



УДК 629.7

**ADVANCED POWER SUPPLY SYSTEM OF APPROACH LIGHTS AT
CIVIL AVIATION AERODROMES****УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СВІТЛОСИГНАЛЬНИХ
ВОГНІВ НАБЛИЖЕННЯ АЕРОДРОМІВ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ****Deviatkina S.S. / Дев'яткіна С.С.***s.t.s., as. professor /к.т.н., доцент*

ORCID: 0009-0001-9495-4213

Molchanova K.V. / Молчанова К.В.*s.t.s., as. professor /к.т.н., доцент*

ORCID: 0009-0003-9229-9766

Yaremich T.I. / Яремич Т.І.*s. lector /ст. викладач*

ORCID: 0009-0007-3084-9231

Siryi D.T. / Сірий Д.Т.*s.t.s., as. professor /к.т.н., доцент**National aviation university, Kyiv, Guzara, 1, 03058**Національний авіаційний університет, Київ, Л. Гузара, 1, 03058*

Анотація. Сучасні світлосигнальні системи аеродромів відносяться до класу складних топологічних систем, від яких залежить рівень безпеки польотів на етапі візуального пілотування. Аналізуються технічні вимоги міжнародних та національних нормативно-технічних документів щодо системи електропостачання підсистеми вогнів наближення з лінійними вогнями по центральному ряду. Обґрунтовується варіант удосконалення системи електропостачання вогнів наближення, який дозволить покращити співвідношення «ціна-якість» системи та отримати позитивний вплив на рівень безпеки польотів на етапі візуального пілотування.

Ключові слова: світлосигнальна система аеродрому, система електропостачання, безпека польотів, етап візуального пілотування, ризику щодо безпеки польотів.

Вступ.

Світлосигнальна система є одним з найважливіших засобів забезпечення безпеки польотів на аеродромі цивільної авіації, адже використовується на такому важливому етапі польоту, як етап візуального пілотування. Вказаний етап, який складається з руління місця стоянки до виконавчого старту, зльоту, кінцевого етапу заходу на посадку, посадки, пробігу по ЗПС та руління до місця стоянки повітряного судна (ПС) потенційно має максимальний рівень ризику щодо безпеки польотів, так як пілот безпосередньо бере участь у керуванні ПС, через що є висока ймовірність негативного впливу «людського фактору».

Сучасна світлосигнальна система аеродрому (ССА) представляє собою складну багатоелементну топологічну систему, що призначена для світлового позначення певних ділянок злітно-посадкової смуги (ЗПС) (бічні межі, торці, осьова лінія), підходів до неї (зони наближення) та руліжних доріжок на льотному полі аеродрому.

Вночі та вдень у складних метеорологічних умовах ССА є єдиним джерелом візуальної інформації для пілота ПС під час етапу візуального пілотування, отже, від повноти обсягу та достовірності інформації, що надається ССА, залежить рівень безпеки польотів ПС (за умови, що ергатична система „екіпаж – ПС”



функціонує правильно).

До складу ССА входить більше тисячі різних елементів – аеродромних вогнів, ізолювальних трансформаторів (ІТ), відрізків з'єднувального кабелю, регуляторів яскравості, тощо, а її мінімальна вартість в залежності від розмірів та оснащення аеродрому може становити сотні тисяч євро. Технічні вимоги до ССА містяться в міжнародних стандартах ІСАО (International Civil Aviation Organization), [1,2,3] та в національних нормативно-технічних документах [4].

