УДК 629.735.01:629.735.45(045)

Ле Тхе Шон. Л.В. Пономаренко

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

Рассмотрено решение задачи автоматизированного проектирования несущего винта вертолета на основе использования условий возникновения изгибно-крутильного флаттера несущего винта.

Важнейшим фактором ускорения научно-технического прогресса в вертолётостроении являются повышение качества и сокращение сроков проектно-конструкторских разработок перспективных машин. Системы автоматизации проектирования дают возможность значительно сократить трудоёмкость и сроки предварительного проектирования, организовать четкий обмен информацией, взаимосвязь различных подпрограмм и существенно расширить диапазон исследуемых решений.

Одной из главных составных частей системы автоматизации проектирования является автоматизированная система предварительного формирования облика летательных аппаратов, позволяющая осуществлять обмен входной и выходной информации различным блокам при параллельной их работе. Это обеспечивает практически одновременный расчет всех основных характеристик летательного аппарата.

Вертолёт представляет собой сложную для изучения аэромеханическую систему, а его несущий винт считается наиболее напряженным агрегатом современного машиностроения. Одной из актуальных проблем в теории несущего винта является проблема оптимизации параметров лопасти с целью обеспечения необходимых запасов устойчивости от самовозбуждающихся колебаний, т.е. флаттера.

Математическая модель изгибно-крутильного флаттера имеет вид:

$$\begin{gathered}
m\ddot{y} + [EIy'']'' - [Ny'] + \tfrac{1}{2} c_y^\alpha \rho b \chi \left[U^2 y_0 + \left(\frac{3}{4} b - x_0\right) U y_0 \right]' + m\sigma\chi\ddot{y}_0' - \\
- m\sigma\ddot{\vartheta} - \tfrac{1}{2} c_y^\alpha \rho b \left[U^2 \vartheta + \left(\frac{3}{4} b - x_0\right) U\dot{\vartheta} - U\dot{y} \right] = 0; \\
I_m\ddot{\vartheta} - [GT\vartheta']' + \frac{\pi}{16}\rho b^3 U\dot{\vartheta} + \tfrac{1}{2} c_y^\alpha \rho b \sigma_\phi \left[U^2\vartheta + \left(\frac{3}{4} b - x_0\right) U\dot{\vartheta} - U\dot{y} \right] - \\
- \omega^2 m\sigma r y' + \omega^2 I_m \vartheta - m\sigma\ddot{y} - I_m \chi \ddot{y}_0' - \omega^2 I_m \chi y_0' - \\
- \frac{\pi}{16}\rho b^3 U\chi\dot{y}_0' - \tfrac{1}{2} c_y^\alpha \rho b \chi \sigma_\phi \left[U y_0' + \left(\frac{3}{4} b - x_0\right) U\dot{y}_0' \right] = 0,
\end{gathered} \tag{1}$$

где m – погонная масса элемента лопасти; y – перемещение элемента лопасти в плоскости взмаха при возмущенном движении; EI – жесткость лопасти на изгиб; N – центробежная сила в сечении лопасти: $N = \omega^2 \int_r^R mrdr$; c_y^α - тангенс угла наклона кривой подъемной силы по углу атаки профиля; ρ - плотность воздуха; *b* - хорда лопасти; χ – коэффициент компенсатора взмаха;

U - относительная скорость обтекания элемента лопасти; y'_0 – угол поворота лопасти в горизонтальном шарнире; x_0 - расстояние от передней кромки профиля до оси жесткости; σ – расстояние от центра тяжести сечения до оси осевого шарнира (положительным считается направление от оси осевого шарнира к задней кромке лопасти); ϑ – упругий угол поворота лопасти; I_m – погонный момент инерции элемента лопасти относительно оси осевого шарнира; GT – жесткость лопасти на кручение; $\sigma_ф$ – расстояние от фокуса профиля до оси осевого шарнира; ω – угловая скорость вращения несущего винта; r - радиус вращения лопасти несущего винта.

При наличии горизонтальной скорости полета вертолета относительная скорость потока, обтекающего профиль, будет периодической функцией времени и радиуса. Приблизительно эту скорость можно приравнять скорости

$$U_x = \omega r + V\sin\omega t,$$

где V – скорость полета; t – время.

Поэтому уравнения (1) представляют собой систему дифференциальных уравнений с периодически меняющимися по времени коэффициентами.

Когда скорость полета V равна нулю, периодические коэффициенты системы (1) становятся постоянными, не зависящими от времени величинами.

Система (1) имеет следующие граничные условия:

$$M_0 = [EIy'']_0 = \chi(M_л + M_{тр}), \qquad M_л = [GT\vartheta']_0 = c_{упр}\vartheta_0 - M_{тр},$$

где M_0 – изгибающий момент в комле лопасти; $M_л$ – крутящий момент в комле лопасти; $M_{тр}$ - момент от сил трения в осевом шарнире втулки; $c_{упр}$ – жесткость системы управления; ϑ_0 -угол поворота комля лопасти за счет деформаций системы управления.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) получим, применив метод Б.Г. Галеркина:

$$y = \sum_j \delta_j y^{(j)}; \qquad \vartheta = \sum_k \gamma_k \vartheta^{(k)},$$

где $y^{(j)}$ и $\vartheta^{(k)}$ –формы собственных изгибных и крутильных колебаний лопасти в пустоте; δ_j и γ_k -коэффициенты изгибных и крутильных деформаций лопасти по j-му горизонтальному и k-му крутильному тону собственных колебаний.

Коэффициенты δ_j и γ_k представляют собой некоторые функции времени.

Поскольку уравнения (1) являются дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, то коэффициенты δ_j и γ_k должны быть функциями времени типа

$$\delta_j = \delta_{jo} e^{\lambda t}(1 + T),$$

где функция T определяет содержание гармонических колебаний при флаттере.

Если искать решение с точностью, ограниченной только основной частотой, и гармоническими составляющими пренебречь, то в уравнениях (1) можно опустить периодические коэффициенты.

Применив к этой упрощенной системе уравнений метод Б. Г. Галеркина, получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно переменных δ_j и γ_k. В матричной форме эта система может быть записана в виде уравнения

$$C\ddot{X} + D\omega\dot{X} + \left(A + \omega^2 B\right)X = 0, \tag{2}$$

где A, B, C, D- матрицы порядка z; z-сумма числа изгибных и крутильных тонов, учитываемых в расчете; X- вектор-функция с проекциями δ_j и γ_k.

Приняв в уравнении (2) $X = X_0 e^{\lambda t}$, получим систему алгебраических уравнений вида

$$\left[C\lambda^2 + D\omega\lambda + A + \omega^2 B\right]X_0 = 0. \qquad (3)$$

Приравняем определитель системы (3) нулю. Полученное таким образом алгебраическое уравнение относительно неизвестного параметра λ является характеристическим уравнением системы (2). Корни этого уравнения полностью характеризуют движение лопасти, описанное системой (1).Поскольку рассматривается случай, когда форма колебаний при флаттере представляется в виде комбинации нулевого r и первого y изгибных и первого крутильного тонов, то матрицы A, B, C и D будут третьего порядка, а вектор-функция X будет иметь только три проекции:

$$X = \begin{pmatrix} \delta_0 \\ \gamma_1 \\ \delta_1 \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты матриц A, B, C, D отнесем к значениям коэффициентов $I_{г.ш}$, L_1 и I_1, стоящих при старшей производной переменных:

$$L_1 = \int_0^R I_m \vartheta^2 dr; \qquad I_1 = \int_0^R m y^2 dr.$$

Выпишем выражения для коэффициентов матриц :

