

УДК 656.71.057:621.31(045)

Казак В.М., д.т.н., Мазур Т.А., к.т.н., Новачук Л.В.

**ОЦІНКА ПЕРЕХІДНИХ СТАНІВ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ АЕРОДРОМНОГО
СВІТЛОСИГНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ**

Національний авіаційний університет, м. Київ, novachuk_liliya@ukr.net

В статті проведено оцінку перехідних станів системи живлення аеродромного світлосигнального комплексу для двох систем: штатної та запропонованої нової. Встановлено, що комплексована система електроживлення з введенням додаткового резерву має вищу живучість, безперервно забезпечує наявність енергії в мережах аеродромного світлосигнального комплексу.

Ключові слова: аеродромний світлосигнальний комплекс, система електроживлення, живучість.

Вступ. Одним із факторів підвищення безпеки польотів на етапах зльоту та посадки повітряного судна (ПС) є надійне функціонування аеродромного світлосигнального комплексу (АСК), яке в свою чергу залежить від безперервного живлення його системи. Проведений аналіз показав, що суттєвим недоліком сучасних систем електроживлення (СЕЖ) є перерви у живленні (2-20 с) та необхідність витримувати автономні джерела енергії в режимі «теплого» резерву. Крім того, при знеструмленні штатного обладнання для переключення потрібно витратити 1,5...15 хв., щоб вивести автономні джерела на потрібні параметри живлення, що у свою чергу порушує безпеку польоту ПС [1].

Постановка завдання. В роботі проведено оцінку перехідних станів систем живлення АСК: штатної та запропонованої нової з додатковим резервом – сонячною установкою. Встановлено, що комплексована система електроживлення має вищу живучість, безперервно забезпечує наявність енергії в мережах АСК, що у свою чергу забезпечує посадку ПС в екстремальних умовах.

Вирішення поставленого завдання. Система електроживлення АСК є системою, в якій протікають випадкові процеси, дискретні в просторі та в часі. Процес, що протікає в такій системі, полягає в тому, що в послідовні моменти часу $t_1, t_2, t_3, t_4 \dots$ система або переходить з даного стану в яке-небудь інше з можливих станів, або залишається в колишньому стані. Позначимо $X_i(k)$ подія, в якій система буде знаходитися в стані $X_i, i = 1, 2, \dots, n$, після k переходів. Після будь-якого k -го переходу, події $X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k)$ (1) утворюють повну групу несумісних подій. З урахуванням цього процес, що протікає в системі (1) можна представити як послідовність подій $X_1(0), X_2(1), X_3(2), X_4(3) \dots$ (2)

Якщо допустити, що для будь-якого кроку ймовірність переходу з стану X_i в інший стан X_j не залежить від того, коли і як система (1) перейшла в стан X_i , то послідовність подій (2) є марківський ланцюг.

Використовуємо марківський ланцюг для оцінки станів системи живлення АСК. З кожним станом $X_i(k), i = 1, \dots, n$ системи після k -го кроку зв'яжемо елемент марківського ланцюга $\{X_i\}$. Імовірності станів назвемо ймовірностями подій (2). Введемо позначення ймовірностей цих подій:

$$P_1(k) = P(X_1(k)), P_2(k) = P(X_2(k)), \dots, P_n(k) = P(X_n(k)), \quad (3)$$

де $P_i(k)$ – ймовірність того, що система (2) після k -го переходу (кроку) знаходиться в стані $X_i, i = 1, 2, \dots, n$.

Враховуючи несумісність подій, сума ймовірностей надійного забезпечення живленням АСК після k -го кроку: $\sum_{i=1}^n P_i(k) = 1$.

Для будь-якого переходу існують ймовірності переходу системи (2) з стану X_i в інші стани. Ці ймовірності відмінні від нуля, якщо система переходить з одного стану в інший, і дорівнюють нулю, якщо на даному переході система залишається в колишньому стані. Якщо ймовірності переходу марківського ланцюга не залежать від номера кроку k , то такий марківський ланцюг називається однорідним, якщо ж ймовірності переходу залежать від номера кроку, то ланцюг називається неоднорідним [2,3].

Розглянемо дві системи живлення АСК: штатну (лінії електропередач (ЛЕП)-дизель-генератор) та запроповану нову (ЛЕП-дизель-генератор-сонячна установка).