У певних функціональних підсистемах ССА використовуються аеродромні вогні лінійного типу. Наприклад, для підсистеми вогнів наближення, стандартними є дві конфігурації – вогні наближення з кодуванням відстані по центральному ряду та п'ятьма світловими горизонтами і вогні наближення з лінійними вогнями по центральному ряду та одним або двома світловими горизонтами, в залежності від категорії заходу на посадку, (рис.1). В складі лінійного вогню центрального ряду підсистеми вогнів наближення може бути чотири або п'ять одиночних вогнів

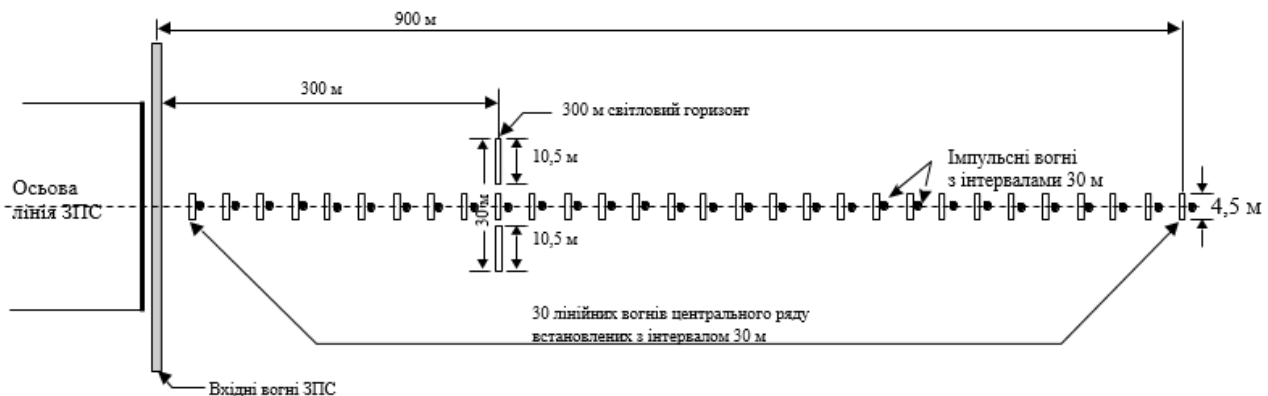


Рисунок 1 - Підсистема вогнів наближення з лінійними вогнями по центральному ряду та одним світловим горизонтом

Лінійним аеродромним вогнем (ЛЛВ) називається сукупність світлових приладів, що складається з трьох і більш одиночних аеродромних вогнів (АВ), розташованих на одній лінії з таким інтервалом між одиночними вогнями, щоб пілот ПС спостерігав їх у вигляді світлової смуги. Лінійні вогні можуть використовуватися у підсистемах вогнів наближення центрального ряду («четвірки» або «п'ятірки»), у складі бічних вогнів наближення та вогнів зони приземлення («трійки»).

Електропостачання одиночних та лінійних вогнів підсистем ССА великих аеродромів здійснюється за послідовною схемою через ІТ від регуляторів яскравості не менш ніж по двох окремих кабельних лініях, що регламентується в міжнародних та національних нормативних документах [1,3,4].

Вимогами стандартів [1,4] нормується мінімальна ширина лінійного вогню наближення центрального ряду на рівні 4,0 м та максимальний поперечний інтервал між одиночними вогнями на рівні 1,5 м. Таким чином, мінімальна кількість одиночних вогнів в лінійному вогню наближення центрального ряду складає чотири штуки, проте, також, можливе встановлення п'яти одиночних вогнів у кожному лінійному вогні.



Постановка проблеми.

В національних та міжнародних нормативних документах [1-4] до конфігурації підсистеми вогнів наближення та структури її електропостачання ставляться лише загальні вимоги щодо кількості кабельних ліній системи електропостачання (не менше двох) та типу конфігурації – місць розташування вогнів. Більш детальне проектування структури підсистеми та її системи електропостачання потребує аналізу співвідношення «ціна/якість» та наукового підходу для обґрунтування оптимального проектного рішення. Під «якістю» системи в даному випадку розуміється рівень її надійності, так як він має безпосередній вплив на рівень безпеки польотів ПС на кінцевому етапі заходу на посадку.

Метою роботи є обґрунтування структури електропостачання підсистеми вогнів наближення ССА I, II категорій, яка, з одного боку, відповідає національним та міжнародним вимогам, а з іншого боку, має додаткові переваги у виді підвищеного рівня показників надійності, а отже і зниження ризиків щодо безпеки польотів у випадках різних типів відмов підсистеми вогнів наближення.