а) матрица инерции C:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix};$$

$$c_{11} = 1 + \frac{\chi}{I_{г.ш}} \int_0^R m r \sigma dr; \quad c_{12} = -\frac{1}{I_{г.ш}} \int_0^R m \sigma r \vartheta dr; \quad c_{13} = \chi\beta_0 \frac{1}{I_{г.ш}} \int_0^R m \sigma r dr;$$

$$c_{21} = -\frac{1}{L_1}\left[\int_0^R m\sigma r \vartheta dr + \chi \int_0^R I_m \vartheta dr\right]; \quad c_{22} = 1; \quad c_{23} = -\frac{1}{L_1}\left[\int_0^R m\sigma y \vartheta dr + \chi\beta_0 \int_0^R I_m \vartheta dr\right];$$

$$c_{31} = \frac{\chi}{I_1}\int_0^R m\sigma y dr; \quad c_{32} = -\frac{1}{I_1}\int_0^R m\sigma y \vartheta dr; \quad c_{33} = 1 + \frac{\chi}{I_1}\beta_0 \int_0^R m\sigma y dr;$$

б) матрица демпфирования D :

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix};$$

$$d_{11} = \tfrac{1}{2} c_y^\alpha \frac{\rho}{I_{г.ш}}\left[\int_0^R b r^3 dr + \chi \int_0^R b^2 r^2 \left(\frac{3}{4} - \frac{x_0}{b}\right) dr\right]; \quad d_{12} = -\tfrac{1}{2} c_y^\alpha \frac{\rho}{I_{г.ш}} \int_0^R b^2 r^2 \left(\frac{3}{4} - \frac{x_0}{b}\right) dr;$$

$$d_{13} = \tfrac{1}{2} c_y^\alpha \frac{\rho}{I_{г.ш}}\left[\int_0^R b r^2 y dr + \chi\beta_0 \int_0^R b r \left(\frac{3}{4} - \frac{x_0}{b}\right) dr\right];$$

$$d_{22} = \frac{1}{L_1}\left[\tfrac{\pi}{16}\rho\int_0^R b^3 r\vartheta^2 dr + \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\rho\int_0^R b^2\sigma_\phi\left(\frac{3}{4}-\frac{x_c}{b}\right)r\vartheta^2 dr\right] + \vartheta^2{}_0 d_{тр};$$

$$d_{23} = -\tfrac{1}{2}c_y^\alpha\frac{\rho}{L_1}\left[\int_0^R b\sigma_\phi ry\vartheta dr + \chi\beta_0\int_0^R b^2\sigma_\phi\left(\frac{3}{4}-\frac{x_0}{b}\right)r\vartheta dr\right] - \tfrac{\pi}{16}\rho\frac{\chi}{L_1}\beta_0\int_0^R b^3 r\vartheta dr - \chi\beta_0\vartheta_0 d_{тр};$$

$$d_{31} = \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\frac{\rho}{I_1}\left[\int_0^R br^2 ydr + \chi\int_0^R b^2\left(\frac{3}{4}-\frac{x_0}{b}\right)rydr\right]; \quad d_{32} = -\tfrac{1}{2}c_y^\alpha\frac{\rho}{I_1}\int_0^R b^2\left(\frac{3}{4}-\frac{x_0}{b}\right)ry\vartheta dr;$$

$$d_{33} = \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\frac{\rho}{I_1}\left[\int_0^R bry^2 dr + \chi\beta_0\int_0^R b^2\left(\frac{3}{4}-\frac{x_0}{b}\right)rydr\right],$$

где $$d_{тр} = \frac{2a_{тр}}{\pi L_1 m\varphi_{тр}};$$

в) матрица жесткостей A:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix},$$

$$a_{22} = p_{кр}^2 = \frac{c_{упр}\vartheta_0^2 + \int_0^R GT(\vartheta')^2 dr}{L_1};$$

$$a_{33} = p_{01}^2,$$

где p_{01} –частота собственных колебаний изгиба первого тона невращающейся лопасти;

г) матрица центробежных и аэродинамических жесткостей B:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{12} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix},$$

$$b_{11} = 1 + \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\rho\frac{\chi}{I_{г.ш.}}\left[\int_0^R br^3 dr + \tfrac{1}{2}\mu^2 R^2\int_0^R brdr\right];$$

$$b_{12} = -\tfrac{1}{2}c_y^\alpha\frac{\rho}{I_{г.ш.}}\left[\int_0^R br^3\vartheta dr + \tfrac{1}{2}\mu^2 R^2\int_0^R br\vartheta dr\right];$$

$$b_{13} = \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\rho\frac{\chi}{I_{г.ш.}}\beta_0\left[\int_0^R br^3 dr + \tfrac{1}{2}\mu^2 R^2\int_0^R brdr\right];$$

$$b_{21} = -\frac{1}{L_1}\left\{\int_0^R m\sigma r\vartheta dr + \chi\int_0^R I_m\vartheta dr + \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\rho\chi\left[\int_0^R b\sigma\varphi r^2\vartheta dr + \tfrac{1}{2}\mu^2 R^2\int_0^R b\sigma\varphi\vartheta dr\right]\right\};$$

$$b_{22} = 1 + \tfrac{1}{2}c_y^\alpha\frac{\rho}{L_1}\left[\int_0^R b\sigma\varphi r^2\vartheta^2 dr + \tfrac{1}{2}\mu^2 R^2\int_0^R b\sigma_\phi\vartheta^2 dr\right];$$

$$b_{23} = -\frac{1}{L_1}\left\{\tfrac{1}{2}c_y^{\alpha}\rho\chi\beta_0\left[\int_0^R b\sigma_{\phi}r^2\vartheta dr + \tfrac{1}{2}\mu^2R^2\int_0^R b\sigma_{\phi}\vartheta dr\right] + \int_0^R m\sigma r\beta\vartheta dr + \chi\beta_0\int_0^R I_m\vartheta dr\right\};$$

$$b_{31} = \frac{1}{2}c_y^{\alpha}\rho\frac{\chi}{I_1}\left[\int_0^R br^2ydr + \frac{1}{2}\mu^2R^2\int_0^R bydr\right]; \quad b_{32} = -\frac{1}{2}c_y^{\alpha}\frac{\rho}{I_1}\left[\int_0^R br^2y\vartheta dr + \frac{1}{2}\mu^2R^2\int_0^R bydr\right];$$

$$b_{33} = k + \frac{1}{2}c_y^{\alpha}\rho\frac{\chi}{I_1}\beta_0\left[\int_0^R br^2ydr + \frac{1}{2}\mu^2R^2\int_0^R bydr\right],$$

где $k = \frac{1}{I_1}\int_0^R y'\int_r^R mrdr$.

Характеристическое уравнение будет иметь следующий вид:

$$\lambda^6A_0 + \lambda^5\omega A_1 + \lambda^4\left(B_1\omega^2 + B_2\right) + \lambda^3\omega\left(C_1\omega^2 + C_2\right) + \lambda^2\left(\omega^4D_1 + \omega^2D_2 + D_3\right) + \\ + \lambda\omega\left(\omega^4E_1 + \omega^2E_2 + E_3\right) + \omega^2\left(\omega^4F_1 + \omega^2F_2 + F_3\right) = 0; \tag{4}$$

$A_0 = c_{11}S_0 + c_{13}R_0 + c_{12}T_0$; $A_1 = d_{11}S_0 + c_{11}S_1 + d_{13}R_0 + c_{13}R_1 + d_{12}T_0 + c_{12}T_1$;

$B_1 = b_{11}S_0 + d_{11}S_1 + c_{11}S_2 + b_{13}R_0 + d_{13}R_1 + c_{13}R_2 + b_{12}T_0 + d_{12}T_1 + c_{12}T_2$;

$B_2 = c_{11}S_3 + c_{13}R_3 + c_{12}T_3$;

$C_1 = b_{11}S_1 + d_{11}S_2 + c_{11}S_4 + b_{13}R_1 + d_{13}R_2 + c_{13}R_4 + b_{12}T_1 + d_{12}T_2 + c_{12}T_4$;

$C_2 = d_{11}S_3 + c_{11}S_5 + d_{13}R_3 + c_{13}R_5 + d_{12}T_3 + c_{12}T_5$;

$D_1 = b_{11}S_2 + d_{11}S_4 + c_{11}S_6 + b_{13}R_2 + d_{13}R_4 + c_{13}R_6 + b_{12}T_2 + d_{12}T_4 + c_{12}T_6$;