Нехай можливі стани утворюють однорідний марківський ланцюг. Імовірність переходу системи зі стану X_i в стан X_j , $i, j = 1, 2, \dots, n$, позначимо P_{ij} . Повна ймовірнісна картина можливих станів та переходів зі стану в стан, в яких може перебувати система, задається прямокутною матрицею P , складеною з ймовірностей переходу:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

З (4) видно, що елементи матриці по суті є умовними $P_{ij} = P(X_j(k) / X_i(k-1))$ (5)

того, що після k -го кроку система перейшла в стан X_j , при умові, що після попереднього $(k-1)$ кроку вона перебувала в стані X_i , $i = 1, 2, \dots, n$. Сума ймовірностей, що стоять в кожному рядку матриці P $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$, $i = 1, 2, \dots, n$ дорівнює одиниці, оскільки в якому стані не була

система перед k -м кроком, після k -го кроку вона повинна виявитися в одному з n несумісних станів, що утворюють повну групу несумісних подій. На головній діагоналі матриці P стоять ймовірності $P_{ii} = P(X_i(k) / X_i(k-1))$ (6)

того, що система живлення АСК не вийде зі стану X_i на наступному кроці. Якщо перехідна ймовірність $P_{ij} = 0$, то це означає, що на даному кроці система не може перейти зі стану X_i в стан X_j .

Для полегшення складання матриці ймовірностей P станів і переходів системи зі стану i в стан j , побудуємо її розмічений граф станів (рис. 1). Очевидно, що штатна система електроживлення АСК забезпечує безвідмовну роботу в цілому до появи відмови в одного з резервів.

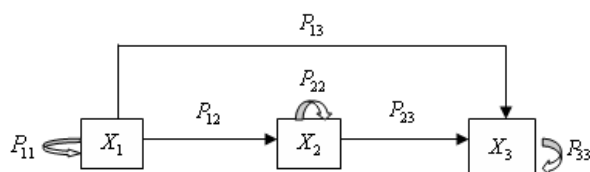


Рис. 1. Розмічений граф станів штатної системи живлення АСК

ймовірність безвідмовної роботи 0,98. Значення матриці перехідних ймовірностей і початкового стану системи дає можливість обчислити ймовірності станів системи після будь-якого кроку: $P_1(k), P_2(k), \dots, P_n(k)$.

Складемо матрицю перехідних ймовірностей для штатної системи:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

З (7) випливає, що для обчислення ймовірності станів системи в необхідний момент часу необхідно знати перехідні ймовірності P_{12}, P_{13}, P_{23} . Обчислимо їх з урахуванням вимог ІСАО та прийнятих розміченому графі (рис. 1) позначень станів.

$$P_{12} = P_1 P_2 (1 - P_3); P_{13} = P_1 (1 - P_2) (1 - P_3); P_{23} = 1 - (1 - P_1) (1 - P_2) (1 - P_3).$$

Нехай, наприклад, система знаходиться перед першим кроком в стані X_m , $m = 1, 2, \dots, n$. Тоді для початкового моменту часу $t_0 \in [t_0, t_k]$ ймовірності станів системи дорівнюють:

$$\begin{aligned} P_1(0) &= 0; P_2(0) = 0, \dots, P_m(0) = 1, \\ P_{m+1}(0) &= 0; P_{m+2}(0) = 0, \dots, P_n(0) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Після першого кроку система може залишатися в колишньому стані X_m або перейти в будь-який інший. Імовірність таких переходів рівні: $P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mm}, \dots, P_{mn}$ і складуть m -ий рядок матриці P (7) перехідних ймовірностей. Імовірність станів системи після першого переходу будуть рівні:

$$P_1(1) = P_{m1}; P_2(1) = P_{m2}; \dots,$$

$$P_m(1) = P_{m, \dots}, P_n(1) = P_{mn}.$$

У нашому випадку для обчислення цих значень необхідно з розгляду графа станів (рис. 1) визначити елементи матриці (7) перехідних ймовірностей:

$$P_{11} = 1 - (P_{12} + P_{13}); P_{21} = 0; P_{22} = 1 - (P_{21} + P_{23}); P_{31} = 0; P_{32} = 0; P_{33} = 1,0.$$

Встановимо початкові умови для визначення ймовірностей перехідних станів СЕЖ (рис. 2): в момент часу $t = t_0$ система знаходиться в стані X_1 , тому $P_1(0) = 1,00$; $P_2(0) = P_3(0) = 0,0$. Ймовірності станів системи після першого відключення електроенергії t_1 обираються із першого рядка матриці P . Ймовірності станів системи в момент часу $t = t_2$ (крок 2):

$$P_j(2) = \sum_{i=1}^n P_i(1)P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \tag{9}$$

$$P_1(2) = P_1(1)P_{11} + P_2(1)P_{21} + P_3(1)P_{31};$$

$$P_2(2) = P_1(1)P_{12} + P_2(1)P_{22} + P_3(1)P_{32};$$

$$P_3(2) = P_1(1)P_{13} + P_2(1)P_{23} + P_3(1)P_{33}.$$

Ймовірності станів системи в момент $t = t_3$ (третього переходу) можна визначити за рекурентною формулою [4]:

$$P_j(m) = \sum_{i=1}^n P_i(n-1)P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \tag{10}$$

$$P_1(3) = P_1(2)P_{11} + P_2(2)P_{21} + P_3(2)P_{31};$$

$$P_2(3) = P_1(2)P_{12} + P_2(2)P_{22} + P_3(2)P_{32};$$

$$P_3(3) = P_1(2)P_{13} + P_2(2)P_{23} + P_3(2)P_{33}.$$

Отже, штатна система забезпечує безперервне живлення АСК з ймовірністю стану системи $P_1(3) = 0.92$.

При розгляді запропонованої системи живлення АСК введемо позначення: X_1 – усі джерела працюють нормально, живлення АСК здійснюється від основного джерела енергії; X_2 – автономне джерело енергії та сонячна установка працює нормально, живлення від основного джерела енергії відсутнє; X_3 – сонячна установка працює нормально, живлення від основного та автономного джерела живлення відсутнє; X_4 – всі джерела живлення АСК відмовили. Розмічений граф станів системи живлення АСК при чотирикратному резервуванні з ймовірностями надійного забезпеченням живленням P_1, P_2, P_3, P_4 , представлений на рис. 3.

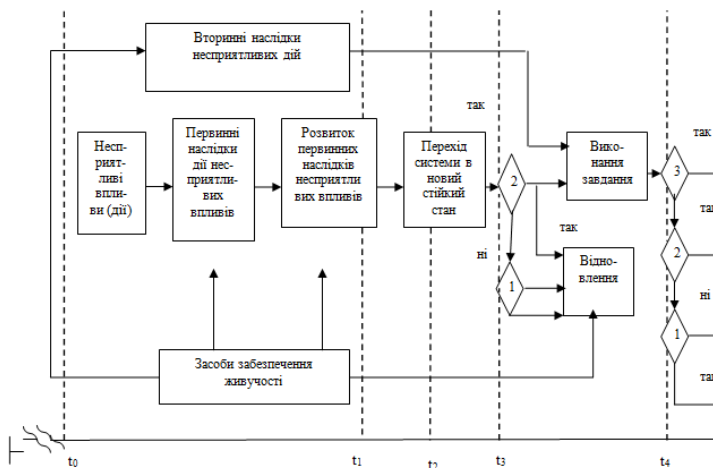


Рис. 2. Динаміка оцінки перехідних станів СЕЖ АСК в невизначених умовах експлуатації

Матриця перехідних ймовірностей для запропонованої системи (рис. 2) має вигляд:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix} \tag{11}$$

Визначимо відповідно до матриці (11) її перехідні ймовірності:

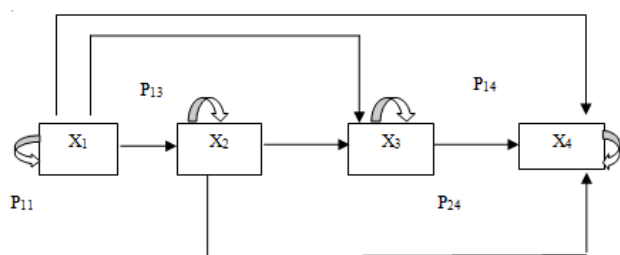


Рис. 3. Розмічений граф станів запропонованої системи живлення АСК

$$\begin{aligned}
 P_{12} &= P_1 P_2 P_4 (1 - P_3); \\
 P_{23} &= P_1 P_2 (1 - P_3)(1 - P_4); \\
 P_{34} &= 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4); \\
 P_{13} &= P_1 P_2 (1 - P_3)(1 - P_4); \\
 P_{14} &= P_1 (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4); \\
 P_{24} &= P_1 (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4); \quad (12) \\
 P_{11} &= 1 - (P_{12} + P_{13} + P_{14}); \\
 P_{22} &= 1 - (P_{21} + P_{23} + P_{24}); \\
 P_{33} &= 1 - (P_{31} + P_{32} + P_{34}); \\
 P_{44} &= 1 - (P_{41} + P_{42} + P_{43}).
 \end{aligned}$$

Встановимо початкові умови для визначення ймовірностей перехідних станів СЕЖ (рис. 3): в момент часу $t = t_0$ система знаходиться в стані X_1 , тому $P_1(0) = 1,0$; $P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0,0$. Ймовірності станів системи після першого відключення електроенергії t_1 обираються із першої строки матриці P .

Отже, з урахуванням початкових умов, маємо ймовірності станів системи в момент часу $t = t_2$ (крок $k = 2$):

$$\begin{aligned}
 P_1(2) &= P_1(1)P_{11} + P_2(1)P_{21} + P_3(1)P_{31} + P_4(1)P_{41}; \\
 P_2(2) &= P_1(1)P_{12} + P_2(1)P_{22} + P_3(1)P_{32} + P_4(1)P_{42}; \\
 P_3(2) &= P_1(1)P_{13} + P_2(1)P_{23} + P_3(1)P_{33} + P_4(1)P_{43}; \\
 P_4(2) &= P_1(1)P_{14} + P_2(1)P_{24} + P_3(1)P_{34} + P_4(1)P_{44}.
 \end{aligned}$$

Ймовірності станів системи в момент $t = t_3$ (третього переходу):

$$\begin{aligned}
 P_1(3) &= P_1(2)P_{11} + P_2(2)P_{21} + P_3(2)P_{31} + P_4(2)P_{41}; \\
 P_2(3) &= P_1(2)P_{12} + P_2(2)P_{22} + P_3(2)P_{32} + P_4(2)P_{42}; \\
 P_3(3) &= P_1(2)P_{13} + P_2(2)P_{23} + P_3(2)P_{33} + P_4(2)P_{43}; \\
 P_4(3) &= P_1(2)P_{14} + P_2(2)P_{24} + P_3(2)P_{34} + P_4(2)P_{44}.
 \end{aligned}$$

Ймовірності станів системи в момент $t = t_4$ (третього переходу):

$$\begin{aligned}
 P_1(4) &= P_1(3)P_{11} + P_2(3)P_{21} + P_3(3)P_{31} + P_4(3)P_{41}; \\
 P_2(4) &= P_1(3)P_{12} + P_2(3)P_{22} + P_3(3)P_{32} + P_4(3)P_{42}; \\
 P_3(4) &= P_1(3)P_{13} + P_2(3)P_{23} + P_3(3)P_{33} + P_4(3)P_{43}; \\
 P_4(4) &= P_1(3)P_{14} + P_2(3)P_{24} + P_3(3)P_{34} + P_4(3)P_{44}.
 \end{aligned}$$

Розглядаючи процес розвитку несприятливих впливів (рис. 2) можна зробити висновок, що запропонована модель підвищення живучості СЕЖ АСК з урахуванням непередбачених зовнішніх деградуючих впливів, наприклад, після настання моменту часу t_4 (рис. 2), забезпечує збереження працездатного стану з ймовірністю стану системи $P_1(4) = 0.96$.

Висновок. Запропонована комплексована система електроживлення з введенням додаткового резерву має вищу живучість та безперервно забезпечує наявність енергії в мережах АСК, що у свою чергу забезпечує посадку ПС в екстремальних умовах.

Список літературних джерел

1. Дизели. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 169 с.
2. Доценко Б.И. Системы автоматического контроля [Текст] : [Учеб. пособие] / Б.И. Доценко, В.А.Игнатов, В.Н. Казак. – К.: КИИГА, 1995. – 148с.
3. Казак В.М. Основи експрес-діагностування: [навч. посібник] / В.М. Казак, А.К. Зюзько. – К.: НАУ, 2005. – 164 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.