

УДК 519.863:621.315.2(045)

В. М. Синеглазов, А. В. Мельнич

ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ

Задача знаходження оптимальної схеми прокладання ліній зв'язку повітряного корабля (ПК) представлена у вигляді багатокритеріальної. З урахуванням особливостей поставленого завдання сформульовані та визначені часткові критерії оптимальності. Рішення пропонується виконувати на математичній моделі розгортки ПК, у вигляді якої використовується нагружений граф, вага ребер якого визначається з урахуванням глобального критерію оптимальності. Його пропонується утворювати шляхом формального об'єднання часткових критеріїв у нормований аддитивний критерій оптимальності. В зв'язку з цим обосновано вибір нормуючих дільників. Для обраної множини критеріїв оптимальності та з урахуванням певних визначених вагових коефіцієнтів сформульовано узагальнений критерій оптимальності.

Надійність роботи електронних систем і пристроїв ПК є однією з основних в безпеки польотів.

На сучасних літальних апаратах широко використовується напівпровідни електронна техніка, яка працює на малих рівнях потужності, а отже, вразлива навіть малопотужних сигналів, що наводяться в її лініях різноманітними джерелами завад. Одним із слабких місць на борту ПК з точки зору захищеності від зовнішніх електромагнітних завад є провідні лінії зв'язку (ЛЗ).

Підвищення завадозахищеності електронної апаратури та ЛЗ можна здійснити шляхом збільшення захищаючої здатності екранів. Проте коштує таке підвищення досить дорого завжди дає ефект і головне – не завжди його можна здійснити. Тому пропонується використовувати інший шлях підвищення завадозахищеності електронної апаратури і розміщення їх у середині ПК таким чином, щоб вплив зовнішніх електромагнітних завад був мінімальним.

Крім того, оптимальне розміщення ЛЗ на ПК повинно забезпечувати мінімальну довжину, а отже, вартості та маси ЛЗ.

Таким чином, розміщення ЛЗ на ПК визначають такі чинники:

- електромагнітні наведення, обумовлені наявністю як зовнішніх (попадання в розряд електричної блискавки), так і внутрішніх впливів (наявність електромагнітної взаємодії між різними ЛЗ);
- надійність та економічність, що пов'язані з необхідністю скорочування довжин їхньої маси та вартості.

Область можливого розміщення ЛЗ обмежена конструктивними умовами.

Отже, задача оптимального прокладання ЛЗ на ПК є багатокритеріальною. Вирішення вимагає розрахунку наведень у кожній внутрішній точці ПК, що є допустимим для прокладання ЛЗ. Облік електромагнітних наводок, обумовлених можливим попаданням блискавки в ПК, є складним і вимагає значних експериментальних робіт. Тому доцільно опрацювання математичних моделей, які описують вищевказані явища, та формування їхньої основи часткових критеріїв оптимальності для прокладання ЛЗ.

Схематично ПК можна представити у вигляді тіла, що складається з набору циліндрів і нусів, по поверхні якого проходить електричний розряд блискавки. Різноманітні варіанти проходження електричного розряду блискавки були одержані в процесі експериментальних досліджень. Треба врахувати, що в авіабудуванні широко використовуються композиційні матеріали, тому додатково до основного каналу протікання електричного струму по обшивці треба враховувати струми розтікання, математична модель яких має вигляд:

$$\frac{\partial^2 j_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 j_r}{\partial r^2} - \frac{j_r}{r^2} + \frac{r_r}{r_z} \frac{\partial^2 j_r}{\partial z^2} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 j_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 j_r}{\partial r^2} + \frac{r_r}{r_z} \frac{\partial^2 j_z}{\partial z^2} = 0,$$

де j_r, j_z – відповідні густини струму; r – відстань від осі симетрії до обраної точки з координатами (r, z) ; r_r, r_z – відповідно поперечний та поздовжній питомі опори.

Сумарна густина струму визначається із співвідношення $j = \sqrt{j_r^2 + j_z^2}$.

Враховуючи, що

$$j_r = G_r E_r, \quad j_z = G_z E_z, \quad (1)$$

де G_z, G_r – поперечна та поздовжня питомі провідності; E_z, E_r – поперечна та поздовжня компоненти поля,

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_z^2}. \quad (2)$$

Враховуючи формули (1) і (2), можемо записати вираз для загальної ЕДС, що виникає внаслідок проходження струмів розтікання по обшивці ПК,

$$E = \sqrt{\left(\frac{j_r}{G_r}\right)^2 + \left(\frac{j_z}{G_z}\right)^2}.$$

Визначення взаємного електромагнітного впливу при наявності довільної кількості (n) взаємовпливаючих ланцюгів приводиться до інтегрування системи телеграфних рівнянь [3]:

$$\frac{d\dot{U}_i}{dx} + \sum_{k=1}^n \dot{I}_k Z_{ki} = 0;$$

$$\frac{d\dot{I}_i}{dx} + \dot{U}_i Y_{ii} = \sum_{k=1}^n \left(\dot{U}_k - \dot{U}_i \right) Y_{ki},$$

де \dot{U}_i, \dot{I}_i – напруга та струм, що наводяться в i -й ЛЗ; $Z_{ik} = R_{ik} + j\omega L_{ik}$ – опір магнітного зв'язку; $Y_{ik} = G_{ik} + j\omega C_{ik}$ – провідність електричного зв'язку.

На підставі поданих моделей можна сформулювати такі часткові критерії оптимальності:

- оскільки потужність, яка наводиться в лінії, пропорційна квадрату ЕДС, то критерій, враховуючий електромагнітні наведення, що виникають у ЛЗ внаслідок впливу блискавки, має вигляд:

$$J_1 = \int_t E_{ind}^2(\tau, x, y, z) d\tau, \quad x, y, z \in \Omega, \quad (4)$$

де t – час впливу імпульсу струму блискавки; x, y, z – вектор координат просторового розміщення ЛЗ; Ω – область, дозволена для розміщення ЛЗ;

• критерій, який враховує електромагнітний вплив силових ЛЗ на інформаційні, тако залежить від потужності, що наводиться,

$$J_2 = U_i I_i(x, y, z), \quad x, y, z \in \Omega, \quad (4)$$

де $U_i I_i$ – напруга та струм, що наводяться в i -й ЛЗ;

• критерій сумарної маси ЛЗ

$$J_3 = m_k l_k(x, y, z), \quad k = \overline{1, K}, \quad x, y, z \in \Omega, \quad (5)$$

де m_k – маса 1 м погонного проводу k -ї ЛЗ; l_k – довжина проводу k -ї ЛЗ; K – загальна кількість ЛЗ;

• критерій сумарної вартості запишемо аналогічно:

$$J_4 = p_k l_k(x, y, z), \quad k = \overline{1, K}; \quad x, y, z \in \Omega, \quad (6)$$

де p_k – ціна 1 м погонного проводу k -ї ЛЗ.

Таким чином, ця задача відноситься до задач багатокритеріальної оптимізації (БО). Рішення будь-якого завдання БО тісно пов'язане з такими основними проблемами, які є специфічними для завдань даного класу [1]: визначення області компромісів чи рішень оптимальних за Парето; вибір принципу оптимальності; нормалізація всієї множини критеріїв якості; проблема завдання пріоритету (ступеня важливості) для всієї множини критеріїв якості.

Завдання векторної оптимізації зведемо до скалярного синтезу, коли часткові критерії J_i тим чи іншим чином об'єднуються в складовий критерій J , який після цього мінімізується.

У вигляді глобального критерію оптимальності можна використовувати мультиплікативний узагальнений критерій $J = \prod_{i=1}^m J_i$. Він не вимагає нормування часткових критеріїв, але має ваду: компенсує надмірне значення одного часткового критерію недостатнім значенням іншого, що в даному випадку є неприпустим. Тому глобальний критерій будемо утворювати шляхом формального об'єднання часткових критеріїв у нормований аддитивний критерій оптимальності:

$$J = \sum_{i=1}^m \gamma_i \left(\frac{J_i}{J_{ni}} \right), \quad \gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_m) \in \Gamma^+ = \left\{ \gamma_i > 0, \sum_{i=1}^m \gamma_i = 0 \right\},$$

де m – число часткових критеріїв; γ_i – i -й ваговий коефіцієнт; J_i – i -й частковий критерій; J_{ni} – i -й нормуючий дільник.

Визначення вагових коефіцієнтів є складною задачею і, як правило, призводить до експертної оцінки. Для спрощення праці експертів пропонується проводити тільки ранжування критеріїв за важливістю. Далі ранги перекладаються у вагові коефіцієнти за формулами: $\gamma_i = i \cdot 2^i$ чи $\gamma_i = 1 - \frac{i-1}{m}$.

У даному випадку вибір нормуючих дільників пов'язаний з такими особливостями:

- загальна маса чи вартість усіх ЛЗ мало залежить від довжини проводів з малою питомою вартістю чи масою, таким чином, нормуючі дільники для критеріїв маси та вартості повинні обиратися так, щоб значення відповідних критеріїв становились значними тільки для проводів з великими значеннями питомої вартості чи маси (критерії залежать від максимальних значень питомої вартості чи маси);
- значення максимально допустимих потужностей, які наводяться в кожній ЛЗ, залежать від значення порога чутливості конкретних приладів у ЛЗ і у загальному випадку можуть бути різними, тому значення відповідних нормуючих дільників для критеріїв наводок від блискавки та від близьких ЛЗ обираються відповідно до максимально допустимих наводок для кожної ЛЗ окремо.

Внаслідок цього задача знаходження варіанта оптимального прокладання ЛЗ зводиться до мінімізації аддитивного критерію оптимальності за вектором x, y, z : $(x, y, z)^* = \arg \min_{x, y, z \in \Omega} J$,

$$J = \sum_{i=1}^4 \gamma_i \sum_{k=1}^K \frac{J_{nik}}{J_{nik}}; \quad (7)$$

J_{nik} – нормуючий дільник i -го часткового критерію для k -ї ЛЗ.