$D_2 = b_{11}S_3 + d_{11}S_5 + c_{11}S_7 + b_{13}R_3 + d_{13}R_5 + c_{13}R_7 + b_{12}T_3 + d_{12}T_5 + c_{12}T_7$;

$D_3 = c_{11}S_8$; $E_1 = b_{11}S_4 + d_{11}S_6 + b_{13}R_4 + d_{13}R_6 + b_{12}T_4 + d_{12}T_6$;

$E_2 = b_{11}S_5 + d_{11}S_7 + b_{13}R_5 + d_{13}R_7 + b_{12}T_5 + d_{12}T_7$; $E_3 = d_{11}S_8$;

$F_1 = b_{11}S_6 + b_{13}R_6 + b_{12}T_6$; $F_2 = b_{11}S_7 + b_{13}R_7 + b_{12}T_7$;

$F_3 = b_{11}S_8$; $S_0 = c_{22}c_{33} - c_{23}c_{32}$; $S_1 = c_{22}d_{33} + c_{33}d_{22} - c_{23}d_{32} - c_{32}d_{23}$;

$S_2 = b_{22}c_{33} + b_{33}c_{22} + d_{22}d_{33} - b_{23}c_{32} - b_{32}c_{23} - d_{23}d_{32}$;

$S_3 = a_{22}c_{33} + a_{33}c_{22}$; $S_4 = b_{22}d_{33} + b_{33}d_{22} - b_{23}d_{32} - b_{32}d_{23}$; $S_5 = a_{22}d_{33} + a_{33}d_{22}$;

$S_6 = b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}$; $S_7 = a_{22}b_{33} + a_{33}b_{22}$; $S_8 = a_{22}a_{33}$; $R_0 = c_{21}c_{32} - c_{22}c_{31}$;

$R_1 = c_{21}d_{32} + c_{32}d_{21} - c_{22}d_{31} - c_{31}d_{22}$; $R_2 = b_{21}c_{32} + b_{32}c_{21} + d_{21}d_{32} - b_{22}c_{31} - b_{31}c_{22} - d_{22}d_{31}$;

$R_3 = -a_{22}a_{33}$; $R_4 = b_{21}d_{32} + b_{32}d_{21} - b_{22}d_{31} - b_{31}d_{22}$; $R_5 = -a_{22}d_{31}$; $R_6 = b_{21}b_{32} - b_{22}b_{31}$;

$R_7 = -a_{22}b_{31}$; $T_0 = c_{23}c_{31} - c_{21}c_{33}$; $T_1 = c_{23}d_{31} + c_{31}d_{23} - c_{21}d_{33} - c_{33}d_{21}$;

$T_2 = b_{23}c_{31} + b_{31}c_{23} + d_{23}d_{31} - b_{21}c_{33} - b_{33}c_{21} - d_{21}d_{33}$; $T_3 = -a_{33}c_{21}$;

$T_4 = b_{23}d_{31} + b_{31}d_{23} - b_{21}d_{33} + b_{33}d_{21}$; $T_5 = -a_{33}d_{21}$; $T_6 = b_{23}b_{31} - b_{21}b_{33}$; $T_7 = -a_{33}b_{21}$.

Значения угловой скорости ω, соответствующие границам флаттера, получаем, подставляя в характеристическое уравнение (4) $\lambda = ip$ и приравнивая нулю действительную и мнимую части уравнений отдельно. Полученные таким образом уравнения будут иметь следующий вид:

$$0 = L_1(\omega, p) = p^6 A_0 - p^4\left(\omega^2 B_1 + B_2\right) + p^2\left(\omega^4 D_1 + \omega^2 D_2 + D_3\right) - \omega^2\left(\omega^4 F_1 + \omega^2 F_2 + F_3\right);$$
$$0 = L_2(\omega, p) = p^4 A_1 - p^2\left(\omega^2 C_1 + C_2\right) + \omega^4 E_1 + \omega^2 E_2 + E_3.$$

