

У. Джонсон

Теория вертолета

Том I

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
У11

У11 **У. Джонсон**
Теория вертолета: Том I / У. Джонсон – М.: Книга по Требованию, 2012. – 502 с.

ISBN 978-5-458-28013-6

Монография известного инженера-вертолетчика. Наиболее полное на начало 1980 г. изложение теории и методов расчета вертолетов различных схем.

ISBN 978-5-458-28013-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКОВ

Вертолеты нашли широкое применение в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве, военном деле. Они незаменимы для сообщения с трудно-доступными районами, при тушении пожаров, спасении людей во время стихийных бедствий и т. д. Универсальность применения вертолетов объясняется тем, что они могут использоваться в широкой области полетных режимов, включая висение, и не требуют специально оборудованных площадок для взлета и посадки.

Без тщательного расчетного анализа на стадии проектирования, проводимого с широким использованием быстродействующих вычислительных машин, создание современного вертолета невозможно. Это объясняется как сложностью явлений обтекания несущего винта, так и связью аэродинамических нагрузок лопасти с ее движением и деформациями, а также движением вертолета в целом.

Предлагаемая вниманию читателей монография известного американского специалиста по вертолетам представляет собой наиболее полное на сегодняшний день изложение теории вертолета, включающее целую иерархию математических моделей аэродинамики, динамики, аэроупругости, управляемости и устойчивости движения вертолета. При изложении аэродинамики несущего винта много места отведено классическим схемам импульсной теории винта. Рассмотрены модели вихревой теории, которые допускают аналитическое решение, хотя бы приближенное. Впервые так полно излагаются теория обтекания лопасти нестационарным потоком с учетом повторного влияния вихревого следа и методы расчета шума, создаваемого вертолетом. Вопросы динамики лопастей несущего винта рассмотрены в книге весьма подробно вплоть до использования наиболее сложного представления движения дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. При исследовании динамики несущего винта и вертолета в целом автор, отступая от традиционной формы изложения, широко пользуется весьма уместным здесь математическим аппаратом теории автоматического управления.

Книга вообще написана своеобразно. Большинство вопросов автор излагает неоднократно, но каждый раз все более подробно. В результате каждую главу можно читать практически независимо. Такой подход способствует творческому усвоению материала студентами, а квалифицированным специалистам позволяет начать изучение проблем с желаемого уровня их детализации.

В книге приведена обширная библиография, содержащая почти 1800 названий. К сожалению, в ней не нашла достаточного отражения отечественная литература по вертолетам. Поэтому переводчики сочли целесообразным привести дополнительный список публикаций, который в совокупности с основным дает более полную картину исследований в вертолетостроении. При

переводе книги были также устранены или отмечены некоторые неточности в формулировках и математических выкладках.

По широте охвата, глубине рассмотрения и методу изложения материала книга У. Джонсона представляет собой значительное явление в литературе по вертолетам. Ее можно рассматривать и как учебное пособие, и как подробный справочник, своего рода энциклопедию по теории вертолета. Несомненно, эта книга будет полезна научным работникам и инженерам вертолетной промышленности, а также студентам старших курсов и аспирантам соответствующих специальностей.

Гл. 1—6 переведены В. С. Капланом, гл. 7—9, 11, 12, 14, 15—С. Ю. Есауловым, гл. 10, 13, 16, 17 — В. Э. Баскиным.

В. Э. Баскин, С. Ю. Есаулов, В. С. Каплан

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Ниже приведены основные обозначения, использованные в книге. В список не включены обозначения, встречающиеся только в одной главе. Очень часто используются безразмерные величины, масштабами которых служат плотность ρ воздуха, частота вращения Ω несущего винта и его радиус R (см. также разд. 1.3).

- a — производная подъемной силы сечения лопасти по углу атаки;
- $A = \pi R^2$ — площадь диска несущего винта;
- $A_d = N c R = \sigma A$ — суммарная площадь лопастей в плане;
- B — коэффициент концевых потерь;
- c — длина хорды лопасти;
- C — функция уменьшения подъемной силы Теодорсена;
- C' — функция уменьшения подъемной силы Лоуи;
- $c_d = D/(\rho U^2 c/2)$ — коэффициент сопротивления сечения лопасти;
- $C_H = H/[\rho A (\Omega R)^2]$ — коэффициент продольной силы;
- $c_l = L/(\rho U^2 c/2)$ — коэффициент подъемной силы сечения лопасти;
- $c_m = M_a/(\rho U^2 c^2/2)$ — коэффициент аэродинамического момента сечения лопасти;
- $C_{M_x} = M_x/[\rho A R (\Omega R)^2]$ — коэффициент момента крена;
- $C_{M_y} = M_y/[\rho A R (\Omega R)^2]$ — коэффициент момента тангажа;
- $C_P = P/[\rho A (\Omega R)^3]$ — коэффициент мощности;
- C_{Pc} — коэффициент мощности, затрачиваемой на набор высоты;
- C_{Pi} — коэффициент индуктивной мощности;
- C_{Po} — коэффициент профильной мощности;
- $C_{P_{вр}}$ — коэффициент мощности, затрачиваемой на преодоление вредного сопротивления;
- $C_Q = Q/[\rho A R (\Omega R)^2]$ — коэффициент аэродинамического крутящего момента;
- $c_{зв}$ — скорость звука;
- $C_T = T/[\rho A (\Omega R)^2]$ — коэффициент силы тяги;
- $C_Y = Y/[\rho A (\Omega R)^2]$ — коэффициент поперечной силы;
- D — аэродинамическое сопротивление сечения лопасти; сопротивление вертолета;

- e — безразмерный относ. ГШ или ВШ;
 EI, EI_{zz} — жесткость лопасти на изгиб в плоскости взмаха;
 EI_{xx} — жесткость лопасти на изгиб в плоскости хорд;
 $f = D/(\rho V^2/2)$ — площадь эквивалентного сопротивления фюзеляжа и втулки вертолета;
 F_r — радиальная аэродинамическая сила в сечении лопасти;
 F_x — составляющая аэродинамической силы сечения, параллельная плоскости диска;
 F_z — составляющая аэродинамической силы сечения, нормальная к плоскости диска;
 g — ускорение силы тяжести;
 GJ — жесткость на кручение;
 h — превышение центра втулки над центром масс вертолета;
 H — продольная сила несущего винта (направлена назад); коэффициент аэродинамической перерезывающей силы лопасти в плоскости вращения (употребляется с индексом);
 I_π — характеристика инерционных свойств лопасти
 (обычно $I_\pi = \int_0^R mr^2 dr$) или момент инерции лопасти относительно оси ГШ;
 $k_f = \int_0^R I_\theta dr$ — инерционная характеристика лопасти в установочном движении (по углу установки);
 $I_{pk} = \int_0^R \eta_k^2 I_\theta dr$ — обобщенная масса при крутильных колебаниях лопасти по k -му тону;
 $k_{qk}, I_{\beta k} \left(= \int_0^R \eta_{zk}^2 m dr \right)$ — обобщенная масса при изгибных колебаниях лопасти по k -му тону в плоскости взмаха;
 I_x — момент инерции вертолета относительно продольной оси; коэффициент инерционной связи шага со взмахом $\left(\int_0^R x_1 r m dr \right)$;
 I_y — момент инерции вертолета относительно поперечной оси;
 I_z — момент инерции вертолета относительно вертикальной оси;

$I_\beta = \int_0^R \eta_\beta^2 m dr$ — обобщенная масса в маховом движении

лопасти по основному тону;

$I_{\beta a} = \int_0^R \eta_\beta m r dr$ — коэффициент инерционной связи махового движения лопасти и движения втулки;

$I_{\beta \xi} = \int_0^R \eta_\beta \eta_\xi m dr / (1 - e)$ — коэффициент кориолисовой связи махового движения и качания лопасти;

$I_\xi = \int_0^R \eta_\xi^2 m dr$ — обобщенная масса в качании лопасти по основному тону;

$I_{\xi k} = \int_0^R \eta_{\xi k}^2 m dr$ — обобщенная масса изгибных колебаний лопасти по k -му тону в плоскости диска;

$I_{\xi a} = \int_0^R \eta_\xi m r dr$ — коэффициент инерционной связи качания лопасти и движения втулки;

I_θ — момент инерции сечения относительно продольной оси лопасти;

$I_\theta = \int_0^R m r^2 dr$ — момент инерции лопасти относительно оси вала;

$k = \omega b / U$ — приведенная частота (ω — частота, b — половина длины хорды профиля, U — скорость невозмущенного потока);

$k_x = \sqrt{I_x / M}$ — радиус инерции вертолета относительно продольной оси;

$k_y = \sqrt{I_y / M}$ — радиус инерции вертолета относительно поперечной оси;

$k_z = \sqrt{I_z / M}$ — радиус инерции вертолета относительно вертикальной оси;

$K_P, K_{P\beta}$ — коэффициент компенсации взмаха [входит в формулу $\Delta\theta = -K_P\beta$ ($K_P = \tan \delta_3$), положителен при взмахе лопасти вверх и отклонении ее носка вниз];

$K_{P\xi}$ — коэффициент компенсации качания [входит в формулу $\Delta\theta = -K_{P\xi}\xi$, положителен при отклонении лопасти назад, а ее носка — вниз];

