

УДК 629.735.017.1.06:629.735.051.83(045)

¹В.І. Нерет, канд. техн. наук
²О.А. Сущенко, канд. техн. наук

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНОГО ДІАГНОСТУЮЧОГО ПАРАМЕТРА МЕРЕЖ АЕРОДРОМНИХ ВОГНІВ

¹Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: aviacosm@nau.edu.ua,²Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

За даними нормативних документів і на підставі досвіду експлуатації проаналізовано діагностуючий параметр – опір ізоляції кабельних мереж аеродромних вогнів відносно землі. Досліджено фізичну модель пробою ізоляції цих мереж. Запропоновано методику визначення мінімально припустимого значення цього параметра.

Вступ

У сучасних умовах при подальшому загостренні паливно-енергетичної кризи набуває актуальності проблема зниження собівартості авіаційних перевезень.

Одним із напрямів утримання ситуації, що склалася, під контролем є безперервне вдосконалення програм технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) наземних засобів забезпечення польотів. Цьому значною мірою сприяють нові принципи конструювання електрообладнання, тому що живучість функціональних систем залежить від безпечної відмови складових елементів завдяки різним видам резервування і вбудованим системам контролю, для яких повинні бути задані мінімально припустимі значення параметрів, що контролюються.

Оптимальність тієї чи іншої програми технічної експлуатації визначається ступенем взаємодії між об'єктивним процесом зміни технічного стану об'єкта під дією тих чи інших факторів, що призводять до деградації, і процесом його технічної експлуатації. Найбільш тісний взаємозв'язок між цими процесами забезпечують програми, засновані на стратегіях ТОіР за станом, коли обсяг і перелік відновлювальних робіт призначається відповідно до фактичного технічного стану об'єкта. Стратегія ТОіР з контролем параметрів передбачає безперервний або періодичний контроль і вимір параметрів, що визначають технічний стан функціональних систем і їхніх елементів. Рішення про заміну або відновлювальні роботи приймається тоді, коли значення контрольованих параметрів досягнуть певного встановленого граничного рівня.

Високовольтні кабельні мережі (ВКМ) аеродромних вогнів експлуатуються за станом з контролем граничного рівня параметрів. Сьогодні на практиці використовується тільки один контрольований параметр – опір ізоляції ВКМ відносно землі. Цей параметр для ВКМ є основним, оскільки він лежить в основі ефективності системи експлуатації ВКМ. Від його рівня залежить така

характеристика, як обсяг земляних робіт з підвищення рівня опору ізоляції ВКМ безпосередньо в зоні злітно-посадкової смуги, як наслідок, безтека і регулярність польотів, а також економічні показники діяльності аеропорту в цілому.

Постановка проблеми

Проблема полягає в розробці методики визначення мінімального значення основного діагностуючого параметра мереж аеродромних вогнів – опору ізоляції відносно землі. На теперішній час для більшості світлосигнальних систем аеропортів (ССА) України закінчується термін служби, у зв'язку з чим виникла проблема оцінки технічного стану ССА, зокрема ВКМ, для визначення можливості продовження терміну служби, тобто стала актуальною розробка методики сертифікації ССА як заходу з підвищення живучості електропостачання ССА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як показує аналіз документів ІКАО [1] і вимог фірм-виробників, під час експлуатації електрообладнання ССА основна увага приділяється контролю опору ізоляції ВКМ, але є значна розбіжність при нормуванні його мінімально припустимих значень.

Раніше заводи і фірми-виробники світлосигнального обладнання вимагали підтримувати опір ізоляції кожної ВКМ не нижче 4 МОм, але на практиці в багатьох аеропортах спостерігалася тривала нормальна робота (до трьох років) з опорами ізоляції в кілька разів нижче. Це зумовило проведення науково-дослідних робіт [2], результати яких не задовольнили потреби експлуатаційних підприємств.

На основі аналізу експертного опитування були прийняті нові нормативні документи [1; 3], згідно з якими для ВКМ напругою до 1000 В необхідне значення опору ізоляції повинно становити не менше 0,5 МОм, а для ВКМ напругою вище 1000 В – не менше 1 МОм. Причому допускаються значення опору ізоляції навіть менше

зазначених рівнів, якщо ВКМ витримала випробування протягом 1 хв, підвищеною постійною напругою, яка згідно з методикою [3] повинна становити 6 кВ для кабелів з номінальною змінною напругою 3 кВ та 10 кВ – для кабелів з номінальною змінною напругою 6 кВ.

Постановка завдання

Метою досліджень є визначення мінімального експлуатаційного значення опору мереж аеродромних вогнів з гумовою ізоляцією для електроживлення від стабілізованих джерел струму.

Визначення експлуатаційного значення діагностуючого параметра мереж аеродромних вогнів

За результатом аналізу вітчизняного і зарубіжного досвіду експлуатації електрообладнання ССА можна виділити основні причини – фактори, що призводять до деградації, тобто зносу елементів ВКМ:

- 1) механічні – це порізи ізоляції при земляних роботах і від каменів, що переміщуються в ґрунті під впливом вібрацій від повітряних суден, які рухаються по землі, а також пориви кабелю від температурних зміщень ґрунту;
- 2) фізико-хімічні – це знос ізоляції від нагрівання в місцях підвищеного перехідного опору штепсельних з'єднань, вплив озону, коронного розряду ультрафіолетових променів у разі порушення правил збереження складових елементів ВКМ, або виході окремих частин ВКМ на поверхню, вплив агресивного ґрунту або агресивної рідини (в аеропортах це рідина “Арктика”, порошки і рідини проти ожеледі злітно-посадкової смуги), пошкодження ізоляції блискавкою з наступним проникненням у неї через отвори води, а також проникнення води в ізоляцію при явищах електроосмосу;
- 3) вплив місцевої флори і фауни – деякі види трав і болотних рослин проколюють гумову ізоляцію, а комахи, пацюки і миші поїдають її;
- 4) порушення технології при ізоляції з'єднань відрізків кабелю і високовольтних виводів індивідуальних трансформаторів, а також використання кабелю з бракованою ізоляцією і штепсельними розніманнями;
- 5) електричний знос – це руйнування ізоляції при тривалому впливі напруги різного гармонійного складу і рівня.

Як показує досвід експлуатації в природних і кліматичних умовах України, перші три фактори не створюють сильно виражених аномалій, а електричний знос мізерно малий, тому що термін служби ізоляції τ при тривалому впливі на неї напруги вище деякого межового значення описується формулою [4]:

$$\tau = \frac{a}{(U - U_b)^n},$$

де a – сталий коефіцієнт; U – напруга, що прикладається до ізоляції; U_b – напруга, при якій ізоляція не втрачає своїх властивостей; n – коефіцієнт, числове значення якого для змінної напруги знаходиться в межах від чотирьох до семи.

У разі електричного зносу в ізоляції спостерігається так званий дендритний пробій, який пов'язаний із процесами старіння ізоляції в місцях з високим електричним навантаженням, з дефектами ізоляції при її виготовленні (мікротріщини, включення, що проводять електричний струм). Цей вид пробію характерний для ізоляції з малим тангенсом діелектричних утрат $\tan \delta$ (поліетилен, чиста епоксидна смола та ін.). У праці [4] “крива життя” такої ізоляції описується емпірично встановленими залежностями:

$$E^N t = \text{const};$$

$$\lg E = A - (1/N) \lg t,$$

де t – час життя ізоляції, протягом якого ізоляція витримує напругу, с; E – напруженість електричного поля, кВ/мм; $A = \text{const}$; N – показник ступеня “кривої життя”.

Розрахунки показують, що для ВКМ світло-сигнальних систем з кабелями, ізоляція яких (товщиною 6 мм) у процесі експлуатації знаходиться під напругами для самої короткої і довгої мережі ССА, відповідно 0,2 – 1,6 кВ, тобто у 4 – 30 разів нижче від номінальної для кабелю 6 кВ. Теоретична межа “кривої життя” найдовшої ВКМ з напруженістю електричного поля біля виводів джерела електроживлення – регулятора яскравості (РЯ) в номінальному режимі 0,2 кВ/мм може доходити до 45 – 55 років.

Принципових обмежень для продовження терміну експлуатації таких мереж з позицій електричного зносу немає, однак залишається невдомим термін “життя” штепсельних з'єднань ВКМ з індивідуальними трансформаторами, на яких під час монтажу виконується холодна вулканізація з відсутнім жорстким контролем якості в порівнянні з виготовленням кабелів на підприємстві.

У працях [1; 3] немає інформації про швидкість руйнування гумової ізоляції змінним електричним струмом у мережах з ізольованою нейтраллю, що живляться від джерел струму. Цей процес може періодично йти тижнями, місяцями і навіть роками завдяки специфічній схемі підключення навантаження (послідовно-розосереджено на значній території зі стабілізацією струму), коли відмова в одному місці ізоляції не призводить до відмови ВКМ у цілому. Розподілена ємність

ВКМ у такому режимі буде увімкненою в електричне коло пропалу послідовно і виконуватиме роль струмообмежувального баластового опору при пошкодженні ізоляції до сотень кілоом і навіть стабілізатора струму при опорах пошкодженої ізоляції порядку одиниць кілоом і нижче. Таке ствердження базується на розрахунках ємнісних опорів від коротких до самих довгих ВКМ 32 – 3,2 кОм. Тому була проведена серія експериментів з відібраними 20 зразками високовольтного кабелю двох різних партій.

Для експериментів була зібрана установка вихідною потужністю до 600 Вт, що дозволяє подавати на зразок кабелю регульовану змінну синусоїдальну напругу до 6 кВ частотою 50 Гц. Ізоляція зразка кабелю штучно механічно пошкоджувалася голкою з найменшими можливими розмірами, зволожувалася і пробивалася напругою 3,5 – 4 кВ. Після пробією напруга, яка подавалася на зразок, різко знижувалася, щоб зберегти найменший розмір місця пошкодження. Потім підготовлений у такий спосіб зразок умикався на різні значення синусоїдальної змінної напруги послідовно з баластовим опором із високовольтних конденсаторів, що імітують діапазон реальних розподілених ємностей для найбільш короткої і довгої ВКМ відповідно 1 і 10 км. Залежність струму пропалу від часу $I_{\text{пр}} = f(t)$ показано на рис. 1.

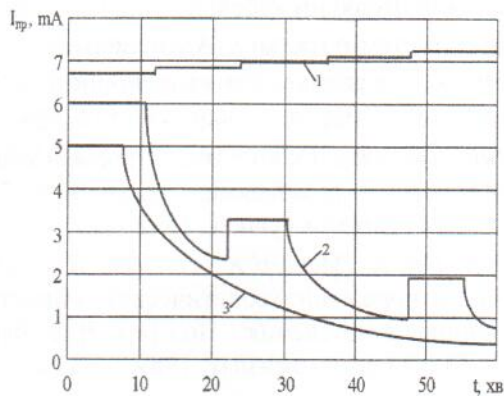


Рис. 1. Характер залежності струму пропалу $I_{\text{пр}}$ через пошкоджену ізоляцію кабелю в часі t при постійній напрузі джерела живлення від ступеня пошкодження ізоляції: 1 – пропал; 2, 3 – різний характер плавлення ізоляції

Початковий етап з виявленням специфічним ефектом триває до 1 год, але загальне безперервне напрацювання становило 190 год.

Температура навколишнього середовища в місці пропалу зразка була 15 – 20 °С – найбільш висока у кліматичних умовах України на стандартній глибині прокладки кабелю 0,6 – 0,8 м.

Як видно з графіків на рис. 1, при струмах пропалу нижче 7 мА спостерігається оголення

місця пошкодження ізоляції, тобто при незмінній вихідній напрузі установки струм падає внаслідок самодовільного збільшення опору в місці пошкодження. Це особлива властивість гумової ізоляції в електричному колі з послідовно увімкненим баластовим опором.

Під час експерименту знято вольт-амперну характеристику місця пошкодження ізоляції

$$I_{\text{пр}} = f(U_{\text{із}})$$

і характеристику втрати потужності в місці пропалу від струму пропалу (рис. 2):

$$\Delta P_{\text{пр}} = f(I_{\text{пр}}).$$

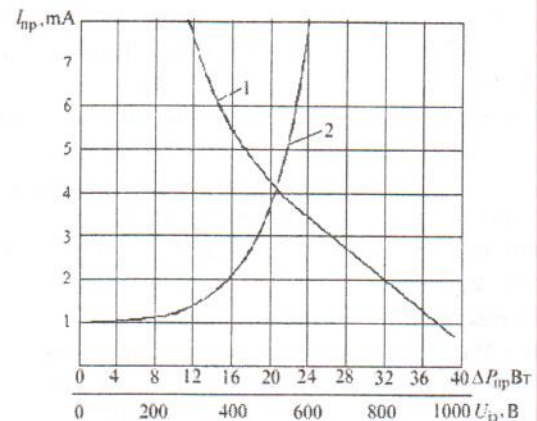


Рис. 2. Залежність струму пропалу $I_{\text{пр}}$ через пошкоджену ізоляцію кабелю від напруги $U_{\text{із}}$, прикладеної до ізоляції (1), і втрати потужності в місці пропалу $\Delta P_{\text{пр}}$ від $I_{\text{пр}}$ (2)

Втрата потужності у місці пропалу при струмі 5 мА становила 22 Вт, а через процес оголення при значенні струму 1 мА – всього 1 Вт, тобто йшов тільки процес плавлення ізоляції. Відразу після пробією при струмі 5 мА опір пошкодженої ізоляції становив 100 кОм. Після 1 год роботи при мимовільному зниженні струму від 5 до 1 мА опір підвищився до 500 кОм, а через 90 год (при відключеній напрузі) – до 3 – 4 МОм.

В усіх досліджуваних 20 зразках значення струму, при якому спостерігався процес оголення ізоляції внаслідок плавлення, було в межах $6 \pm 0,7$ мА. Розрахована ймовірність відшукування зразків зі струмом живлення менше 5 мА становила 0,0012. Тому при визначенні мінімального опору ізоляції ВКМ у процесі експлуатації за розрахункове значення струму набували 5 мА.

Визначимо мінімальне значення опору $R_{\text{мін}}$ ізоляції ВКМ, використовуючи дані проведеного експерименту:

$$R_{i\text{мін}} \geq \frac{U_{\text{P}}}{I_{\text{пр}}} = \frac{S_{\text{max P}}}{2I_{\text{P,V}} I_{\text{пр}}};$$

$$R_{i\text{мін}} = \frac{1,5S_{\text{P}}}{2 \cdot 8,3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 18S_{\text{P}},$$

де U_p – напруга на виході РЯ; $I_{пр}$ – струм пропалу ізоляції ВКМ, нижня встановлена межа якого дорівнює 5 мА; $S_{max P}$ – максимальна потужність РЯ (більша в 1,5 за S_p), кВА; I_{PV} – номінальний струм РЯ на п'ятій ступені, А; S_p – номінальна потужність РЯ, кВА.

Отже, для ВКМ аеродромних вогнів мінімальні значення ізоляції, що повинні підтримуватись у процесі експлуатації, становлять: 72, 144, 288, 576 кОм для РЯ з потужностями відповідно 4, 8, 16, 32 кВА.

Під час сертифікації мінімальне значення опору ізоляції для продовження терміну служби пропонується встановити 2 МОм для ВКМ потужністю 16 і 32 кВт і 1 МОм для ВКМ потужністю 8 і 4 кВт, виходячи з таких міркувань.

Потужність РЯ для найбільш відповідальних груп вогнів підходу і злітно-посадкової смуги, як правило, не перевищує 16 кВт. При роботі на п'ятій ступені яскравості середньоквадратичне значення вихідної змінної напруги не буде перевищувати 2 кВ, а максимальна напруга на ізоляції при справному її стані 1 кВ. Дослідження показали, що в разі зосередженого руйнування ізоляції і струмі менше 0,5 мА процес руйнування ізоляції або не відбувається зовсім, або йде настільки повільно, що буде тривати роками. Тому при опорі ізоляції

$$R_{із} = 1 \text{ кВ} / 0,5 \text{ мА} = 2 \text{ МОм}$$

руйнування її під дією електричного робочого поля не буде навіть при локальному руйнуванні в зоні найбільших напруг. Якщо таких точок локального руйнування ізоляції буде більше, чи вони будуть розташовуватися не по кінцях кабелю, то струми в них будуть істотно меншими, що гарантує безвідмовну роботу ізоляції на тривалий термін – декілька років.

В.И. Нерет, О.А. Сущенко

Методика определения основного диагностирующего параметра сетей аэродромных огней

По данным нормативных документов и на основании опыта эксплуатации проанализирован основной диагностирующий параметр – сопротивление изоляции кабельных сетей аэродромных огней относительно земли. Исследована физическая модель пробоя изоляции этих сетей. Предложена методика определения минимально допустимого значения этого параметра.

V.I. Neret, O.A. Sushenko

The research of an isolation breakdown of lights aerodrome networks

On the data of the normative documents and in-service experience parameter of diagnosing - isolation of cable networks of aerodrome lights concerning ground is analyzed. The physical model of an insulation breakdown of these networks is investigated. The technique of definition minimum acceptable values of this parameter is offered.

Для ВКМ з меншими в два і чотири рази робочими напругами при потужностях відповідно 8 і 4 кВт струми витікання в зонах пошкодження будуть у стільки ж разів меншими, що і забезпечує їх тривалу безвідмовну роботу при опорі ізоляції 1 МОм.

Отже, за нормований опір ізоляції під час продовження терміну служби можна прийняти 2 і 1 МОм у найбільш несприятливих погодних умовах при мінімальному значенні питомого опору ґрунту на території аеропорту.

Висновки

Отримані значення $R_{i\min}$ у процесі експлуатації ВКМ менші за установлені на основі експертного опитування, але без дослідження зривів кабелів інших ССА одержані результати можна вважати лише підтвердженням встановлених нормативних значень.

Список літератури

1. *Международная организация гражданской авиации. Руководство по проектированию аэродромов. Ч. 5. Электрические системы.* – Монреаль: ИКАО, 1997. – 96 с.
2. *Гусак А.А., Дворкин В.Р., Шустерман В.О. Минимальное эксплуатационное значение сопротивления изоляции кабельных колец светосигнальных систем посадки // Адаптивные системы технической эксплуатации авиационного оборудования.* – К.: КИИГА. – 1989. – С. 124–128.
3. *Методика оценки соответствия нормам годности эксплуатации гражданских аэродромов (МОС НГЭА).* – М.: Воздуш. трансп., 1992. – 145 с.
4. *Бейер Бек В., Меллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / Под ред. В.П. Ларинова.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 553 с.

Стаття надійшла до редакції 12.05.03.