

УДК 629.735.017.1.06 (045)

<sup>1</sup>В.І. Нерет, канд. техн. наук  
<sup>2</sup>О.А. Сущенко, канд. техн. наук**МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЖИВУЧОСТІ СКЛАДНИХ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**<sup>1</sup>Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: akiweb@nau.edu.ua<sup>2</sup>Інститут електроніки та систем управління НАУ e-mail: fsu@nau.edu.ua

*Розроблено методику оцінювання живучості резервованих систем електропостачання електроприймачів високої категорії на основі ймовірно-детермінованих моделей. Обґрунтовано критерій відмови системи резервування промислової мережі, виходячи із заданого рівня забезпечення безпеки польотів*

**Вступ**

Високий рівень безпеки і регулярності польотів забезпечується на всіх етапах літаководіння. Тому прагнення досягти вищого рівня надійності функціонування складової цього процесу – технологічного обладнання аеродромних наземних засобів забезпечення польотів, цілком закономірне. Обладнання наземних засобів забезпечення польотів особливо чутливе до якості електричної енергії та перерв електропостачання.

Підвищення надійності його електроживлення дозволяє суттєво зменшити ймовірність критичних ситуацій на етапі “зліт–посадка” повітряного судна (ПС), тобто відмов із безпосереднім впливом на життя і здоров’я людей.

Для проектування, виготовлення й експлуатації складних електроенергетичних систем, що забезпечують електроживлення цього обладнання, як критерії прийняття оптимальних схемно-технічних і організаційних рішень використовують кількісні показники живучості.

Цілеспрямоване забезпечення потрібного рівня живучості таких систем, а також можливість його регулювання дозволяє суттєво підвищити безпеку польотів за одночасного стримування росту вартості додаткових капіталовкладень.

**Постановка проблеми**

Натепер надійність і живучість електропостачання відповідальних електроприймачів (ЕП) першої категорії особливої групи забезпечується за рахунок встановленої кількості незалежних джерел електроживлення без урахування їх надійнісних характеристик, які за даними статистики відрізняються в десятки і сотні разів.

Проблему забезпечення кількісних показників надійності та живучості електропостачання відповідальних ЕП аеропортів ще й досі не вирішено, а її актуальність у зв’язку зі зростанням інтенсивності польотів у всьому світі і, відповідно, вимог до їх безпеки і регулярності невинно зростає.

Отже, розроблення методики оцінювання рівня живучості електропостачання світлосигнальної системи аеродрому (ССА) вносить вагому частку у розв’язання цієї проблеми.

**Аналіз останніх досліджень**

Для створення методики оцінювання рівня живучості складних електроенергетичних систем, якими є системи електропостачання відповідальних ЕП, були проаналізовані найбільш поширені відомі кількісні оцінки щодо можливого їх використання. Так, рівень живучості системи  $L_{if_i}$ , для якої виконується розвантаження за частотою, тобто застосовується відключення невідповідальних ЕП, визначають таким співвідношенням [1]:

$$L_{if_i} = (\Delta E_m - \sum_{i=1}^m \Delta E_i P_i) / \sum_{i=1}^m \Delta E_i P_i,$$

де  $\Delta E_m$  – межа недовідпуску електроенергії, за якою живучість знаходиться на граничному рівні;  $\Delta E_i$  – недовідпуск електроенергії за умов  $i$ -го збурення для випадку, коли протиаварійні автоматичні пристрої виконують розвантаження за частотою з метою збереження основних функцій системи;  $P_i$  – ймовірність появи  $i$ -го збурення;  $m$  – кількість збурень.

Але для енергослужб аеропортів така оцінка не може бути прийнятною через їх дуже низьку потужність порівняно з енергосистемою і наявність великої кількості відповідальних ЕП, які не можна відключати, а також через неможливість впливу таким методом на короткочасні перерви електропостачання.

