

УДК 629.735.45.015

## **Анализ особенностей работы несущего винта с отрицательным выносом горизонтальных шарниров**

**Борисов Е.А.\*, Леонтьев В.А.\*\*, Новак В.Н.\*\*\***

*Центральный аэрогидродинамический институт*

*имени профессора Н.Е. Жуковского, ЦАГИ, ул. Жуковского, 1, Жуковский,*

*Московская область, 140180, Россия*

*\*e-mail: [jekamail@list.ru](mailto:jekamail@list.ru)*

*\*\*e-mail: [spintest@tsagi.ru](mailto:spintest@tsagi.ru)*

*\*\*\*e-mail: [spintest@tsagi.ru](mailto:spintest@tsagi.ru)*

### **Аннотация**

В данной работе рассмотрена новая концепция скоростного несущего винта одновинтового вертолѐта и проведѐн анализ влияния его конструктивных особенностей на аэродинамические характеристики.

**Ключевые слова:** углы атаки лопасти, собственная частота махового движения, срыв потока, втулка несущего винта.

### **Введение**

В последние годы во всем мире ведутся работы по созданию скоростных вертолѐтов. Основным агрегатом вертолѐта, создающим подъѐмную и пропульсивную силы, является несущая система, состоящая из одного или более несущего винта (НВ). Поэтому, наиболее сложная часть этих работ связана с

разработкой НВ, способных эффективно работать в сложных условиях обтекания винта на режимах полёта с большими скоростями.

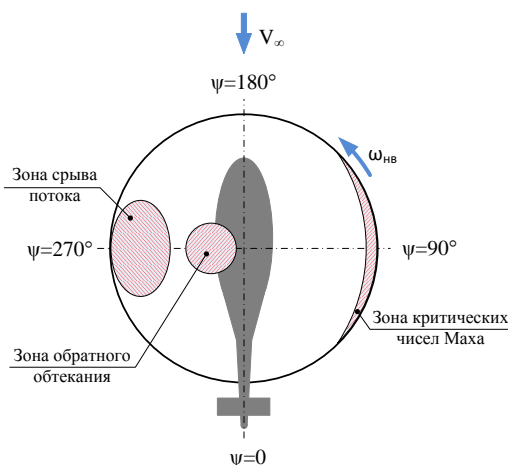


Рисунок 1

Вследствие несимметричного обтекания наступающих и отступающих лопастей несущего винта на этих режимах, возникает ряд неблагоприятных физических явлений (рисунок 1) ухудшающих его аэродинамические характеристики – это срыв потока с отступающих лопастей, возникновение зон волнового сопротивления на наступающих лопастях и зон обратного обтекания профиля на отступающих лопастях. Среди проблем, которые возникают при разработке скоростных винтов, одними из наиболее сложных являются проблемы срыва потока с отступающих лопастей НВ. Во многих случаях срыв потока является главным препятствием для увеличения скорости полёта, поскольку он ухудшает несущие и пропульсивные свойства винта и, как правило, приводит к возникновению срывного флаттера лопастей. При этом резко возрастают нагрузки в системе управления, напряжения в лопастях НВ и вибрации вертолёт.

Для предотвращения срыва потока с лопастей НВ в разное время предлагались различные технические решения, направленные на уменьшение углов атаки в сечениях отступающих лопастей. Выделим наиболее эффективные способы решения этой задачи.

*Первый* заключается в установке на одновинтовом вертолётном крыле, которое разгружает винт на больших скоростях полёта, что позволяет уменьшить углы атаки на отступающих лопастях.

*Второй* способ состоит в увеличении различными методами углов атаки в сечениях наступающих лопастей и уменьшении их в сечениях отступающих.

Реализовать *второй* способ можно следующими методами:

1. Увеличением жёсткости крепления лопастей НВ к втулке или увеличением выноса горизонтального шарнира (ГШ) винта. Это обеспечивает возможность воздействовать на величину углов атаки в сечениях лопастей – увеличивая их на наступающих лопастях и уменьшая на отступающих. Такими свойствами обладают НВ с «упругими шарнирами», винты с жёстким креплением лопастей к втулке и НВ с достаточно большим положительным выносом горизонтальных шарниров.

2. Наклоном кольца автомата перекоса, обеспечивающего отклонение оси конуса лопастей НВ в сторону азимута 270 градусов (отступающих лопастей). Следует отметить, что увеличение жёсткости крепления лопастей НВ или увеличение величины выноса ГШ, увеличивает эффективность данного

способа. Так данный способ уменьшения срыва не работает, если вынос ГШ равен нулю.

При применении второго способа предотвращения срыва потока, на втулке НВ появляются значительный момент крена, действующий в сторону отступающих лопастей. На двухвинтовых вертолётах – соосной, поперечной или продольной схем, моменты крена возникающие, на разных винтах взаимно уравниваются и поэтому не создают проблем для балансировки вертолётa. На одновинтовом вертолётe компенсировать боковой момент крена можно посредством смещения оси вращения винта вбок относительно его центра масс или установкой несимметрично работающего крыла.

Недостаток пропульсивных свойств винта на больших скоростях полёта, компенсируется использованием специальных пропульсивных движителей и с НВ снимается задача по созданию пропульсивной силы. Поэтому на режимах полёта с большой скоростью, НВ устанавливаются под небольшие положительные углы атаки, которые соответствуют зоне максимального качества.



Рисунок 2 – Sikorsky X2



Рисунок 3 – Eurocopter X3

В настоящее время созданы демонстраторы скоростных вертолётов, на которых реализованы вышеуказанные способы предотвращения срыва с

отступающих лопастей. На американском винтокрылом летательном аппарате (ВКЛА) Sikorsky X2 (рисунок 2) применены соосные несущие винты с жёстким креплением лопастей к втулке и пропульсивный движитель. Соосные винты создают необходимую подъёмную силу и взаимно компенсируют существенные боковые и реактивные моменты верхнего и нижнего винтов. На европейском ВКЛА Eurocopter X3 (рисунок 3) реализована концепция одновинтового вертолёт с крылом и пропульсивным движителем. Его несущий винт имеет лопасти с упругой заделкой. Он создаёт подъёмную силу и боковой момент, который компенсируется крылом. Кроме того, крыло разгружает несущий винт на больших скоростях полёта, а пропульсивная система служит для преодоления вредного сопротивления аппарата и для компенсации реактивного момента несущего винта. Однако существенным недостатком указанных конструкций ВКЛА являются – снижение весовой отдачи, ухудшение условий эксплуатации и значительное усложнение конструкции вертолёт.

В работе рассмотрена новая концепция несущего винта одновинтового скоростного вертолёт – винт с отрицательным выносом горизонтальных шарниров (ОВШ) [1], которая обеспечивает возможность увеличить моменты крена на втулке НВ в сторону отступающих лопастей, не изменяя конструкции других элементов вертолёт. Её суть заключается в использовании конструкции втулки винта, позволяющей получить частоту собственных маховых колебаний лопастей более низкую, чем частота вращения винта. Уменьшение собственной частоты, также как и её увеличение (винты с положительным выносом горизонтальных шарниров

(ПВШ) или винты с упругим креплением лопастей) приводит к фазовому сдвигу махового движения лопастей. В свою очередь, сдвиг махового движения лопастей приводит к увеличению углов атаки на наступающих лопастях и уменьшению их на отступающих и тем самым отдалает появление срыва на винте. Вторым отличием предлагаемой концепции нового винта от НВ с положительным выносом шарниров является то, что момент крена на втулке и момент крена от боковой силы относительно центра масс вертолёт имеют разные знаки, что позволяет сбалансировать вертолёт с такими винтами на больших скоростях полёта без применения дополнительных конструктивных решений.

В данной работе приведены выводы уравнений махового движения лопастей винта с ОВШ, выражения момента на втулке этого винта, метод расчёта коэффициентов первой гармоники махового движения лопастей и выражения для расчёта углов атаки в их сечениях. Проведён анализ работы винтов с ОВШ и ПВШ, получена оценка влияния некоторых их параметров на углы атаки сечений лопастей.

Приведены также результаты расчётов махового движения и углов атаки лопастей винтов с ОВШ и ПВШ, иллюстрирующие возможность увеличения углов атаки на наступающих лопастях и уменьшения их на отступающих лопастях посредством отклонения кольца автомата перекоса (АП).

В настоящее время при расчёте аэродинамических характеристик НВ широко используются методы численного моделирования гидродинамических процессов (CFD) [2-3], так же активно развивается нелинейная вихревая теория НВ [4]. В

данной работе с целью упрощения, анализ и выводы уравнений проводился в рамках классической теории НВ [5].

### Уравнения махового движения лопастей винта с произвольным выносом горизонтальных шарниров

Рассмотрим винты с абсолютно жёсткими лопастями и произвольным (положительным или отрицательным) выносом горизонтальных шарниров, вращающиеся с угловой скоростью  $\omega$ . Схема лопасти винта с отрицательным выносом горизонтального шарнира показана на рисунке 4.

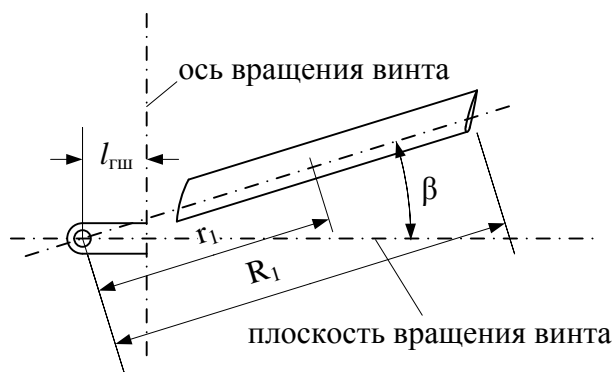


Рисунок 4 – Лопасть винта с отрицательным выносом горизонтального шарнира

На рисунке 4 приняты следующие обозначения:  $\beta$  – угол взмаха лопасти,  $l_{\text{ГШ}}$  – расстояние от оси винта до оси горизонтального шарнира,  $r_1$  – расстояние от оси ГШ до сечения лопасти,  $R_1$  – расстояние от оси ГШ до конца лопасти. Считается, что при обычном выносе горизонтальных шарниров величина  $l_{\text{ГШ}}$  положительная, а при отрицательном выносе (с противоположной относительно оси вращения) – отрицательная.

Уравнение махового движения лопасти напишем в форме условия равновесия моментов инерционных, центробежных и аэродинамических сил:  $M_{ин}$ ,  $M_{цб}$  и  $M_{аэр}$  относительно оси горизонтального шарнира:

$$M_{ин} + M_{цб} + M_{аэр} = 0. \quad (1)$$

Момент аэродинамических сил относительно ГШ определяется по формуле:

$$M_{аэр} = \int_0^{R_1} T r_1 dr_1, \quad (2)$$

где  $T$  – составляющая погонной аэродинамической силы лопасти параллельная оси вращения винта.

