

2. Павлов В.А., Черников С.К. О критической скорости флаттера оперения с рулем. - Изв. вузов, Авиационная техника, 1982, № 4. - С. 61-64.

3. Гайнутдинов В.Г. О расчетной схеме тонкостенных крыльев малого удлинения // Прочность конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. трудов. - Казань: КАИ, с. 84-88.

4. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. - М.: ГИФМЛ, 1961. - 524 с.

УДК 629.7.02:539.4

В.А.Павлов, С.А.Михайлов

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧКИ КОРАБЛЯ НА АМПЛИТУДНО-МАХОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА ПРИ РАСКРУТКЕ ЕГО НА ПАЛУБЕ

При базировании вертолета на палубе корабля одним из расчетных случаев является нестационарный стояночный режим работы несущего винта при его раскрутке либо останове. Эксплуатация вертолета на палубе корабля предъявляет особые требования к выполнению этих режимов. Это связано с наличием нестационарного воздушного потока над палубой, обусловленного архитектурой палубных надстроек, ходом корабля и морским волнением.

Для вертолетов соосной схемы влияние этих дополнительных факторов может привести к соударению лопастей верхнего и нижнего винтов на начальной стадии раскрутки при малых угловых скоростях вращения.

В настоящей работе проведено исследование амплитудно-маховых характеристик лопастей несущего винта при раскрутке его на взлетно-посадочной площадке (ВПП) корабля при наличии набегающего воздушного потока и регулярной бортовой и килевой качки.

Современная гидродинамическая теория качки корабля рассматривает регулярную и нерегулярную качку, первая из которых определяется гармонической функцией и имеет резонанс при совпадении собственных частот колебаний корабля на тихой воде с частотой воздействия волн морского волнения. Вторая описывается вероятностными характеристиками случайного процесса. Общее решение дифференциального уравнения качки можно записать в виде:

$$\theta = e^{-\gamma_{\theta} t} (c_1 \cos \omega_{\theta} t + c_2 \sin \omega_{\theta} t) + \theta_m \sin(\omega_k t - \delta_{\theta}), \quad (I)$$

где  $\Theta_m$ ,  $\delta_\theta$ ,  $\omega_k$  - соответственно амплитуда, фаза и частота вынужденных колебаний;  $\omega_\theta$  - частота собственных колебаний;  $\nu$  - коэффициент колебаний качки.

При регулярной качке благодаря множителю  $e^{-\nu\theta t}$  собственные колебания с течением времени затухают и остаются только вынужденные колебания. В решении поставленных в работе задач участвуют лишь уравнения, описывающие регулярные вынужденные колебания.

Для исследования влияния параметров качки корабля на амплитудно-маховые характеристики раскрутки несущего винта (НВ) введем четыре правые ортогональные системы координат (рис. I):  $O, X_g, Y_g,$

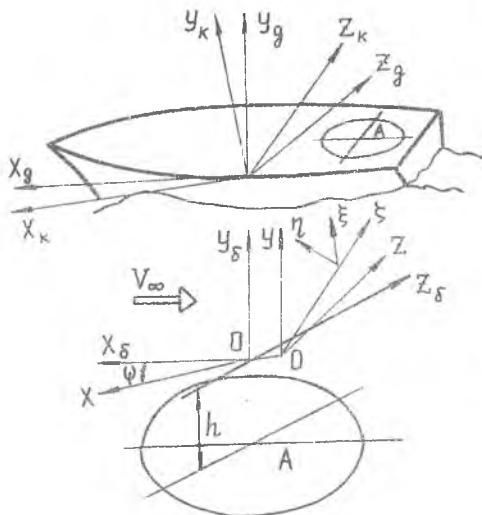


Рис. I

$Z_g$  - инерционная система координат, плоскость которой расположена на невозмущенной свободной поверхности воды. Начало координат расположено в пересечении двух плоскостей: диаметральной плоскости корабля при его положении на "тихой воде" в начальный момент времени и плоскости "тихой воды";  $O, X_k, Y_k, Z_k$  - связанная корабельная система координат. Начало ее расположено в центре тяжести корпуса корабля. Оси координат совпадают с главными осями инерции, а на "тихой воде" совпадают и с инерционными осями;

$O, X_\delta, Y_\delta, Z_\delta$  - базовая вращающаяся система координат, связанная со втулкой несущего винта. Эта система повернута по отношению к осям  $O, X_k, Y_k, Z_k$  на угол наклона оси вала винта  $\alpha_\delta$  вокруг оси  $Z_k$ ;  $O, X, Y, Z$  - основная вращающаяся система координат, связанная с несущим винтом, относительно которой определяются перемещения расчетной лопасти;  $O, \xi, \eta, \zeta$  - система координат, связанная с расчетной точкой на оси деформированной лопасти.