Для оцінювання живучості також використовують методи системно-інформаційного аналізу [2], які оперують ймовірностями недосягнення цілей через порушення функціонування об’єкта, вузла керування за умови неповної апріорної інформації. Ці методи дозволяють отримати прагматичну оцінку живучості та визначати залежність між неорганізованістю глобальної цілі,

за яку у цьому разі вважають живучість, і неорганізованостями зв'язаних з нею цілей, що характеризують окремі властивості складної системи:

$$\bar{O}_{L_{ij}} = \left| -Z_d (1 - \gamma_1 \bar{O}_1) \dots (1 - \gamma_k \bar{O}_k) \left( 1 - \sum_{i=k+1}^n S_i \bar{O}_i \right) \right|,$$

де  $Z_d = f(a, z_{\text{еф}})$  – коефіцієнт організації керування, що залежить від оцінки живучості  $a$  вузла керування і ефективності роботи вузла керування  $z_{\text{еф}}$ ;  $\gamma_1, \gamma_k$  – коефіцієнти зворотного і перехресного впливу між визначальними цілями;  $\bar{O}_1, \bar{O}_k$  – неорганізованість визначальних цілей;  $\bar{O}_{k+1}, \bar{O}_n$  – неорганізованість доповняльних цілей;  $S$  – коефіцієнт відносної важливості доповняльних цілей.

Показник цільової неорганізованості та причинно-наслідкові зв'язки між цілями використовують для розпізнавання аварійної ситуації і прийняття рішень для її ліквідації в деяких електроенергетичних системах і знову ж таки завдяки відключенню невідповідальних ЕП.

Відомі також кількісні показники рівня живучості, які не використовують імовірнісних характеристик, наприклад [3]:

$$L_j(E) = \min_{l_i \in E} \Phi_j(l_i),$$

де  $L_j(E)$  – показник живучості системи для множини можливих зовнішніх збурень  $E = \{l_1 \dots l_i\}$ ;  $\Phi_j(l_i)$  – показник якості функціонування  $j$ -го варіанта системи під час збурення  $l_i$ .

Тобто в умовах невизначеності для оцінювання живучості за цим показником розглядають найгірший випадок функціонування складної системи, при цьому оптимізацію проектованої системи зводять до знаходження такого варіанта системи, для якого  $L_j$  має максимальне значення.

В умовах аеропортів, де ведеться облік перерв електропостачання централізованих введів, найбільш прийнятною є така оцінка живучості, як параметр потоку відмов функціонування з каскадним розвитком збурення і масовим порушенням електроживлення ЕП [4].

### Постановка завдання

Мета досліджень – розроблення методики оцінювання живучості складних електроенергетичних систем, відокремлення важелів впливу на отримані оцінки і розроблення рекомендацій щодо підвищення живучості електропостачання ЕП першої категорії особливої групи.

### Оцінювання живучості складної електроенергетичної системи

Для оцінювання надійності функціонування системи електропостачання ССА скористаємося визначенням у статті [4] критерієм її відмови.

Згідно з діючими нормативними документами існують обмеження використання ССА за умови наявності відмов електроживлення, або відмов її складових. Якщо узагальнити різні комбінації відмов усіх функціональних груп ССА і звести їх до відмови електроживлення, то для оцінювання живучості критерієм відмови доцільно прийняти відмову одразу двох шин гарантованого електроживлення (ШГЖ) [4].

Оцінювання живучості складних електроенергетичних систем за типовими розрахунками надійності із середньостатистичними показниками, які не враховують технологію роботи аеропорту, дає значні похибки. Тому виникає потреба у врахуванні реального розподілу тривалості відмов і рідкісних подій, тобто відмов автоматичного введення резерву (АВР), захисних апаратів з параметром потоку відмов, більшим ніж  $10^{-3}$  рік $^{-1}$ , якщо тривалість їх існування досить значна.

За умови використання існуючої періодичності перевірок працездатності системи резервування промислової мережі (СРПМ) світлосигнальної системи за першою і другою категоріями ІКАО, тобто один раз на тиждень, відмова захисту або помилкове перемикавання АВР без відповідної сигналізації можуть існувати принаймні тиждень, що у разі появи інших відмов у системі електропостачання може призвести до порушення електропостачання відповідальних ЕП.