Виклад основного матеріалу.

Стандарти ІСАО, документ [3], наводять приклади різних варіантів електропостачання підсистеми вогнів наближення, яка для конфігурації з лінійними вогнями має наступний вигляд (рис. 2). В даному прикладі в складі лінійного вогню показані чотири одиночних вогні, що є цілком припустимим і не знижує надійність системи.

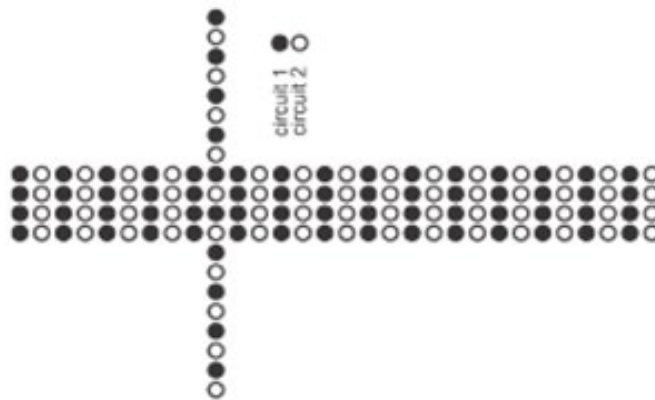


Рисунок 2 - Приклад підключення одиночних аеродромних вогнів у дві кабельні лінії для конфігурації підсистеми вогнів наближення з лінійними вогнями і одним світловим горизонтом

На практиці часто замість чотирьох одиночних вогнів проектують п'ять вогнів в кожному лінійному вогні. З одного боку це збільшує кількість вогнів у підсистемі, а отже і первинну вартість обладнання та його подальшого обслуговування. З іншого боку, перевагами встановлення «п'ятірок» є можливість виділення продовження осьової лінії ЗПС, дещо більш висока надійність лінійного вогню та можливість реалізації певної конфігурації системи електропостачання, яка має суттєві переваги перед тою, що наведена на рис. 2.

Збільшення надійності лінійної «п'ятірки» порівняно з «четвіркою» можна детально не розглядати, так як теоретичні розрахунки показників надійності



лінійних вогнів та аналіз їх досвіду експлуатації демонструють високу надійність лінійного вогню, в складі якого чотири і більше одиночних вогнів. Тобто, за час між двома технічними обслуговуваннями ССА (як правило, 12 годин) як правило ніколи не постерігається відмова двох і більше вогнів у складі одного лінійного вогню. В разі використання одиночних світлодіодних вогнів у складі лінійного, які мають на кілька порядків вищій середній час напрацювання на відмову джерел світла, ймовірність безвідмовної роботи лінійного аеродромного вогню наближення за 12 годин можна вважати такою, що дорівнює одиниці.

На рис.2 показано, що система електропостачання має складатися не менш ніж з двох кабельних ліній, доцільність яких напряму пов'язана з підвищенням надійності системи. Однак, відповідно до вимог тих самих нормативних документів [1, п.10.5.7 – 10.5.12] відмову однієї кабельної лінії слід розглядати, як відмову підсистеми, бо в цьому випадку 50% і більше аеродромних вогнів перейдуть до непрацездатного стану, що вважається неприпустимим.

Отже, з точки зору надійності, дві (або навіть три) кабельні лінії не резервують одна одну, а навпаки, теоретично знижують надійність всієї системи електропостачання. На практиці це зниження не дуже відчувається через високі показники надійності елементів системи електропостачання ССА, але з часом обладнання зношується, і його надійність знижується.

Цього парадоксу можна уникнути якщо спроектувати систему електропостачання вогнів наближення, яка складається з двох кабельних ліній наступним способом (рис.3).

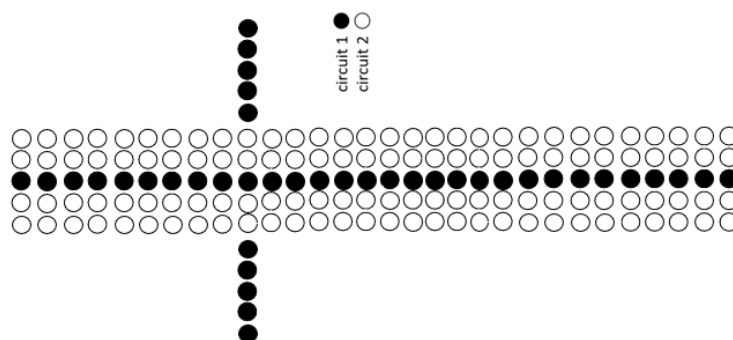


Рисунок 3 - Приклад удосконаленої системи електропостачання для конфігурації підсистеми вогнів наближення з лінійними вогнями по центральному ряду і одним світловим горизонтом

При такому підключенні добре видно продовження вісі ЗПС, яку позначає третій аеродромний вогонь у кожному лінійному вогні (чого немає, якщо лінійний вогонь складається з чотирьох одиночних вогнів). Крім того, така конфігурація системи електропостачання дозволяє у простих метеорологічних умовах включати тільки одну кабельну лінію, яка буде формувати, так звану «просту систему вогнів наближення», що цілком відповідає вимогам стандартів ІСАО (1, п. 5.3.4.1). В разі відмови другої кабельної лінії може використовуватися працездатна кабельна лінія простої схеми вогнів наближення, що має стандартну конфігурацію для простих метеоумов.

Також, можна здійснити електропостачання чотирьох одиночних аеродромних вогнів від одного ІТ, що допускається стандартами ІСАО [3] та



дозволить дещо знизити вартість системи (рис. 4).

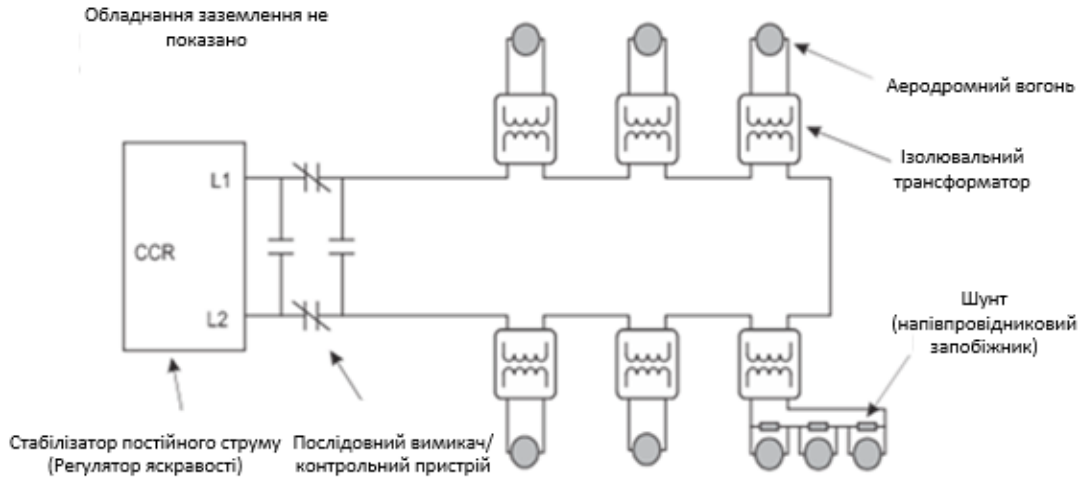


Рисунок 4 - Послідовна схема електропостачання аеродромних вогнів в кабельній лінії з індивідуальним та груповим підключенням вогнів до ІТ

Групове електропостачання чотирьох аеродромних вогнів від одного ІТ практично реалізувати можливо і не матиме негативного впливу на надійність системи, адже сучасні ІТ є високо надійними елементами (Табл.1).