Используя составляющую уравнения (I) по регулярной качке,

определим текущие угловые координаты по бортовой и килевой качке и их временные производные

$$\beta = \beta_0 \sin(\omega_{\beta} t - \delta_{\beta}), \quad \gamma = \gamma_0 \sin(\omega_{\gamma} t - \delta_{\gamma}) \quad (2)$$

$$\dot{\beta} = \beta_0 \omega_{\beta} \cos(\omega_{\beta} t - \delta_{\beta}), \quad \dot{\gamma} = \gamma_0 \omega_{\gamma} \cos(\omega_{\gamma} t - \delta_{\gamma}).$$

Полагая  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $\omega_{\beta}$ ,  $\omega_{\gamma}$ , а также  $\delta_{\beta}$  и  $\delta_{\gamma}$  заданными, можно определить все величины, входящие в (2). Если известно приближенное решение по бортовой и килевой качке корабля и определено текущими значениями углов  $\beta$  и  $\gamma$ , можно записать матрицу преобразования векторных величин от инерционной системы координат к основной вращающейся системе:

$$L_{\text{к}} = \begin{matrix} & Z_g & X_g & Y_g \\ \begin{matrix} Z \\ X \\ Y \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccc} \cos \varphi \cos \gamma & \cos \varphi \sin \gamma \cos \beta^* & \cos \varphi \sin \gamma \sin \beta^* \\ -\sin \varphi & \cos \gamma \cos \beta^* & \cos \gamma \sin \beta^* \\ \sin \varphi \cos \gamma & \sin \varphi \sin \gamma \cos \beta^* & \sin \varphi \sin \gamma \sin \beta^* + \\ & -\cos \varphi \sin \beta^* & + \cos \varphi \cos \beta^* \end{array} \right] & \end{matrix} \quad (3)$$

Здесь  $\beta^* = \beta + \alpha_{\beta}$  - угол наклона базовой системы координат по бортовой качке совместно с углом наклона оси вала несущего винта.

Зная движение борта корабля, определим дополнительные линейные скорости перемещения центра координат основной системы, связанной с втулкой винта, обусловленные поступательным движением корабля, а также наличием бортовой и килевой качки. Запишем выражения для скоростей относительно инерционной системы координат

$X_g Y_g Z_g$ :

$$\begin{aligned} V_{xg} &= -\dot{\gamma} R_{\gamma} \sin \gamma + V_{\infty} \\ V_{yg} &= \dot{\gamma} R_{\gamma} \cos \gamma - \dot{\beta} R_{\beta} \sin \beta \\ V_{zg} &= \dot{\beta} R_{\beta} \cos \beta, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R_{\beta}$ ,  $R_{\gamma}$  - радиусы колебаний центра координат основной системы по бортовой и килевой качке. Используя матрицу преобразования (2), получим составляющие угловых скоростей вращения несущего винта и относительных скоростей обтекания сечений лопасти в подвижных основных осях  $X Y Z$  (полагаем в качестве упрощения, что дополни-

тельные скорости постоянны по диску винта):

$$\begin{aligned}\omega_z &= \omega_{zg} \ell_{k11} + \omega_{xg} \ell_{k12} \\ \omega_x &= \omega_{zg} \ell_{k21} + \omega_{xg} \ell_{k22} \\ \omega_y &= \omega_{zg} \ell_{k31} + \omega_{xg} \ell_{k32} + \omega_o.\end{aligned}\quad (5)$$

Вектор угловой скорости вращения вала НВ  $\omega_o$  является следящим и не дает составляющих в направлении осей X и Z:

$$[V_x^k, V_y^k, V_z^k]^T = -L_k [V_{xg}, V_{yg}, V_{zg}]^T. \quad (6)$$

Для определения дополнительной воздушной нагрузки на винт с учетом качающейся ВПН необходимо дополнительные скорости обтекания лопастей (6) перевести в скоростную систему координат по каждому расчетному сечению.

Помимо дополнительной воздушной нагрузки, обусловленной качкой корабля, на отсеки лопастей винта действуют и дополнительные кориолисовы усилия. Определение этих усилий основывается на представлении лопасти несущего винта, участвующей в сложном колебательном и вращательном движении, в виде схемы трехстепенного гироскопа. Отсек лопасти рассматривается как элемент твердого тела массовой  $dm$ , вращающегося с угловыми скоростями  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ . Проведем разделение движения отсека /I/:

I.  $\omega_z$  - переносная угловая скорость;  $\omega_y$  - относительная угловая скорость.

Дополнительное кориолисово ускорение, а соответственно и усилие отсека будет (рис.2):

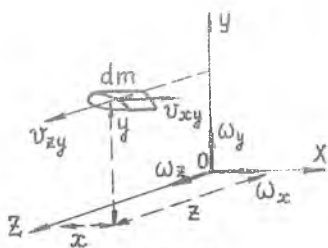


Рис. 2

$$\begin{aligned}v_{xy} &= \omega_y z; \quad j_{yz}^k = 2v_{xy}\omega_z = 2\omega_y z \omega_z \\ dt_{yI}^k &= -dm 2\omega_y z \omega_z; \quad t_{yI}^k = -2m\omega_y z \omega_z \\ 2. \omega_x &- \text{переносная угловая скорость; } \omega_y - \text{относительная угловая скорость;} \\ v_{zy} &= -\omega_y x; \quad j_{yx}^k = -2v_{zy}\omega_x = -2\omega_y x \omega_x \\ dt_{yII}^k &= dm 2\omega_y x \omega_x; \quad t_{yII}^k = -2m\omega_y x \omega_x\end{aligned}$$