Погонную инерционную силу  $p_{ин}$  и погонную центробежную силу  $n_{цб}$ , можно представить в виде следующих выражений:

$$p_{ин} = -m \frac{d^2 \beta}{dt^2} \cdot r_1, \quad (3)$$

$$n_{цб} = m \omega^2 (r_1 + l_{ГШ}). \quad (4)$$

Используя выражения (3) и (4), можно определить моменты  $M_{ин}$  и  $M_{цб}$  от инерционных и центробежных сил относительно ГШ:

$$M_{ин} = - \int_0^{R_1} m \frac{d^2 \beta}{dt^2} \cdot r_1^2 dr_1, \quad (5)$$

$$M_{цб} = - \int_0^{R_1} m \omega^2 (r_1 + l_{ГШ}) \beta \cdot r_1 dr_1. \quad (6)$$

Подставляя (2), (5) и (6) в уравнение (1), выполнив операцию интегрирования по радиусу в (5) и (6) можно после некоторых преобразований представить



уравнение колебаний абсолютно жёсткой лопасти относительно горизонтального шарнира в следующем виде:

$$J_{\Gamma\text{Ш}} \frac{d^2\beta}{dt^2} + J_{\Gamma\text{Ш}} \omega^2 \left( 1 + \frac{S_{\Gamma\text{Ш}} l_{\Gamma\text{Ш}}}{J_{\Gamma\text{Ш}}} \right) \beta = \int_0^{R_1} T r_1 dr_1, \quad (7)$$

где:  $J_{\text{ш}} -$  массовый момент инерции лопасти относительно ГШ:

$$J_{\Gamma\text{Ш}} = \int_0^{R_1} m r_1^2 dr_1; \quad (8)$$

$S_{\text{ш}} -$  статический момент лопасти относительно ГШ:

$$S_{\Gamma\text{Ш}} = \int_0^{R_1} m r_1 dr_1. \quad (9)$$

Уравнение (7) является уравнением колебаний системы с одной степенью свободы, у которой коэффициент при переменной  $\beta$ , равен квадрату частоты собственных колебаний лопасти умноженный на момент инерции  $J_{\text{ш}}$ . Как видно при нулевом выносе горизонтального шарнира  $l_{\text{ш}}=0$ , квадрат частоты собственных колебаний лопасти относительно горизонтального шарнира будет равен квадрату угловой скорости винта  $-\omega^2$  и следовательно частота собственных колебаний будет равна угловой скорости винта. При положительном выносе горизонтального шарнира, когда  $l_{\text{ш}}$  – положительное число, квадрат частоты собственных колебаний лопасти относительно горизонтального шарнира будет больше квадрата угловой скорости винта  $-\omega^2$ , следовательно, частота собственных колебаний будет больше угловой скорости винта. В случае отрицательного выноса горизонтального шарнира, когда  $l_{\text{ш}}$  – отрицательное число, квадрат частоты собственных колебаний лопасти

относительно горизонтального шарнира будет меньше квадрата угловой скорости винта –  $\omega^2$ , следовательно, частота собственных колебаний будет меньше угловой скорости винта.

### **Моменты на втулке винта с произвольным выносом горизонтальных шарниров**

Для оценки величины моментов на втулке винта с произвольным выносом шарниров используется допущение, что равнодействующая аэродинамических сил винта направлена по оси конуса лопастей, а боковая и продольная сила винта  $S$  и  $H$  равны соответственно произведениям подъёмной силы  $T$  на углы поперечного и продольного наклона оси конуса лопастей винта:

$$\begin{aligned} S &= T b_1, \\ H &= T a_1, \end{aligned} \tag{10}$$

где  $a_1$  и  $b_1$  – коэффициенты разложения угла взмаха лопасти в ряд Фурье:

$$\beta = a_0 - a_1 \cos\psi - b_1 \sin\psi. \tag{11}$$

Предполагается также, что равнодействующая аэродинамических, инерционных и центробежных сил лопасти совпадает с её продольной осью и равна по величине центробежной силе лопасти  $N$ . Такие допущения обычно используются для приближенных вычислений действующих на вертолёт сил и моментов.

Отметим известный факт, что лопасти винта с  $l_{gu}=0$  имеют нулевые продольный и поперечный моменты на втулке винта.

Для определения постоянной части моментов на втулке шарнирного винта  $M_{x0}$  и  $M_{z0}$  относительно осей  $OX_0$  и  $OY_0$  связанной с вертолётom системы координат  $OX_0Y_0Z_0$ , у которой ось  $OY_0$  совпадает с осью винта, начало координат с центром втулки, а ось  $OX_0$  с плоскостью симметрии вертолётa, достаточно выполнить следующие операции:

- определить вертикальную составляющую силы действующей в горизонтальном шарнире лопасти;

- определить момент этой силы относительно центра втулки и умножить этот момент на  $\sin \psi$  или на  $\cos \psi$  в зависимости от того, какой момент  $M_{x0}$  или  $M_{z0}$  надо определить;

- проинтегрировать полученную величину по азимуту от нуля до  $2\pi$ , умножить на число лопастей и разделить на  $2\pi$ .

Рассмотрим лопасти двух винтов №1 и №2 одинакового диаметра и с одинаковыми лопастями, имеющих одинаковые по абсолютной величине выносы горизонтальных шарниров –  $l_{гш}$ , но у лопасти №1 вынос ГШ отрицательный, а у лопасти винта №2 положительный (рисунок 5).

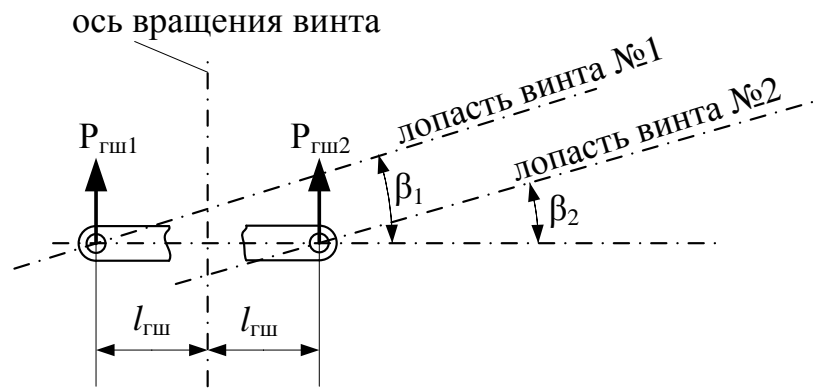


Рисунок 5

Предположим, что центробежные силы  $N_1$  и  $N_2$  у лопастей винтов №1 и №2 имеют одинаковую величину  $N$ , что лопасти совершают одинаковое маховое движение  $\beta=f(\psi)$  и что лопасти создают одинаковую подъёмную силу  $T$ . В этом случае на одном и том же азимуте у лопастей обоих винтов в горизонтальном шарнире будет приложена одинаковая вертикальная сила  $P_{гш}$ , которая равна произведению центробежной силы  $N$  на синус угла взмаха лопасти  $\beta$ :