Стандартна схема електропостачання лінійного вогню „4-4” містить чотири ІТ, що забезпечують електричною енергією чотири одиночні вогні (рис. 5, а). Пропонована Модернізована схема електропостачання „1-4” містить один ІТ, що забезпечує електричною енергією чотири одиночні вогні в лінійному (рис. 5, б).

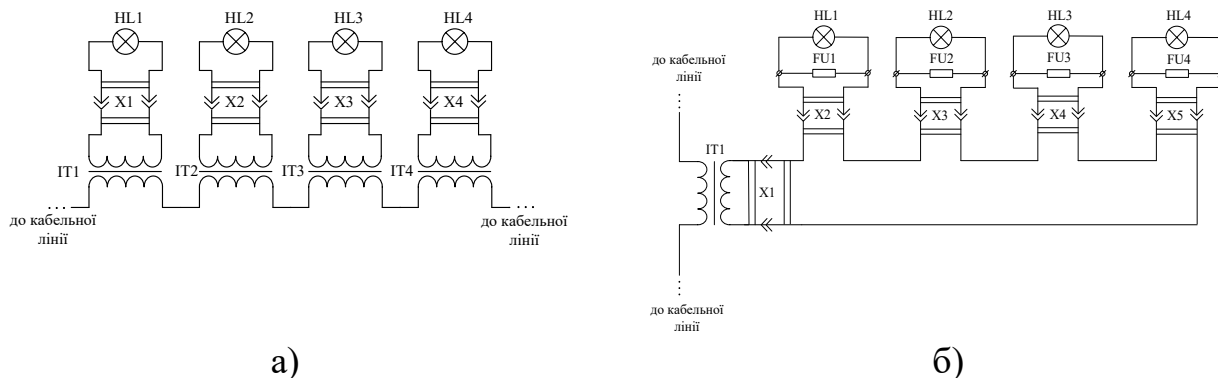


Рисунок 5 - Принципова електрична схема лінійного вогню:
а) зі стандартною схемою електропостачання б) з модернізованою схемою електропостачання

При електропостачанні лінійного вогню за схемою „1-4” паралельно кожній лампі підключається спеціальний пристрій – напівпровідниковий запобіжник (НЗ, «by pass», «cut out»), багатократної дії, що запобігає обриву ланцюгу з послідовно з’єднаних ламп у випадку відмови одної або кількох з них. При відмові кожної з ламп, внутрішній опір НЗ зменшується практично до нуля і не впливає на режим роботи працездатних ламп. При заміні лампи, що відмовила, НЗ автоматично відключається і не впливає на роботу всієї групи вогнів.



Критеріями доцільності використання групового електропостачання лінійного вогню логічно вибрати критерії надійності та економічності. Розрахуємо показники надійності – імовірність безвідмовної роботи лінійного вогню за час між двома плановими технічними обслуговуванням ($t=12$ год) – одного лінійного вогню для варіантів індивідуального та групового електропостачання (рис. 5а та 5б). В якості вихідних даних для визначення надійності виберемо відомі значення показників безвідмовності – середній час наробітку до відмови (T_0) джерел світла (металогалогенних), ІТ та НЗ.

Лінійний аеродромний вогонь підсистеми вогнів наближення з позицій надійності представляє собою систему, що складається з чотирьох однотипних елементів, які працюють в режимі навантаженого резервування. Імовірність безвідмовної роботи лінійного вогню $P_{\text{ЛВ}}(t)$, розраховується за формулою бінома Ньютона:

$$P(t) = \sum_{i=0}^K C_N^i \cdot p(t)^{N-i} \cdot q(t)^i \quad (1)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи лінійного аеродромного вогню за час t ; N – загальна кількість одиночних вогнів у складі лінійного; K – максимальна кількість аеродромних вогнів, що відмовили, при якій ще зберігається працездатний стан лінійного вогню; $p(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи одиночного аеродромного вогню за час t ; $q(t)$ – ймовірність відмови одиночного аеродромного вогню за час t .