Відмови електроживлення ЕП першої категорії особливої групи аеропорту значно розрізняються за тривалістю внаслідок зміни конфігурації СРПМ і введенням в роботу різного резервного електрообладнання, тому їх можна згрупувати у три групи:

1) короточасні перерви електропостачання  $T_k$  тривалістю до 3 с, що відбуваються за умови значного зниження напруги мережі, до якого призводять короткі замикання, робота швидкодіючих низьковольтних АВР з малими витримками часу;

2) середні перерви електропостачання  $T_c$  тривалістю 15 с, що відбуваються внаслідок відмови низьковольтних АВР та роботи високовольтних АВР, пристроїв автоматичного повторного ввімкнення енергосистеми, введенням у роботу автономних дизельних електроагрегатів;

3) довгочасні перерви електропостачання тривалістю понад 15 с, що відбуваються за умови

відмови СРПМ з дизельними агрегатами, але тривалість їх обмежується часом в 5 хв, оскільки за існуючою технологією після такого терміну знеструмлення наземних засобів забезпечення польотів аеропорт буде закритим.

Розглянемо методичний підхід до створення ймовірно-детермінованої моделі [3; 4] для оцінювання живучості електропостачання ССА на прикладі типових СРПМ (рис. 1, 2), що відповідають всім вимогам і рекомендаціям ІКАО.

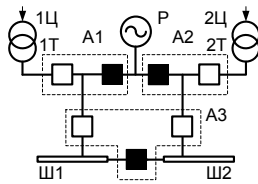


Рис. 1

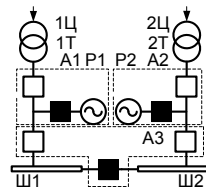


Рис. 2

На рис. 1 від двох незалежних централізованих джерел живлення (вводів) 1Ц і 2Ц через два силові понижувальні трансформатори напруга подається до відповідного нормального робочого входу першого і другого пристроїв АВР – А1 і А2. Аварійні (в нормальному стані вимкнені) входи цих пристроїв підключені до автономного дизельного електроагрегата P, а виходи через секційний АВР А3 підключаються до двох секцій ШГЖ – Ш1 і Ш2.

Для розрахунку живучості електропостачання ССА необхідно детальніше розглянути роботу СРПМ з відмовами другої кратності  $q^2$  [4]. Опишемо ситуації, котрі можуть призвести до повної відмови електроживлення ССА.

Ситуація 1. Відмова обох секцій шин виникає у тому випадку, коли після відмови одного з централізованих джерел з параметром потоку відмов до запуску дизельного електроагрегата відмовить інше джерело відповідно  $\omega_{2к}(\omega_{1к})$  (рис. 3).

У цьому випадку можливі лише короткочасні відмови з параметром потоку відмов  $\Omega_{1к}$  або середньотривалі відмови  $\Omega_{1с}$  електропостачання ССА у зв'язку із тим, що запуск дизельного електроагрегата триває 15 с.

Ураховуючи, що в останньому випадку відмови відбуваються тільки за певної послідовності подій: спочатку відмова середня або довгочасна першого чи другого централізованого вводу з параметром потоку відмов  $\omega_{1с.д} = \omega_{1с} + \omega_{1д}$  чи  $\omega_{2с.д}$ , а потім короткочасна – з параметром потоку відмов  $\omega_{1к}(\omega_{2к})$ , отримуємо такий вираз:

$$\Omega_{1к} = \omega_{1к} \omega_{2к} T_k + \frac{\omega_{1с.д} \omega_{2к} + \omega_{2с.д} \omega_{1к}}{2} T_c = \quad (1)$$

$$= 3,2 \cdot 10^{-7} (0,2 \omega_{1к} \omega_{2к} + \omega_{1с.д} \omega_{2к} + \omega_{2с.д} \omega_{1к}).$$

Коефіцієнти у виразі (1) визначено для параметрів потоків відмов.

Параметр потоку відмов середньої тривалості  $\Omega_{1с}$  можна обчислити за аналогічним підходом:

$$\Omega_{1с} = \omega_{1сс} \omega_{2сс} T_c = 6,3 \cdot 10^{-7} \omega_{1сс} \omega_{2сс}.$$

Ситуація 2. Відмови двох ШГЖ усіх тривалостей можуть відбутися, коли під час довгочасної відмови одного з централізованих вводів відмовляє будь-який інший, а дизельний електроагрегат не запуснувся, тобто відмовив в режимі очікування з ймовірністю  $Q_{даО}$  (рис. 4).

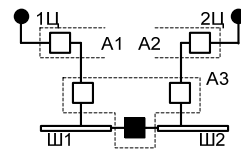


Рис. 3

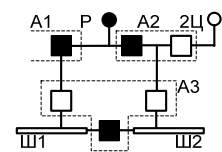


Рис. 4

Якщо ж в роботі залишається лише одне джерело електроживлення ССА, керівник польотів закриває аеропорт після прийому ПС, які знаходяться на крузі. Нехай цей час становить  $T_d = 300$  с.

Тоді за аналогією, можна записати такі вирази для зазначеної послідовності подій:

$$\Omega_{2к} = \frac{\omega_{1д} \omega_{2к} + \omega_{2д} \omega_{1к}}{2} T_d Q_{даО} =$$

$$= 4,8 \cdot 10^{-6} (\omega_{1д} \omega_{2к} + \omega_{2д} \omega_{1к}) Q_{даО};$$

$$\Omega_{2с} = 4,8 \cdot 10^{-6} (\omega_{1д} \omega_{2с} + \omega_{2д} \omega_{1с}) Q_{даО};$$

$$\Omega_{2д} = 9,6 \cdot 10^{-6} \omega_{1д} \omega_{2д} Q_{даО};$$

$$Q_{даО} = 0,5 \omega_{даО} T_{п.да},$$

де  $\omega_{даО}$  – параметр потоку відмов дизельного електроагрегата в режимі очікування “резерв”, а  $T_{п.да}$  – час між перевірками його працездатності.

Ситуація 3. Тривале вимкнення одного з централізованих вводів характеризується коефіцієнтом вимушеного простою або профілактичного ремонту  $K_0$  і можливістю відмови в роботі дизельного електроагрегата. Слід зауважити, що в аеропорту ремонти дизельних електроагрегатів та АВР під час складних погодних умов призначатися звичайно не будуть, а ремонти у централізованій мережі виконують незалежно від вимог аеропорту (рис. 5).

Перед вимкненням одного з централізованих вводів під час планового ремонту в енергосистемі потрібно заздалегідь запуснути дизельний електроагрегат і завантажити його вище за мінімально допустиму потужність. Якщо дизельний електроагрегат відмовить у робочому стані з пара-

метром потоку відмов  $\omega_{д.АР}$ , то аеропорт за встановленою технологією [4] буде закритим після прийому літаків, що знаходяться на крузі. Виходячи з такого розвитку подій і їх послідовності, можна записати такі вирази:

$$\begin{aligned} \Omega_{3к} &= \frac{(K_{в1} + K_{р1})\omega_{2к} + (K_{в2} + K_{р2})\omega_{1к}}{2} \omega_{д.р} T_d = \\ &= 4,8 \cdot 10^{-6} \omega_{д.АР} [(K_{в1} + K_{р1})\omega_{2к} + (K_{в2} + K_{р2})\omega_{1к}]; \\ \Omega_{3с} &= 4,8 \cdot 10^{-6} \omega_{д.АР} [(K_{в1} + K_{р1})\omega_{2с} + (K_{в2} + K_{р2})\omega_{1с}]; \\ \Omega_{3д} &= 4,8 \cdot 10^{-6} \omega_{д.АР} [(K_{в1} + K_{р1})\omega_{2д} + (K_{в2} + K_{р2})\omega_{1д}]. \end{aligned}$$

Ситуація 4. Пов'язана з можливим коротким замиканням на ШГЖ з параметром потоку відмов  $\omega_{ШГЖ}$  і відмовою однакових захисних вимикачів з імовірністю відмови одного з них  $Q_3$  (рис. 6).