$$P_{гш} = N \sin \beta. \quad (12)$$

Сила  $P_{гш}$  создаёт момент  $m_0$  относительно центра втулки:

$$m_0 = P_{гш} l_{гш}. \quad (13)$$

Но поскольку у лопастей №1 и №2 горизонтальные шарниры расположены по разные стороны от оси вращения винта (рисунок 5), то они создают на каждом азимуте равные по величине, но противоположные по знаку моменты  $m_0$ . Очевидно, что после умножения моментов  $m_0$  на  $\sin \psi$  или на  $\cos \psi$  и интегрирования по азимуту для лопастей винтов №1 и №2 получим равные по величине, но противоположные по знаку постоянные моменты на втулке винта  $M_{x0}$  и  $M_{z0}$ :

$$M_{x0} = \frac{1}{2} z_l l_{\Gamma\text{Ш}} N b_1, \quad (14)$$

$$M_{z0} = \frac{1}{2} z_l l_{\Gamma\text{Ш}} N a_1, \quad (15)$$

где  $z_l$  – число лопастей винта.

В формулах (14) и (15) величина  $l_{\text{цм}}$  положительная при положительном выносе ГШ и отрицательная при отрицательном выносе.

Поскольку лопасти №1 и №2, согласно принятому условию, имеют одинаковое маховое движение, ось конуса лопастей у них направлена одинаково и поэтому боковая и продольная силы будут создавать одинаковые по знаку моменты  $M_{xS}$  и  $M_{zH}$  относительно центра тяжести вертолѐта:

$$M_{xS} = S y_{\text{нв}} = T b_1 y_{\text{нв}}, \quad (16)$$

$$M_{zH} = H y_{\text{нв}} = T a_1 y_{\text{нв}}, \quad (17)$$

где  $y_{\text{нв}}$  – расстояние по вертикали от центра втулки до центра масс вертолѐта.

Продольный и поперечный моменты  $M_{x\text{цм}}$  и  $M_{z\text{цм}}$  от аэродинамических сил винта относительно центра масс вертолѐта, учитывая выражения (14)-(17), запишем в следующем виде:

$$M_{x\text{цм}} = \left( \frac{1}{2} z_l l_{\Gamma\text{Ш}} N + T y_{\text{нв}} \right) b_1, \quad (18)$$

$$M_{z\text{цм}} = \left( \frac{1}{2} z_l l_{\Gamma\text{Ш}} N + T y_{\text{нв}} \right) a_1. \quad (19)$$

Из выражений (18)-(19) видно, что у винта с ОВШ моменты на втулке и соответствующие моменты, создаваемые продольной или боковой силами относительно центра масс вертолѐта, имеют противоположные знаки, а у винта с ПВШ – одинаковые.

## Метод расчёта махового движения и углов атаки лопастей несущего винта

Для анализа работы винтов с отрицательными выносами шарниров и с наклонёнными шарнирами лопастей использовался метод применяющийся для приближенных расчётов винтов с положительными выносами горизонтальных шарниров лопастей [6-7]. Суть его состоит в том, что вместо винта с ПВШ рассматривается эквивалентный винт с нулевыми выносами шарниров, но снабжённый пружиной в ГШ, обеспечивающей такую же частоту собственных маховых колебаний лопастей, как у винта с ПВШ. Результаты расчётов винтов с ПВШ и с пружиной в ГШ при выносе ГШ не превышающем значительно  $0,1R$  практически совпадают. Но выражения коэффициентов махового движения для лопасти с пружиной в ГШ имеют более удобный для анализа вид.

Уравнение маховых колебаний абсолютно жёсткой лопасти с пружиной в ГШ можно представить в следующем виде:

$$J_{\text{ГШ}} \frac{d^2\beta}{dt^2} + J_{\text{ГШ}} \omega^2 \beta + K_{\beta} \beta = \int_0^R Tr dr, \quad (20)$$

где:  $K_{\beta}$  – жесткость пружины в горизонтальном шарнире.

Уравнение (20) также как и уравнения колебаний лопастей с положительными и отрицательными выносами шарниров (7) можно представить в виде:

$$J_{\text{ГШ}} \frac{d^2\beta}{dt^2} + J_{\text{ГШ}} \omega^2 v^2 \beta = \int_0^R Tr dr, \quad (21)$$

где:  $v^2$  – квадрат безразмерной частоты собственных маховых колебаний лопасти относительно ГШ:

для уравнения (7) 
$$v^2 = 1 + (S_{\text{ГШ}} l_{\text{ГШ}}) / J_{\text{ГШ}}, \quad (22)$$

для уравнения (20) 
$$v^2 = 1 + K_{\beta} / (J_{\text{ГШ}} \omega^2). \quad (23)$$

Соотношения (22)-(23) позволяют подобрать величину жёсткости пружины в ГШ для эквивалентного винта, которая обеспечивает такую же величину частоты собственных колебаний его лопастей  $v$ , как и у лопастей винтов с ПВШ или ОВШ. Очевидно, что для исследования винтов с ОВШ жёсткость пружины в ГШ у эквивалентного винта должна быть отрицательной величиной. Таким образом, используя только один обобщённый параметр – безразмерную частоту собственных маховых колебаний лопасти, мы сможем оценить влияние различных параметров винта на углы атаки наступающей и отступающей лопастей и тем самым на срывные характеристики винта.