суммарная величина погонной кориолисовой нагрузки на лопасть будет:

$$t_{y\Sigma}^k = t_{yI}^k + t_{yII}^k = 2m\omega_y (x\omega_x - z\omega_z). \quad (7)$$

Таким образом, полученные дополнительные силовые факторы позволяют учесть влияние регулярной бортовой и килевой качки корабля, а также его поступательного движения на перемещения лопасти в пространстве при нестационарном вращении несущего винта на ВПП корабля.

Численный расчет такого режима работы НВ проводился по методике, описанной в /2,3/.

В расчетную методику введено дополнительное упрощение по индуктивному скосу потока несущего винта. Поскольку на начальных этапах раскрутки винта  $\omega = 10...20\% \omega_{\text{раб}}$  винт тяги не создает, то полагаем, что индуктивным скосом потока в этом случае можно пренебречь (для расчета полей индуктивных скоростей на таком режиме работы несущего винта необходимо использовать специальные численные методы, описывать которые не ставит своей целью данная работа). Некоторые результаты расчетов приведены на рис.3 по траекториям махового движения концевое сечения лопасти в зависимости от изменения угловой скорости вращения винта.

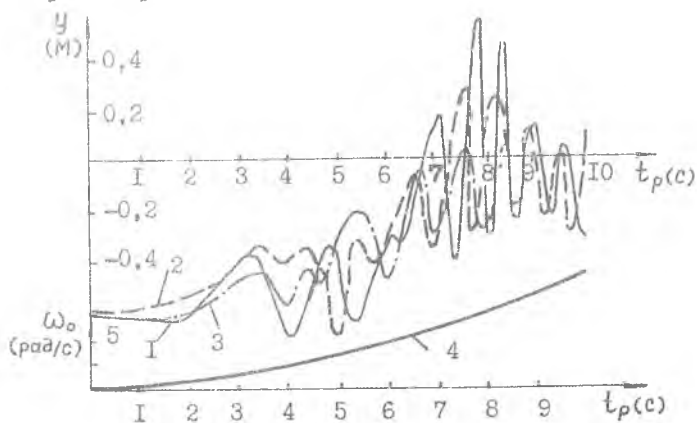


Рис. 3

Анализ результатов расчетов показывает, что наличие бортовой и килевой качки корабля может значительно изменить физическую картину движения лопасти на режиме раскрутки винта, что особенно заметно при изменении начальных условий качки. Таким образом, для анализа реальных условий режима раскрутки несущего винта на борту качающегося корабля необходимо в расчетную модель вводить нестационарный воздушный поток над ВПП, определять переменное поле индук-

7-4708

тивных скоростей, а также для движения корабля при морском волнении использовать уравнения нерегулярной качки с учетом вероятностных характеристик волнения.

### Л и т е р а т у р а

1. Данилин В.П. Гироскопические приборы. - М.: Высшая школа, 1965. - 538 с.
2. Павлов В.А., Михайлов С.А. Теория движения лопастей несущего винта при больших перемещениях // ИВУЗ. Авиационная техника. - 1986. - № I. - С. 39.
3. Михайлов С.А. О численной реализации задачи нелинейных упругих колебаний лопастей воздушных винтов. - Рукопись деп. в ВИНТИ 26.01.83, № 447-83.

УДК 629.7.02.534.1

Н.И.Гриненко, В.В.Мокеев

### АНАЛИЗ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕОДНОРОДНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Традиционный подход решения задачи вынужденных колебаний вязкоупругих конструкций основывается на разложении решения в ряд по формам собственных колебаний упругой конструкции. В случае, когда деформируемые элементы обладают различными вязкоупругими свойствами, такой подход может оказаться неприменимым, так как собственные формы упругих колебаний не образуют здесь пространства нормальных векторов.

Предлагается использовать пространство нормальных форм, полученных при решении задачи свободных колебаний неоднородной вязкоупругой конструкции. Для дискретизации конструкции используется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет представить неоднородную конструкцию в виде единого тела, состоящего из множества упругих и вязкоупругих конечных элементов. Свойства вязкоупругих элементов описываются в рамках линейной теории вязкоупругости. Используется дифференциальная форма связи напряжений и деформаций. Для изотропного вязкоупругого элемента матрица вязкоупругих операторов определяется двумя дифференциальными операторами, а в случае, когда коэффициент Пуассона ( $\nu$ ) является действительной константой, достаточно использовать один оператор. Связь напряжений и деформации описывается при этом соотношением: