t)$, ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$, щільності ймовірності $f(t)$, а також інтенсивності відмов $\lambda(t)$ для системи повітряних сигналів літака. Зокрема, в отриманні часової залежності аналізу надійності і ненадійності блоків.

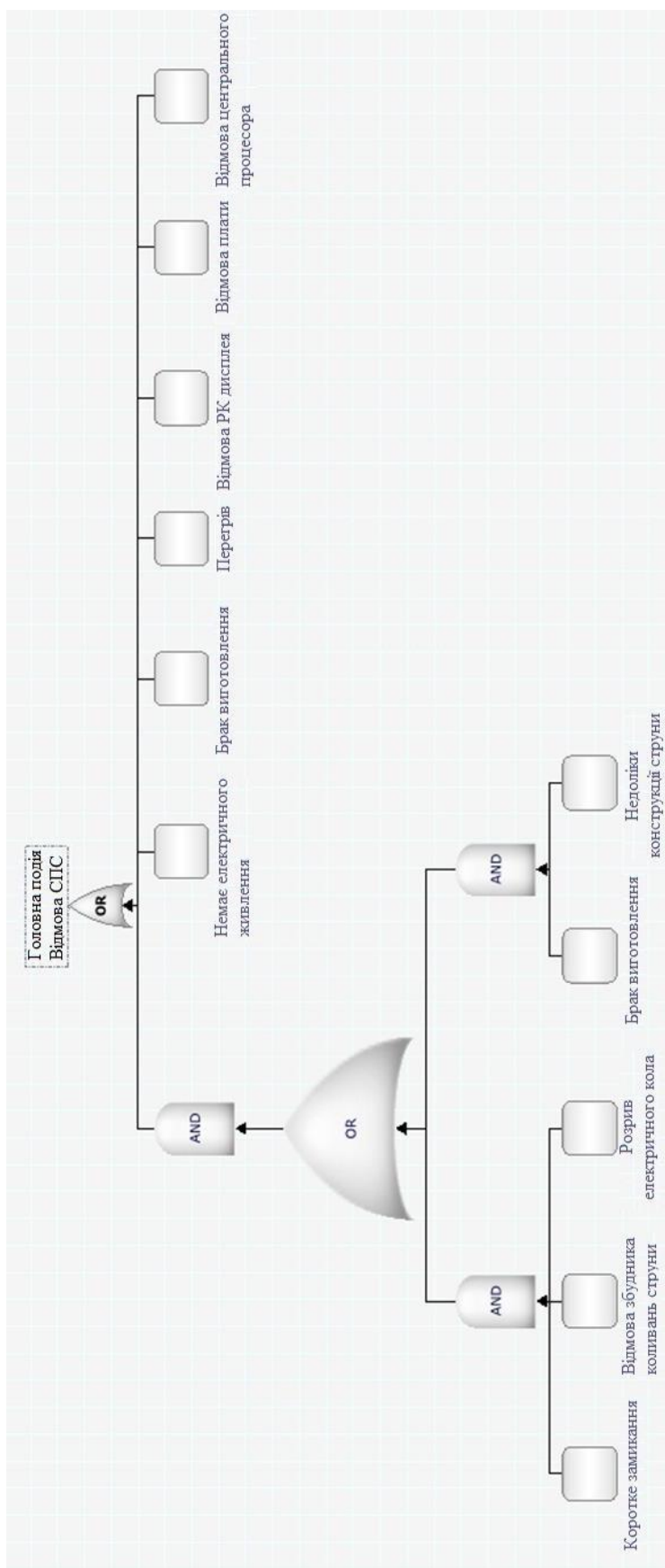


Рис. 5. Еквівалентне дерево відмов

На основі побудованого дерева відмов і пакета BlockSim компанії ReliaSoft знайдемо ці функції. В результаті отримано аналітичну функцію надійності:

$$P(t) = P_1 P_2 P_1 P_3 P_4 P_1 P_5 P_6 - P_7 P_5 P_1 P_9 P_{10} + P_7 P_5 + P_8 P_9 P_{10} - P_8 P_9 P_7 P_5 + P_8 P_9 P_{10} + P_7 P_5 + P_7 P_5 P_8 P_9 P_{10} + P_8 P_9 + P_{10} P_7 P_5 + P_8 P_9 P_{10} + P_9 P_5,$$

де P_1 – немає електричного живлення; P_2 – відмова РК дисплею; P_3 – відмова плати; P_4 – відмова центрального процесора; P_5 – брак виготовлення; P_6 – перегрів; P_7 – недоліки конструкції струни; P_8 – розрив електричного кола; P_9 – коротке замикання; P_{10} – відмова збудника коливань струни. На рис. 6 і рис. 7 представлені графіки функції ймовірності відмов, ймовірності безвідмовної роботи СПС, на рис. 8 – часова залежність ненадійності блоків СПС.