Из уравнения $L_2(\omega, p) = 0$ определим $p = f(\omega)$:

$$p = \sqrt{\frac{\left(\omega^2 C_1 + C_2\right) + \sqrt{\omega^4\left(C_1^2 - 4A_1E_1\right) + \omega^2\left(2C_1C_2 - 4E_2A_1\right) + C_2^2 - 4A_1E_1}}{2A_1}}.$$

Подставим полученное значение $p = f(\omega)$ в уравнение $L_1(\omega, p) = 0$. В результате получим

$$\omega^{12}N_1 + \omega^{10}N_2 + \omega^8 N_3 + \omega^6 N_4 + \omega^4 N_5 + \omega^2 N_6 + N_7 = 0; \qquad (5)$$

$$N_1 = n_{20}^2 n_{11} - k_{23}^2; \quad N_2 = n_{20} n_{21} n_{11} + n_{12} n_{20}^2 - 2k_{23}k_{24};$$
$$N_3 = \left(n_{21}^2 + 2n_{20}n_{22}\right)n_{11} + n_{12}n_{20}n_{21} + n_{13}n_{20}^2 - \left(k_{24}^2 + 2k_{23}k_{25}\right);$$
$$N_4 = 2n_{21}n_{22}n_{11} + n_{12}\left(n_{21}^2 + 2n_{20}n_{22}\right) + 2n_{20}n_{21}n_{13} - \left(2k_{26} + 2k_{24}k_{25}\right);$$
$$N_5 = n_{22}^2 n_{11} + 2n_{21}n_{22}n_{12} + n_{13}\left(n_{21}^2 + 2n_{10}n_{22}\right) - \left(k_{25}^2 + 2k_{24}k_{26}\right);$$
$$N_6 = n_{12}n_{22}^2 + 2n_{12}n_{22}n_{13} - 2k_{25}k_{26}; \quad N_7 = n_{13}n_{22}^2 - k_{26}^2,$$

$$k_{23} = F_1 - \frac{1}{2A_1}C_1D_1 - C_1^3 + 3A_1C_1E_1 + B_1\left(C_1^2 - 2A_1E_1\right);$$

$$k_{24} = F_2 - \frac{1}{2A_1}\left(C_1D_2 + C_2D_1\right) - 3C_1^2C_2 + 3C_1E_2A_1 + 3C_2E_1A_1 + 2B_1B_2\left(C_1C_2 - A_1A_2\right);$$

$$k_{25} = F_3 - 2A_1\left(C_1D_3 + C_2D_3\right) - 3C_1C_2^2 + 3C_1E_3A_1 - 3C_2E_2A_1 + 2B_1B_2\left(C_2^2 - 2A_1E_3\right)\times$$
$$\left(C_1C_2 - A_1E_2\right); \quad k_{26} = -\frac{C_2D_3}{2A_1} - C_2^3 + 3C_2E_3A_1 + B_2\left(C_2^2 - 2A_1E_3\right);$$

$$n_{11} = C_1^2 - 4A_1E_1; \quad n_{12} = 2\left(C_1C_2 - 2A_1E_2\right); \quad n_{13} = C_2^2 - 4A_1E_3;$$
$$n_{20} = C_1^2\left(1 + \frac{3A_0}{8A_1^3}\right) - 4A_1E_1 - \frac{C_1B_1}{2A_1^2} + \frac{D_1}{2A_1}; \quad n_{21} = C_1C_2\left(2 + \frac{3A_0}{4A_1^3}\right) - 4A_1E_2 -$$
$$-\frac{C_1B_2 + B_1C_2}{2A_1^2} + \frac{D_1}{2A_1}; \quad n_{22} = \frac{1}{8A_1^3}\left(3C_2^2A_0 + C_2^2 - 4A_1E_3\right) + \left(\frac{C_2B_2}{2A_1^2} + \frac{D_2}{2A_1}\right).$$

Точки пересечения кривой (5) с осью абцисс будут соответствовать границам флаттера. Подбирая коэффициенты уравнения (5), а следовательно, и параметры лопасти, можно изменять границы флаттера. Использование предложенного подхода позволяет улучшить динамические характеристики вертолета за счет выбора упруго-массовых характеристик несущего винта.

Стаття надійшла до редакції 3 квітня 2000 року.