Для лінійних „четвірок” цей показник визначається формулою (2):

$$P(t)_{\text{„4”}} = \sum_{i=0}^1 C_4^i \cdot p(t)^{4-i} \cdot q(t)^i = p(t)^4 + 4 \cdot p(t)^3 \cdot q(t) \quad (2)$$

Імовірність безвідмовної роботи одиночного вогню $P_{\text{АВ}}(t)$ за час t знаходиться за виразом (3):

$$p(t) = e^{-\frac{t}{T_0}} = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (3)$$

$$q(t) = 1 - p(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

Вихідні дані для визначення показників надійності лінійних вогнів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Вихідні дані для розрахунку надійності ЛАВ

Назва елемента	Інтенсивність відмов λ , 1/год
Джерело світла аеродромного вогню	10^{-3}
Ізолювальний трансформатор	10^{-5}
Напівпровідниковий запобіжник	10^{-6}

Розглянемо лінійний вогонь зі стандартною схемою електропостачання одиночних вогнів від власних ІТ (рис.5, а). Відмова одиночного вогню настає у випадку відмови або будь-якого джерела світла або ІТ. Оскільки надійність оптичної системи на кілька порядків перевершує надійність джерела світла, у даному розрахунку нею можна знехтувати.

Джерело світла та ІТ з'єднані логічно послідовно, отже, інтенсивність відмов Λ_1 одиночного АВ, що входить до складу лінійного вогню, знаходиться:

$$\Lambda_1 = \lambda_{\text{ДС}} + \lambda_{\text{ІТ}},$$



де $\lambda_{ДС}$, $\lambda_{ІТ}$ – інтенсивності відмов джерела світла одиночного вогню та ІТ відповідно.

Тоді імовірність безвідмовної роботи за час t одиночного вогню, що входить до складу лінійного вогню, знаходиться по формулі (3), причому $\lambda = \Lambda_1$. За час $t = 12$ год. відповідно до формули (2) імовірність безвідмовної роботи лінійного вогню зі стандартною схемою електропостачання „4-4” складає

$$P_{ЛВ 4}(t) = 0,99914$$

Далі розглянемо лінійний вогонь з груповим електропостачанням від одного ІТ (рис.5, б). Для такого лінійного вогню відмова ІТ приведе до відмови лінійного вогню в цілому. Напівпровідникові запобіжники, включені паралельно джерелам світла одиночних вогнів, можуть мати відмови двох типів: «коротке замикання (КЗ)» і «обрив ланцюга (ОЛ)». Відмова НЗ типу «КЗ» приводить до відмови тільки одиночного вогню, відмова типу «ОЛ» приводить до відмови усього лінійного вогню у випадку відмови джерела світла, паралельно якому включений НЗ. Вважаючи обидва типи відмов рівно ймовірними, інтенсивність відмов НЗ – $\lambda_{НЗ}$ можна записати як

$$\lambda_{НЗ} = \lambda_{КЗ} + \lambda_{ОЛ}$$

де $\lambda_{КЗ}$, $\lambda_{ОЛ}$ – інтенсивності відмов НЗ типу «КЗ» і «ОЛ» відповідно.

Тоді інтенсивність відмов одиночного вогню $\Lambda_{1М}$, що входить до складу лінійного вогню з груповим електропостачанням можна записати як

$$\Lambda_{1М} = \lambda_{ДС} + 0,5 \cdot \lambda_{НЗ}$$

Імовірність безвідмовної роботи модернізованого лінійного вогню $P_{ЛВ 4 М}(t)$ визначається, також, по формулі бінома Ньютона (1) (при цьому у виразі (3), $\lambda = \Lambda_{1М}$). Однак з огляду на те, що працездатний стан лінійного вогню зберігається за умови працездатного стану ІТ, у остаточній формулі враховується імовірність безвідмовної роботи за час t ізолювального трансформатора та ймовірність відсутності відмови НЗ типу «ОЛ»:

$$P_{ЛВ 4 М}(t) = P_{ЛВ 4}(t) \cdot P_{ІТ}(t) \cdot P_{НЗ ОЛ}(t)^4 = P_{ЛВ 4}(t) \cdot e^{-(\lambda_{ІТ} + 2 \cdot \lambda_{НЗ}) \cdot t} \quad (4)$$

де $P_{ІТ}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи ІТ за 12 годин; $P_{НЗ ОЛ}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи НЗ з урахуванням його відмови типу «ОЛ».