Згідно з умовою прокладання проводів, провід можна розташувати тільки паралельно стрингера або шпангоута, змінювати напрямок провід може тільки під прямим кутом. Таким чином, замість гладкого шляху на розгортці можна знаходити послідовність перетину стрингерів зі шпангоутами, крізь які пройде шлях проводу, і після цього врахувати в цьому шляху зміщення кожної точки шляху від відповідних перетинів.

Якщо точки перетину стрингерів зі шпангоутами пронумерувати так, щоб кожен перетин мав свій номер, то у вигляді шляху між двома точками розгортки ПК можна приймати послідовність номерів точок на розгортці, в якій перший номер відповідає першій точці шляху, а останній – останній. При цьому кожна точка на розгортці визначається номером точки, в якій перетинаються стрингер і шпангоут, відповідні цій точці, та зміщеннями точки від відповідних стрингера та шпангоута.

Якщо як математичну модель розгортки ПК прийняти навантажений граф, вага ребер якого визначається значенням загального критерію оптимальності на ділянці між двома точками розгортки, що відповідають вершинам графа з такими ж номерами, то оптимальний шлях проводу будемо шукати як послідовність дуг графа, який відповідає розгортці ПК, по якій будуть проходити проводи. При цьому із всіх можливих слід обирати такий шлях, який мінімізує суму вагів дуг графа, що входять до шляху.

У такому випадку вираз для обчислення довжини дуги графа ПК між i -ю та j -ю точками графа згідно з формулами (3), (4), (5), (6), (7) має такий вигляд:

$$J = \gamma_1 \sum_{k=1}^K \frac{\int E_{ind}^2(\tau, x, y, z) d\tau}{E_{dk}^2} + \gamma_2 \sum_{k=1}^K \frac{U_i I_i(x, y, z)}{P_{dk}} + \gamma_3 \frac{\sum_{k=1}^K m_k l_k(x, y, z)}{ml_{max}} + \gamma_4 \frac{\sum_{k=1}^K p_k l_k(x, y, z)}{pl_{max}},$$

$E_{dk}, P_{dk}, ml_{max}, pl_{max}$ – нормуючі дільники; E_{dk} – допустиме значення ЕДС, що зводиться у k -ї ЛЗ; P_{dk} – допустиме значення наведень потужності від блискавки у k -ї ЛЗ;

$ml_{max} = m_{max} l_{max}$, $m_{max} = \max\{m_k, k = \overline{1, K}\}$; $pl_{max} = p_{max} l_{max}$, $p_{max} = \max\{p_k, k = \overline{1, K}\}$;

$l_{\max} = \max \{d_{ij}, i, j = \overline{1, n}\}$ – максимальна з відстаней d_{ij} між точками розгортки, що відповідають двом (i -й та j -й) вершинам графа, інцидентним спільній дузі; n – кількість вершин графа розгортки ПК.

Після побудови матриці довжин дуг графа відповідного ПК знаходження оптимального шляху між його вершинами проводиться за допомогою алгоритму знаходження мінімального шляху в нагруженому орграфі Л.Р. Форда, Р.Е. Беллмана [2], [3].

Використання запропонованого підходу дозволило автоматизувати процес проектування схем прокладання ЛЗ на ПК. При цьому зменшується час і вартість проектування. Крім того, одержаний варіант схеми прокладання ЛЗ на ПК є найкращим щодо мінімальної вартості, маси та заводсприйнятливості ЛЗ.

Список літератури

1. Емельянов С.В., Борисов В.И., Малевич А.А., Черкашин А.М. Модели и методы векторной оптимизации// Техническая кибернетика (Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР). –1973. – 35 с.
2. Нефедов В.Н. Алгоритмический подход к решению задач теории графов и сетей: Учеб. пособие.–М.: МАИ, 1990. – 83 с.
3. Михайлов М.И. и др. Электромагнитные влияния на сооружения связи. - М.: Связь, 1979. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 15 травня 1998 року.

Віктор Михайлович Синеглазов (1950) закінчив у 1973 році Київський політехнічний інститут зі спеціальності "Автоматика та телемеханіка". Доктор технічних наук, професор Київського міжнародного університету цивільної авіації, заступник завідуючого кафедрою "Автоматизовані системи керування та пілотажно-навігаційні комплекси". Має 230 наукових публікацій в галузі автоматизованих систем керування і обробки інформації.

Victor M. Sineglazov (b. 1950) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1973). DSc (Eng) professor of Automation Control Systems and Pilotage-and-Navigational Complexes Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Autor of 230 publications in the fields of automation control system and computer processing.

Андрій Володимирович Мельниченко (1972) закінчив у 1996 році Київський міжнародний університет цивільної авіації зі спеціальності "Автоматизація проектування, випробування та виробництва авіаційного обладнання". Аспірант Київського міжнародного університету цивільної авіації.

Andryi V. Melnitchenko (b 1950) graduated from Kyiv International University of Civil Aviation (1996) in speciality "Automation of projecting, testing and production of aviation equipment". Aspirant of Kyiv International University of Civil Aviation.