Рис. 6. Функція ймовірності відмови $F(t)$

Алгоритм аналізу надійності СПС

Комплексний метод аналізу надійності СПС складається з наступних операцій:

1. Побудувати математичну модель надійності СПС:

- побудувати структурну схему надійності;
- вибрати закон розподілу;
- зобразити модель у вигляді графа станів.

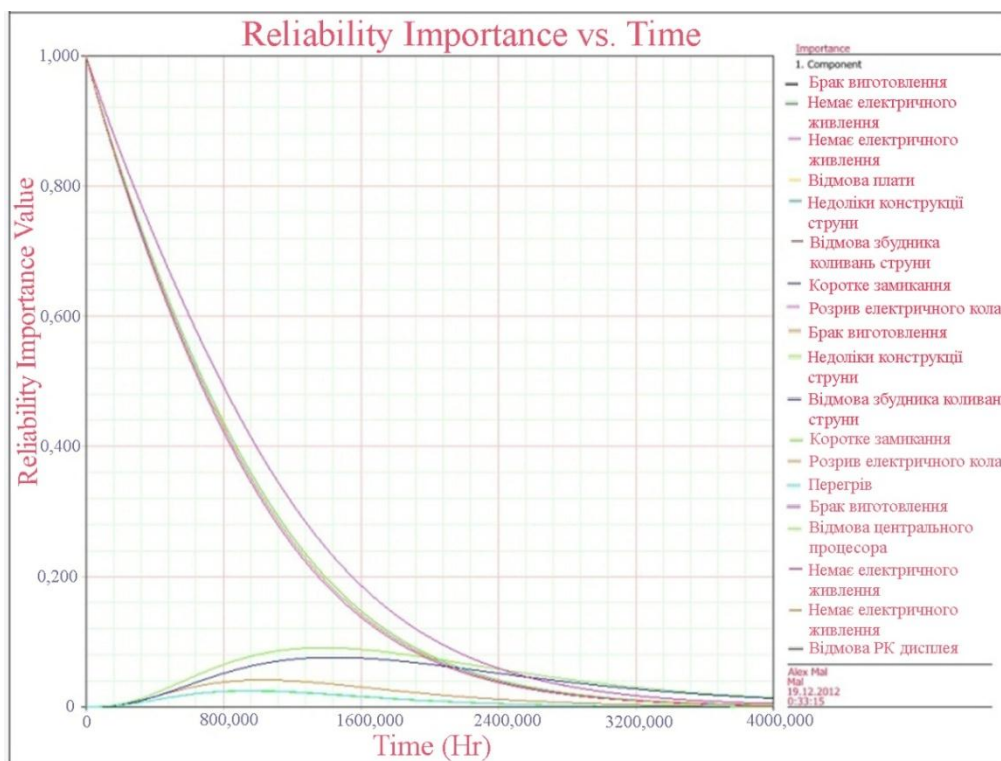
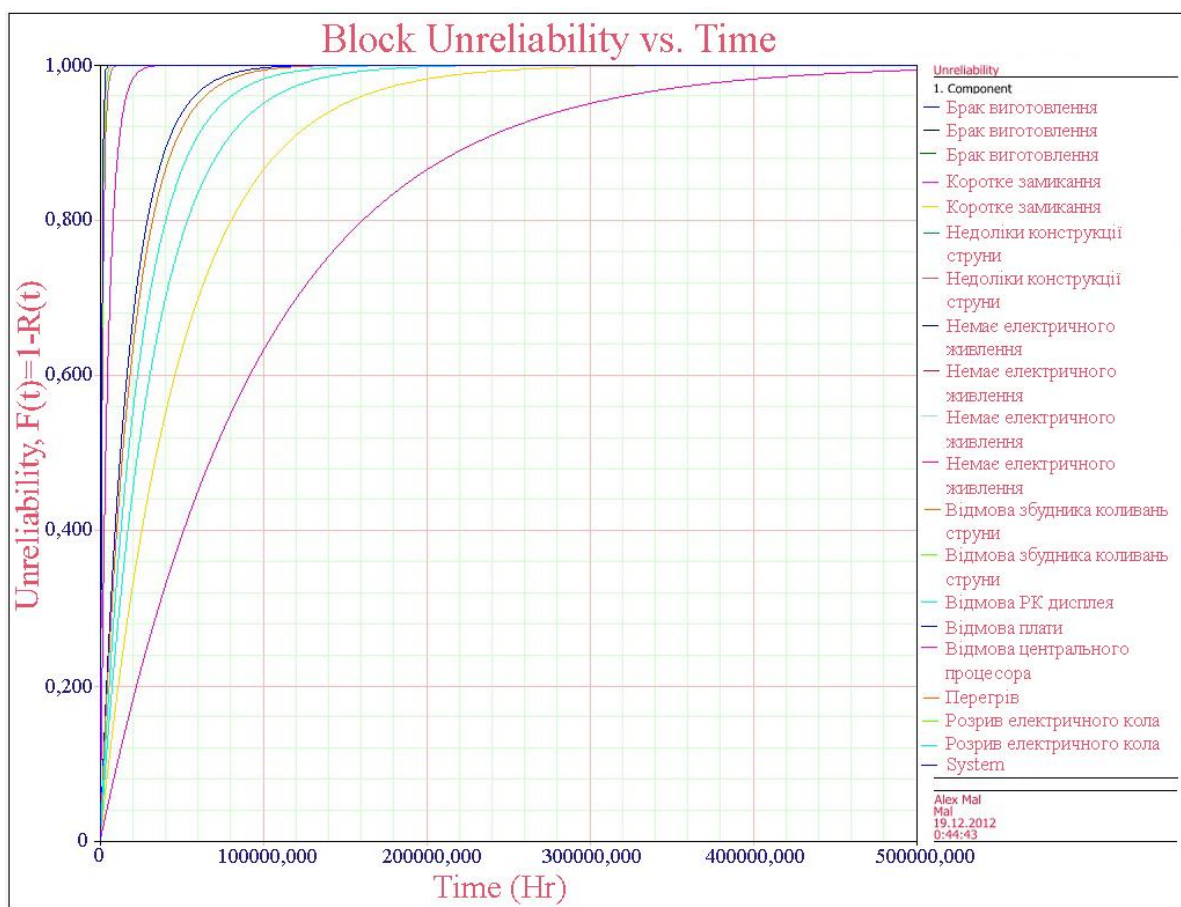
Рис. 7. Функція ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ 

Рис. 8. Часова залежність ненадійності блоків системи

2. Побудувати дерево відмов:

- ввести головну подію (відмова системи);
- записати наступні події (відмова складових частин, відмова елементів, події, що породжують відмову) з урахуванням логічних знаків;
- провести якісний аналіз:
 - побудувати еквівалентне дерево відмов;
 - визначити мінімальні перерізи;
- провести кількісний аналіз:
 - побудувати аналітичну функцію надійності;
 - вивести функцію ймовірності відмови $F(t)$, функцію ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$, функцію щільності ймовірності $f(t)$, та інтенсивності відмов $\lambda(t)$;
 - вивести часову залежність надійності і ненадійності блоків системи.

Висновки

Запропоновано метод комплексного аналізу надійності СПС літака, який включає в себе: побудову математичної моделі надійності системи (побудова структурної схеми надійності, вибір закону розподілу, зображення моделі у вигляді графа станів), побудову дерева відмов (проведення якісного і кількісного аналізу, виведення функції ймовірності відмов $F(t)$, функції ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$, функції щільності ймовірності $f(t)$, інтенсивності відмов $\lambda(t)$ та часової залежності надійності і ненадійності блоків системи).

Розглянутий метод дозволяє провести комплексний аналіз надійності системи без необхідності складання складних систем рівнянь. Крім того, вдається в явному вигляді показати ненадійні місця системи і надати наочний матеріал для фахівців, які беруть участь в обслуговуванні системи.

Список використаної літератури

1. Чернов В. Ю. Надежность авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов: учеб. пособие [Текст] // В. Ю. Чернов, В. Г. Никитин, Ю. П. Иванов /– СПбГУАП. СПб., 2004. – 96 с. – ISBN 5–8088–0100–1.
2. William Q. Meeker. Statistical Methods for Reliability Data // Meeker Q. William, Escobar A. Luis / – Wiley–Interscience Publication, 1998. – 701 p. – ISBN 0–471–14328–6.

3. *Князьков П. В.* Анализ и обеспечение надежности воздушных судов гражданской авиации в процессе эксплуатации // П. В. Князьков/ – СПб.: Питер, 2001. – 101 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/analiz-i-obespechenie-nadezhnosti-vozdushnykh-sudov-grazhdanskoi-aviatsii-v-protse-ikh-ek>.
4. *Smith J. D.* Reliability, Maintainability and Risk 7e: Practical Methods for Engineers including Reliability Centred Maintenance and Safety-Related Systems / D. J. Smith – Elsevier, 2005. – 350 p. – ISBN 0-7506-5168-7.
5. *Когге Ю. К.* Основы надежности авиационной техники: Учебник для студентов авиационных техникумов [Текст] // Ю. К. Когге, Р. А. Майский /– М: Машиностроение, 1993. – 176 с. – ISBN 5-217-01363-X.
6. *Нечипоренко О. М.* Основи надійності літальних апаратів: навчальний посібник з грифом МОН України [Текст] // О. М. Нечипоренко /– К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 240 с. – ISBN 978-966-622-360-2.
7. *Riccardo Manzini* Maintenance for Industrial Systems / Manzini Riccardo – Springer, London, 2010. – ISSN 1614-7839.