За час $t = 12$ год. відповідно до формули (4), імовірність безвідмовної роботи лінійного вогню „четвірки” з модернізованою схемою електропостачання складає

$$P_{ЛВ 4 М}(t) = 0,99902$$

Визначимо виграш у надійності ЛВВ зі стандартною схемою електропостачання в порівнянні з модернізованою схемою електропостачання для вогню „четвірки” лінійного типу:

$$\frac{P_{ЛВ 4}(t) - P_{ЛВ 4 М}(t)}{P_{ЛВ 4}(t)} \cdot 100\% = 0,012\% \quad (5)$$

Як видно з формули (5) виграш у надійності складає усього 0,012%, що можна вважати, як незначний, тоді як вартість одного лінійного вогню значно зростає через більшу кількість ІТ. Таким чином, за рахунок використання варіанту групового електропостачання лінійного вогню від одного ІТ буде досягнуто зниження витрат на придбання та експлуатацію аеродромного



світлосигнального обладнання підсистем, де використовуються лінійні вогні, адже знизиться кількість ІТ без суттєвого впливу на рівень надійності системи.

Висновки.

Проведений аналіз нормативно-технічних документів стосовно схеми електропостачання підсистеми вогнів наближення з вогнями лінійного типу дозволив зробити висновок про те, що в них наводяться загальні вимоги, виконання яких може бути досягнуто різними варіантами проектних рішень.

Певний варіант проектного рішення, а саме: вибір одної з двох стандартних конфігурацій підсистеми вогнів наближення (з лінійними вогнями по центральному ряду чи з кодуванням відстані – стандартна або спрощена), кількість вогнів у лінійних вогнях центрального ряду (п'ять чи чотири), конфігурація системи електропостачання (різні варіанти включення вогнів у кабельні лінії), кількість кабельних ліній, доцільність групового електропостачання лінійних вогнів від одного ІТ тощо, потребує наукового підходу та додаткового обґрунтування в залежності від індивідуальних особливостей аеродрому.

Використання п'яти одиночних аеродромних вогнів замість чотирьох в складі лінійного вогню центрального ряду підсистеми вогнів наближення з першого погляду підвищує вартість системи, але більш детальний аналіз демонструє ряд важливих переваг, які позитивно впливають на співвідношення «ціна-якість» системи, і як наслідок, на рівень безпеки польотів ПС на етапі візуального пілотування.

Література:

1. Annex 14 to the Convention of International Civil Aviation. Aerodromes. Volume I. Aerodrome Design and Operations. ICAO International Standards and Recommended Practices, 9th edition, 2022, ISBN 978-92-9265-735-2.
2. Doc 9157. Aerodrome Design Manual. Part 4. Visual Aids. ICAO International Standards and Recommended Practice, 5th edition, 2020.
3. Doc 9157. Aerodrome Design Manual. Part 5. Electrical systems. ICAO International Standards and Recommended Practice, 2nd edition, 2017.
4. Наказ Державної авіаційної служби України №1841 від 24.11.2021 р. Про затвердження сертифікаційних вимог до аеродромів.

***Abstract.** Modern airfield light systems belong to the class of complex topological systems, which have the direct influence on flight safety level at the of visual piloting stage. The general technical requirements of international and national standards regarding the power supply system of the aerodrome approach lights with barrettes are analyzed. The option of improving the power supply system of the approach lights is substantiated, which will improve the "price-quality" ratio of the system and have a positive impact on the level of flight safety at the visual piloting stage.*

***Key words:** airfield lighting system, power supply, flight safety, visual piloting stage, flight safety risks.*

Стаття відправлена: 30.07.2024р.

© Дев'яткіна С.С., Молчанова К.В., Яремич Т.І., Сірий Д.Т.