Решение уравнения (21) можно получить с помощью метода, используемого в работе [5] для решения уравнения махового движения абсолютно жёсткой, прямоугольной в плане, незакрученной лопасти с нулевым выносом ГШ, без регулятора взмаха и с равномерным распределением по ометаемому диску индуктивных скоростей. Угол взмаха лопасти  $\beta$  задаётся в виде (11), а угол установки  $\varphi$  и скорости притекания потока в сечении лопасти  $U_x$  и  $U_y$  задаются в виде следующих выражений:

$$\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi}_1 \cos \psi - \bar{\varphi}_1 \sin \psi. \quad (24)$$

$$U_x = r\omega + \mu R\omega \sin \psi, \quad (25)$$

$$U_y = \lambda R\omega - r \frac{d\beta}{dt} - \mu R\omega \beta \cos \psi, \quad (26)$$

где:  $\psi$  – угол азимутального положения лопасти,  $\omega$  – угловая скорость вращения винта,  $\mu$  – характеристика режима полёта,  $\lambda$  – коэффициент протекания.

Элементарная подъёмная сила  $dT$  в сечении лопасти вычисляется по формуле:

$$dT = \frac{1}{2} b \rho \alpha_{\infty} (\varphi U_x^2 + U_x U_y) dr, \quad (27)$$

где:  $r$  – радиус сечения лопасти,  $b$  – хорда лопасти,  $\rho$  – массовая плотность воздуха,  $\alpha_{\infty}$  – производная коэффициента подъёмной силы в сечении лопасти по углу атаки.

Подставляя выражение (11) в (26), а выражения (25), (26) и (24) в (27) и подставляя затем выражения (27) и (11) в уравнение (21), после некоторых преобразований получим систему уравнений для определения коэффициентов махового движения лопасти  $a_0$ ,  $a_1$  и  $b_1$  при  $v^2 \neq 1$ :

$$a_0 = \frac{\gamma}{v^2} \left[ \frac{1}{4} \varphi_0 (1 + \mu^2) + \frac{1}{3} \lambda - \frac{1}{3} \mu \bar{\varphi}_1 \right]; \quad (28)$$

$$a_1 = \frac{\frac{1}{8} \gamma^2 \mu \left( 1 + \frac{\mu^2}{2} \right) \cdot \left( \lambda + \frac{4}{3} \varphi_0 - \bar{\varphi}_1 \mu \right)}{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) + (v^2 - 1)^2} - \quad (29)$$

$$- \frac{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) \bar{\varphi}_1}{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) + (v^2 - 1)^2} + \frac{\gamma \left[ \frac{1}{3} \mu a_0 + \frac{1}{4} \bar{\varphi}_1 \left( 1 + \frac{\mu^2}{2} \right) \right] (v^2 - 1)}{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) + (v^2 - 1)^2};$$

$$b_1 = \frac{\gamma^2 \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{\mu^2}{2} \right) \left( \frac{1}{3} a_0 \mu \right)}{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) + (v^2 - 1)^2} + \frac{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) \bar{\varphi}_1}{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) + (v^2 - 1)^2} - \quad (30)$$

$$- \frac{\gamma \left[ \left( \frac{1}{2} \lambda + \frac{2}{3} \varphi_0 \right) \mu - \bar{\varphi}_1 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{8} \mu^2 \right) \right] (v^2 - 1)}{\frac{1}{16} \gamma^2 \left( 1 - \frac{\mu^4}{4} \right) + (v^2 - 1)^2};$$



где:  $\gamma = \frac{b\rho a_\infty R^4}{2J_{\text{гш}}}$  – массовая характеристика лопасти.

Отличие полученных таким путём уравнений от известных уравнений из работы [5], состоит только в том, что они содержит члены, зависящие от безразмерной частоты собственных маховых колебаний лопасти. В случае, когда  $v^2 = 1$  выражения (28), (29) и (30) переходят в известные выражения для коэффициентов махового движения лопастей  $a_0$ ,  $a_1$  и  $b_1$  шарнирного винта с  $\bar{l}_{\text{гш}} = 0$ , приведённые в работе [5]:

$$a_0 = \gamma \left[ \frac{1}{4} \varphi_0 (1 + \mu^2) + \frac{1}{3} \lambda - \frac{1}{3} \mu \bar{\varphi}_1 \right], \quad (31)$$

$$a_1 = \frac{2\mu \cdot \left( \lambda + \frac{4}{3} \varphi_0 - \bar{\varphi}_1 \mu \right)}{\left( 1 - \frac{\mu^2}{2} \right)} - \bar{\varphi}_1, \quad (32)$$

$$b_1 = \frac{4a_0\mu}{3 \left( 1 + \frac{\mu^2}{2} \right)} + \bar{\varphi}_1. \quad (33)$$

Выражения (28)-(30) могут быть использованы для расчётов углов атаки в сечениях лопастей. Для этого представим выражение угла атаки  $\alpha_r$  в сечении  $r$  лопасти в виде:

$$\alpha_r = \varphi + \operatorname{arctg} \frac{U_y}{U_x} \approx \varphi + \frac{U_y}{U_x}, \quad (34)$$

и продифференцировав выражение (11) по времени, получим:

$$\frac{d\beta}{dt} = a_1 \omega \sin \psi - b_1 \omega \cos \psi. \quad (35)$$

Подставив выражение (11) и (35) в формулу (26), а выражения (25) и (26) в (34) после некоторых преобразований получим выражение угла атаки в сечении лопасти на радиусе  $r$ :

$$\alpha_r = \varphi + \frac{\lambda - a_1 \bar{r} \sin \psi + [b_1 \bar{r} - \mu(a_0 - a_1 \cos \psi - b_1 \sin \psi)] \cos \psi}{\bar{r} + \mu \sin \psi}. \quad (36)$$

Выражения (28)-(30), (36) позволяют получить удовлетворительные результаты при расчётах махового движения лопастей с положительными и отрицательными выносами горизонтальных шарниров.

### **Результаты расчётов по влиянию собственной частоты и циклического управления винта на углы атаки наступающей и отступающей лопастей**

Как отмечалось ранее для оценки характеристик винтов с ПВШ и ОВШ использовались расчёты эквивалентного винта с нулевыми выносами шарниров, снабжённого пружиной в ГШ, обеспечивающей такую же частоту собственных маховых колебаний лопастей, как у лопастей указанных винтов. Для расчётного анализа был выбран винт со следующими характеристиками: диаметр винта  $D=4$  м; регулятор взмаха нулевой, хорда лопасти  $b=0,12$  м; массовая плотность воздуха  $\rho=0,125$  кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>; производная коэффициента подъёмной силы в сечении лопасти по углу атаки  $\alpha_\infty=5,7$ ; окружная скорость лопасти  $\omega R=210$  м/с; число лопастей  $k_L=4$ ; заполнение  $\sigma=0,06875$ .

Исследования проводились на скорости полёта  $V=80$  м/с, которая примерно равна максимальной скорости полёта современных вертолётов. На такой скорости полёта у современных вертолётов (с относительной нагрузкой на винт равной  $C_t/\sigma \approx 0,14$ ) практически отсутствует срыв потока на отступающих лопастях, который не учитывается в вышеизложенной методике расчёта углов атаки лопастей.

Рассмотрены четыре типа винтов с идентичными лопастями:

1) винт с нулевым выносом горизонтальных шарниров  $\bar{l}_{\text{ГШ}}=0$ ; статический момент лопасти  $S_{\text{ГШ}} = 3,756 \text{ кг} \cdot \text{м}$ ; момент инерции лопасти  $J_{\text{ГШ}} = 3,2256 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; массовая характеристика лопасти  $\gamma=2,08$ ; безразмерная частота собственных маховых колебаний лопасти относительно ГШ  $\nu = 1$ ;

2) винт с положительным выносом горизонтальных шарниров  $\bar{l}_{\text{ГШ}} = +0,1$ ; статический момент лопасти  $S_{\text{ГШ}} = 2,6 \text{ кг} \cdot \text{м}$ ; момент инерции лопасти  $J_{\text{ГШ}} = 3,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; массовая характеристика лопасти  $\gamma=2,157$ ;  $\nu = 1,08$ ;

3) винт с отрицательным выносом горизонтальных шарниров  $\bar{l}_{\text{ГШ}} = -0,1$ ; статический момент лопасти  $S_{\text{ГШ}} = 3,756 \text{ кг} \cdot \text{м}$ ; момент инерции лопасти  $J_{\text{ГШ}} = 3,5724 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; массовая характеристика лопасти  $\gamma = 1,8783$ ;  $\nu = 0,89$ .

Все расчёты проведены при одинаковых величинах относительных коэффициентов подъёмной силы  $C_y/\sigma = 0,12$  и силы сопротивления винта  $C_x/\sigma = -0,0095$  вычисленные в скоростной системе координат, которые получены соответствующим выбором углов атаки  $\alpha_{\text{НВ}}$  и общего шага винта  $\varphi_0$ . Коэффициенты силы тяги и продольной силы винта определялись следующим образом:

$$C_t/\sigma = C_y/\sigma \cdot \cos\alpha_{\text{НВ}} + C_x/\sigma \cdot \sin\alpha_{\text{НВ}},$$

$$C_h/\sigma = C_x/\sigma \cdot \cos\alpha_{\text{НВ}} - C_y/\sigma \cdot \sin\alpha_{\text{НВ}}.$$

Расчёты проводились с двумя вариантами управления шагом лопасти:

- 1) угол установки лопасти не изменяется по азимуту  $\varphi = \varphi_0$ ;
- 2) угол установки лопасти изменяется по азимуту следующим образом:

$$\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi} \cos(\psi), \quad (37)$$

где  $\bar{\varphi} = \pm 0,1 \text{ рад} \approx \pm 5,73^\circ$ .

При расчётах по формулам (28)-(30) определялись коэффициенты махового движения и затем по формулам (11) и (36) определялись углы взмаха и углы атаки в сечении лопасти на относительном радиусе  $r/R = 0,87$  в зависимости от азимутального положения лопасти.

Результаты расчёта шарнирного НВ с нулевым выносом ГШ ( $\nu = 1$ ) при нейтральном положении автомата перекоса и с управлением циклическим шагом лопастей НВ по закону (37) приведены на рисунке 6.

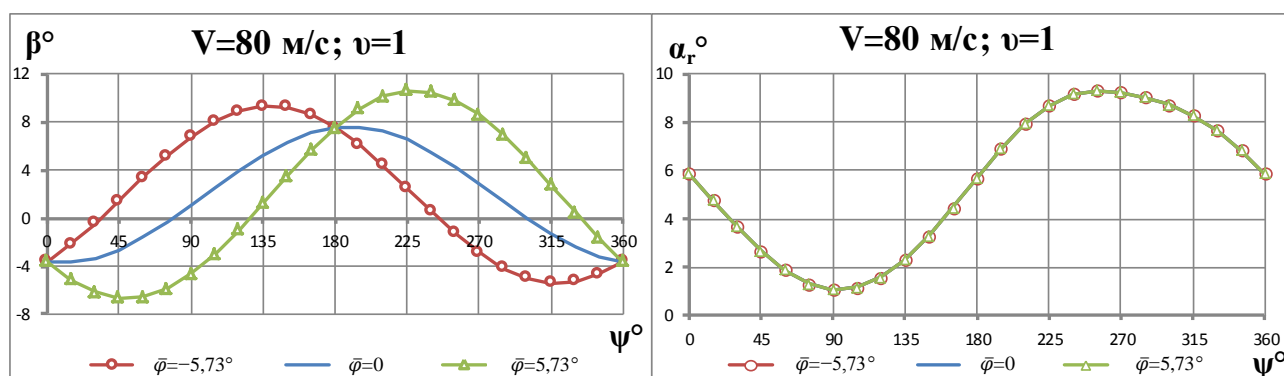


Рисунок 6 – Влияние управления циклическим шагом по закону  $\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi} \cos \psi$

НВ на маховое движение и углы атаки лопасти в сечении  $\bar{r} = 0,87$  при нулевом выносе ГШ

Из рисунка 6 видно, что управление циклическим шагом по косинусной гармонике существенно влияет на величину углов взмаха на азимутах 90 и 270 градусов, но практически не влияет на изменение углов атаки лопасти по азимуту. Этот результат согласуется с теорией винта вертолёта с нулевым выносом ГШ,

приведённой в работе [5], согласно которой углы атаки лопасти, возникающие из за изменения шага лопасти, полностью компенсируются вертикальными скоростями в сечениях лопасти, вследствие изменений её махового движения.

На рисунке 7 показано изменение по азимуту углов взмаха и углов атаки в сечении лопасти на относительном радиусе  $\bar{r} = 0,87$ , при нейтральном положении АП  $\varphi = \varphi_0$ , первых трёх вариантов рассматриваемых винтов с различными собственными частотами махового колебаний лопастей. Из рисунка видно, что изменение выноса ГШ и соответственно собственной частоты маховых колебаний лопасти мало влияет на величину амплитуды махового движения, но заметно влияет на характер изменения угла взмаха  $\beta$  лопасти по азимуту. Так, при отрицательном выносе ГШ ( $\nu = 0,89$ ), угол взмаха достигает максимума на азимуте  $\psi \approx 210^\circ$ , при нулевом выносе ГШ ( $\nu = 1$ ) на азимуте  $\psi \approx 190^\circ$ , а при положительном выносе ГШ ( $\nu = 1,08$ ) на азимуте  $\psi \approx 165^\circ$ . На азимуте  $\psi = 270^\circ$ , при отрицательном и положительном выносе ГШ углы атаки в сечении лопасти соответственно на 2 и на 0,3 градуса меньше, чем у лопасти с нулевым выносом ГШ.

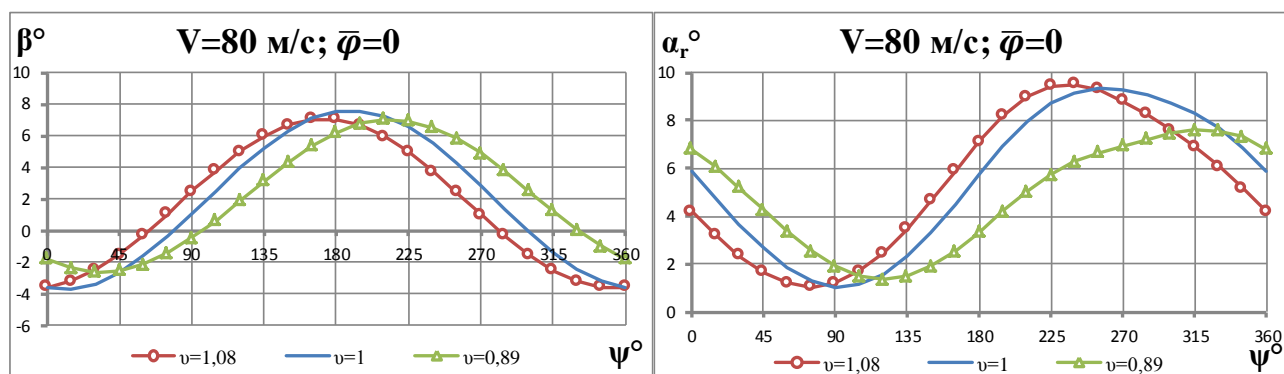


Рисунок 7 – Влияние выноса ГШ на маховое движение и углы атаки в сечении

$\bar{r} = 0,87$  при нейтральном положении АП

На рисунке 8 показано изменение по азимуту углов взмаха лопасти  $\beta$  и углов атаки в сечении лопасти  $\bar{r} = 0,87$  для 1 варианта винта при нейтральном положении АП, а для вариантов 2 и 3 при законе управления шагом лопасти  $\varphi = \varphi_0 - \bar{\varphi}\cos(\psi)$  ( $\bar{\varphi} = -5,73^\circ$  для 2 варианта,  $\bar{\varphi} = +5,73^\circ$  для 3 варианта).