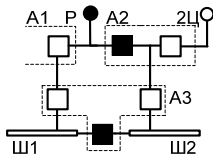


Рис. 5

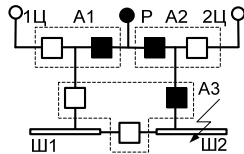


Рис. 6

У разі виникнення короткого замикання на ШГЖ, нормально має спрацювати захист, що відключить її від централізованого вводу і заблокує секційний автоматичний вимикач. Якщо ж відмовить захист одного з автоматичних вимикачів вводів, то спрацює наступний захист, ближчий до централізованого вводу, а секційний вимикач не буде заблокований. Якщо немає електроживлення на будь-якій ШГЖ, секційний вимикач увімкнеться на коротке замикання, і за можливої відмови цього захисту може вимкнутись і друга секція ШГЖ. Виходячи з розглянутих можливих подій, можна записати:

$$\begin{aligned} \Omega_{4д} &= 2Q_3^2 \omega_{ШГЖ} = 2 \left( \frac{\omega_3 T_{п.з}}{2} \right)^2 \omega_{ШГЖ} = \\ &= 0,5 \omega_3^2 T_{п.з}^2 \omega_{ШГЖ}, \end{aligned}$$

де  $\omega_3$  – параметр потоку відмов захисту автоматичних вимикачів;  $T_{п.з}$  – час між перевірками їх працездатності.

Слід звернути увагу на те, що подібна ситуація може виникнути в системі електропостачання аеропорту і в разі короткого замикання на високовольтних шинах з параметром потоку відмов  $\omega_{вш}$ , якщо є високовольтний АВР. Це може призвести до виникнення відмови середньої тривалості аж доки не запуститься дизельний електроагрегат:

$$\Omega_{4с} = 0,5 \omega_3^2 T_{п.з}^2 \omega_{вш}.$$

Ситуація 5. При короткому замиканні ШГЖ ( $\omega_{ШГЖ1} = \omega_{ШГЖ2} = \omega_{ШГЖ}$ ) вимикається захистом (рис. 7). При цьому дизельний електроагрегат не запускається автоматично, бо на вході блока контролю напруги дизельного агрегата напруга залишається нормальною.

Після цього керівник польотів інформує екіпажі ПС про закриття аеропорту. За цей час може відмовити централізоване джерело електроживлення, що живить другу ШГЖ.

За наявності АРВ на високій напрузі така подія малоімовірна. У результаті до запуску дизельного електроагрегата виникне короткочасна відмова обох ШГЖ, або середньої тривалості.

Уважаючи, що час на інформування екіпажів  $T_i$  не перевищує 20 с, параметри потоків відмов аналогічно першому сценарію становлять:

$$\begin{aligned} \Omega_{5к} &= \frac{\omega_{ШГЖ2} \omega_{1к} + \omega_{ШГЖ1} \omega_{2к}}{2} T_i = \\ &= 3,2 \cdot 10^{-7} \omega_{ШГЖ} (\omega_{1к} + \omega_{2к}); \\ \Omega_{5с} &= 3,2 \cdot 10^{-7} \omega_{ШГЖ} (\omega_{1с.д} + \omega_{2с.д}). \end{aligned}$$

Ситуація 6. АВР пов'язане з помилковою роботою. Спрацьовування у разі відмов чутливих елементів за наявності напруги з ймовірністю  $Q_{п.АВР}$  (рис. 8).

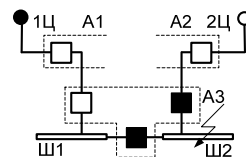


Рис. 7

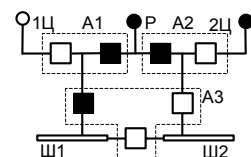


Рис. 8

На відміну від перших п'яти в цій ситуації розглядається надійність ланцюгів вторинної комутації.

Параметр потоку відмов таких подій  $\omega_{п.АВР}$ . Якщо сигналізації такого режиму немає (що є в багатьох аеропортах), то він може тривати кілька годин, або навіть кілька діб (нехай час між перевірками становить  $T_{п.АВР}$ ). Тоді в разі відмови централізованого джерела електроживлення на обох ШГЖ не буде напруги, доки не запуститься дизельний електроагрегат з імовірністю  $Q_{д.АО}$ .