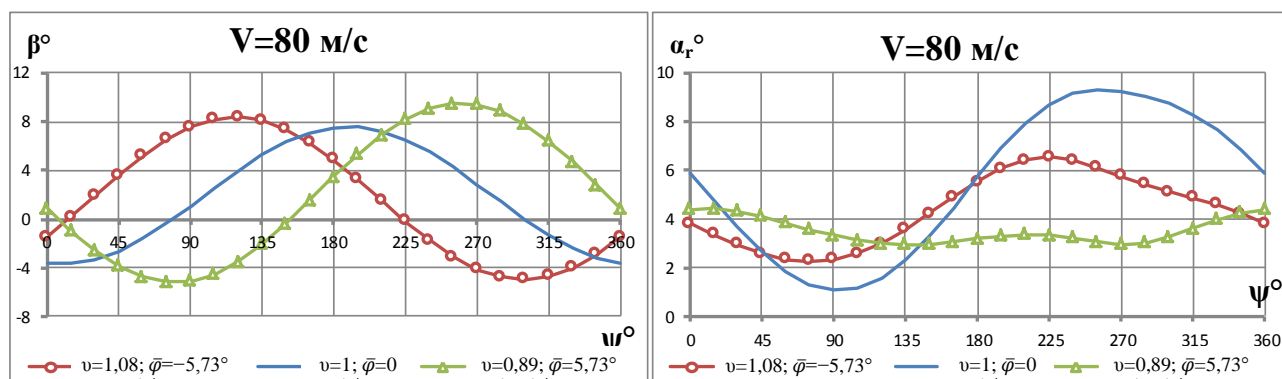


Рисунок 8 – Влияние выноса ГШ на маховое движение и углы атаки в сечении

$\bar{r} = 0,87$  при отклонённом положении АП

Анализ зависимостей на рисунке 8 показывает, что на винте с ОВШ при управлении циклическим шагом по закону  $\varphi = \varphi_0 - 5,73^\circ\cos(\psi)$  угол атаки в сечении  $\bar{r} = 0,87$  на азимуте  $\psi = 270^\circ$  приблизительно на  $6^\circ$  меньше, а на азимуте  $\psi = 90^\circ$  на  $2,3^\circ$  больше чем на винте с нулевым выносом ГШ. На винте с ПВШ при управлении циклическим шагом по закону  $\varphi = \varphi_0 + 5,73^\circ\cos(\psi)$  угол атаки в сечении  $\bar{r} = 0,87$  на азимуте  $\psi = 270^\circ$  приблизительно на  $3^\circ$  меньше, а на азимуте  $\psi = 90^\circ$  на  $1,8^\circ$  больше чем на винте с нулевым выносом ГШ. Так же можно отметить, что для уменьшения углов атаки на отстающих лопастях у винта с ОВШ необходимо увеличивать управление по первой косинусной гармонике ( $\bar{\varphi} > 0$ ), а для винта с ПВШ – уменьшать ( $\bar{\varphi} < 0$ ).

Моменты относительно центра тяжести вертолѐта от боковой силы  $M_{xS}$ , на втулке винта  $M_{x0}$  и суммарный поперечный момент  $M_{xЦМ}$ , соответственно рассчитанные по формулам (16), (14) и (18), в зависимости от модуля управления по первой косинусной гармонике  $\bar{\varphi}$ , приведены на рисунке 9. При расчѐте момента от боковой силы  $M_{xS}$ , расстояние по вертикали от центра втулки до центра масс вертолѐта было принято равным  $y_{НВ} = 0,25R$ .

Видно, что в отличии от винта с ПВШ, у НВ с ОВШ момент от боковой силы  $M_{xS}$  и момент на втулке винта  $M_{x0}$ , имеют разные знаки, и поэтому величина суммарного поперечного момента  $M_{xЦМ}$  у вертолѐта с ОВШ меньше, чем у вертолѐта с ПВШ при больших величинах управления по первой косинусной гармонике.

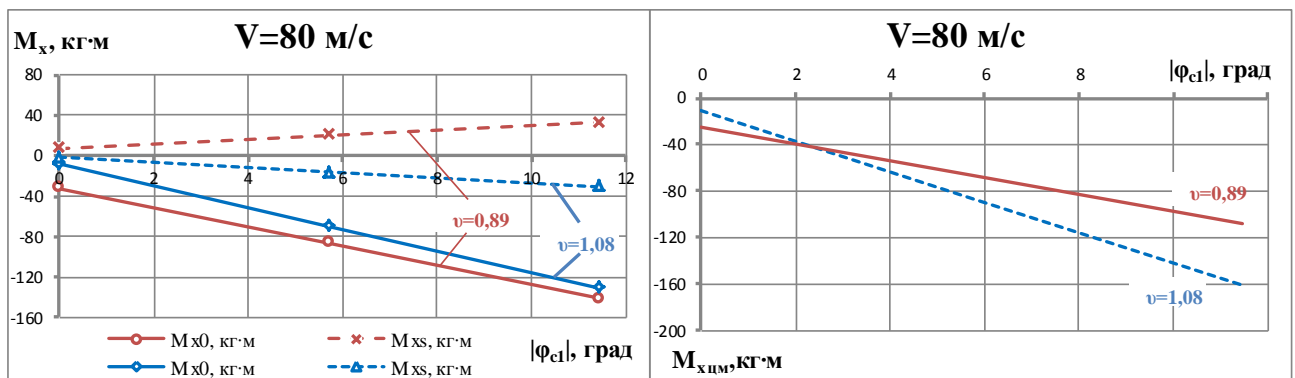


Рисунок 9 – Зависимости момента крена от боковой силы, момента крена на втулке и суммарного продольного момента относительно центра тяжести вертолѐта от модуля величины управления по первой косинусной гармонике

## Заключение

Подводя итог проведённого анализа, можно констатировать следующее:

1. Предварительное исследование работы нового типа скоростных НВ с ОВШ показало, что такие винты, как и винты с большим положительным выносом ГШ, обеспечивают при соответствующем наклоне кольца АП возможность уменьшения углов атаки на отступающих лопастях.

2. Установлено, что у винтов с ОВШ, в отличие от существующих винтов вертолётов, момент крена, создаваемый боковой силой НВ относительно центра масс вертолёта противоположен по знаку моменту крена на втулке винта.

3. На основании расчётов модели несущего винта с ОВШ, на режиме  $\bar{V} = 0,38$  установлено, что при управлении углом установки лопасти по закону  $\varphi = \varphi_0 - 5,73^\circ \cos(\psi)$  угол атаки в сечении отступающей лопасти на относительном радиусе  $\bar{r} = 0,87$  уменьшается приблизительно на  $6^\circ$  с одновременным увеличением угла атаки наступающей лопасти приблизительно на  $2^\circ$  по сравнению с углами атаки в сечениях лопастей винта с нулевым выносом ГШ.

4. Определено, что винт с ОВШ имеет более благоприятное распределение углов атаки в сечениях лопастей по сравнению с винтом ПВШ.

## Библиографический список

1. Анимица В.А., Борисов Е.А., Леонтьев В.А., Новак В.Н. Втулка несущего винта вертолёта. Патент на полезную модель №126679. 10.04.2013.



2. Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г. Исследование аэродинамических характеристик профиля и законцовок лопасти несущего винта вертолѐта методами CFD // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30874>
3. Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолѐта методом CFD // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30875>
4. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Программный комплекс для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолетов на базе нелинейной лопастной вихревой теории // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=14148>
5. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С., Гродко Л.Н., Лейканд М.А. Вертолѐты. Расчѐт и проектирование. Аэродинамика. - М.: Машиностроение, 1966. Т.1. - 457 с.
6. Пейн П.Р. Динамика и аэродинамика вертолѐта. - М.: Оборонгиз, 1963. - 491 с.
7. Bramwell A.R.S., Done G., Balmford D., Reston V.A: Bramwell's Helicopter Dynamics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001, 373 p.