Аналогічно визначимо параметри потоку відмов для шостої ситуації:

$$\begin{aligned}\Omega_{6к} &= T_{пАВР} \left( 2\omega_{пАВР} \frac{\omega_{2к}}{2} + \omega_{пАВР} \frac{\omega_{1к}}{2} \right) = \\ &= T_{пАВР} \omega_{пАВР} (\omega_{2к} + 0,5\omega_{1к}); \\ \Omega_{6с} &= T_{пАВР} \omega_{пАВР} (\omega_{1с.д} + 0,5\omega_{2с.д}); \\ \Omega_{6д} &= T_{пАВР} \omega_{пАВР} Q_{д.а.с} (\omega_{2д} + 0,5\omega_{1д}).\end{aligned}$$

Аналогічні відмови можуть виникнути і в разі помилкової роботи АРВ на високій напрузі. Але їх можна не враховувати, бо час існування такого режиму буде незначний, оскільки сигналізація стану високовольтних АВР є обов'язковою, і черговий персонал швидко втрутиться в ситуацію.

Додатковий потік відмов може виникнути в разі збігу ремонту дизельного електроагрегата зі складними погодними умовами або з особливостями системи електропостачання аеропорту, тому імовірність його для конкретних умов треба обчислювати і брати до уваги.

Для типової схеми з двома дизельними електроагрегатами (рис. 2) на схемах один дизельний електроагрегат замінюється двома, а для інших ситуацій параметри дизельного електроагрегата (треба розуміти як узагальненого) поділяються на два.

Після розрахунку всіх складових параметра потоку відмов необхідно їх скласти і проаналізувати. Параметр потоку разом узятих відмов середньої і великої тривалості не повинен перевищувати  $10^{-3}$  рік<sup>-1</sup>, а короткочасних –  $(2...5) \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup> [4]. Якщо вони перевищують ці значення, то треба розробити план впливу на них за допомогою використання більш надійного (сучасного) вдосконалення методів експлуатації, або збільшення витрат на експлуатацію за рахунок збільшення частоти та обсягу робіт.

В.И. Нерет, О.А. Сущенко

Методика оценивания живучести сложных электроэнергетических систем

Разработана методика оценивания живучести резервированных систем электроснабжения электроприемников высокой категории на основе вероятностно-детерминированных моделей. Обоснован критерий отказа системы резервирования промышленной сети исходя из заданного уровня обеспечения безопасности полетов.

V.I. Neret, O.A. Sushchenko

A methodology for assessing the survivability of complex electrical power systems

A methodology based on probabilistic determined models is developed for assessing the survivability of power supply reserved systems for first category electrical receivers. A failure criterion for an industrial network reservation system is grounded for a given flight safety level.

Із усіх можливих методів потрібно вибирати найбільш дійові, які з найменшими витратами зможуть дати максимальний ефект.

### Висновки

1. Для оцінювання кількісних показників живучості складної електроенергетичної системи розроблено методику із використанням статистичних даних, що реєструються у кожному аеропорту. Спеціального дослідження та уточнення потребує лише нормативне значення кількісної оцінки показника живучості.

2. Перевагами розробленої методики слід вважати те, що вона дозволяє у широких межах регулювати параметри кількісної оцінки живучості технічними та організаційними засобами.

### Список літератури

1. Горский Ю.М. Подходы к количественной оценке живучести // Метод. вопр. исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск: СО СЭН АН СССР. – 1980. – Вып. 20. – С. 24-31.
2. Казак В.М., Шевчук Д.О., Тачиніна О.М., Лазарчук Є.П. Порівняльний аналіз методів кількісного визначення властивостей живучості динамічних систем // Вісн. ПНЦ ТАУ. – 2003. – № 6. – С. 71-74.
3. Авраменко В.Н. Вопросы анализа живучести энергообъединений. – К.: 1997. – 45 с. – Препринт / АН Украины. Ин-т электродинамики; № 808.
4. Казак В.М., Нерет В.И. Оцінка живучості системи електропостачання аеродромного світлосигнального комплексу // Вісн. ПНЦ ТАУ. – 2003. – № 6. – С. 62-66.

Стаття надійшла до редакції 27.01.04.