- K_{β} — жесткость пружины в ГШ;
 K_{ζ} — жесткость пружины в ОШ;
 K_{θ} — жесткость пружины в системе управления;
 L — подъемная сила сечения лопасти; производная устойчивости вертолета при крене (употребляется с индексами);
 $l_{p. в}$ — расстояние между осями несущего и рулевого винтов;
 $m = 1, 2, \dots N$ — номер лопасти; коэффициент аэродинамического момента тангажа (употребляется с индексом); погонная масса лопасти;
 M — коэффициент совершенства несущего винта ($= C_T^{3/2} / (\sqrt{2} C_P)$); число Маха в сечении лопасти; масса вертолета, включающая массу несущего винта; производная устойчивости вертолета при тангаже (употребляется с индексом); аэродинамический коэффициент в выражении момента относительно оси ГШ (употребляется с индексом);
 $\dot{m}$ — массовый расход воздуха через диск несущего винта (используется в импульсной теории);
 M_a — аэродинамический момент сечения лопасти;
 $M_{л} = \int_0^R m dr$ — масса лопасти;
 M_f — аэродинамический момент относительно продольной оси лопасти (установочный момент);
 M_F — аэродинамический момент в плоскости взмаха (момент взмаха);
 M_L — аэродинамический момент в плоскости вращения (момент качания);
 $M_k = \Omega R / c_{зв}$ — концевое число Маха;
 M_x — момент крена на втулке несущего винта (положителен, когда наклоняет винт в сторону отступающей лопасти);
 M_y — момент тангажа на втулке несущего винта (положителен, когда наклоняет винт назад);
 $M_{1.90}$ — число Маха в концевом сечении лопасти на азимуте 90° ;
 N — число лопастей; производная устойчивости вертолета при рыскании (употребляется с индексом);
 $N_* = (v_{эф}^2 - 1) / (-v M_{\beta}) = (8/v)(v^2 - 1) + K_P$ — параметр продольно-поперечной связи для махового движения лопасти;

N_F — момент в корневой части лопасти, действующий в плоскости взмаха;

N_L — момент в корневой части лопасти, действующий в плоскости диска;

p — звуковое давление;

P — мощность на валу несущего винта;

p_k — обобщенная координата крутильных колебаний по k -му тону (p_0 — угол поворота как твердого тела);

Q — аэродинамический крутящий момент несущего винта (положителен, когда для вращения винта нужно приложить крутящий момент двигателя); коэффициент аэродинамического момента лопасти относительно оси вала или оси ВШ (употребляется с индексом);

q_k, q_{zk} — обобщенная координата изгибных колебаний лопасти по k -му тону в плоскости взмаха;

q_{xk} — обобщенная координата изгибных колебаний по k -му тону в плоскости диска;

r — радиальная координата сечения лопасти или на диске несущего винта;

R — радиус несущего винта; коэффициент аэродинамической радиальной перерезывающей силы (употребляется с индексом);

s — собственное значение или оператор Лапласа;

$S_n = \int_0^R mr \, dr$ — статический момент лопасти;

S_r — радиальная перерезывающая сила в корне лопасти;

S_x — перерезывающая сила в корневой части лопасти, параллельная плоскости диска;

S_z — вертикальная перерезывающая сила в корневой части лопасти;

$S_\beta = \int_0^R m\eta_\beta \, dr$ — статический момент, учитывающий форму изгиба лопасти в плоскости взмаха;

$S_\zeta = \int_0^R m\eta_\zeta \, dr$ — статический момент, учитывающий форму изгиба лопасти в плоскости диска;

t — время;

T — сила тяги несущего винта; коэффициент силы тяги лопасти (употребляется с индексом);

T/A — нагрузка на диск;

T/A_n — нагрузка на лопасть;

$U = (u_T^2 + u_P^2)^{1/2}$ — результирующая скорость в сечении лопасти;

u_{Π} — продольная составляющая скорости порыва;

u_P — перпендикулярная плоскости диска составляющая скорости потока, обтекающего сечение лопасти;

u_R — радиальная составляющая скорости потока, обтекающего сечение лопасти;

u_T — параллельная плоскости диска составляющая скорости потока, обтекающего сечение лопасти;

v — индуктивная скорость в плоскости диска (направлена вниз);

V — скорость перемещения несущего винта или вертолета относительно воздуха;

v_{Π} — поперечная составляющая скорости порыва;

$v_B = \sqrt{T/(2\rho A)}$ — идеальная индуктивная скорость на режиме висения;

w — индуктивная скорость в дальнем следе;

W — полетный вес вертолета;

w_{Π} — вертикальная составляющая скорости порыва;

x — абсцисса в невращающейся системе координат на диске несущего винта (положительна, когда отсчитывается назад); отклонение сечения в плоскости диска; координата в плоскости сечения, отсчитываемая вдоль хорды;

X — производная продольной силы вертолета (употребляется с индексом);

x_A — расстояние по хорде от продольной оси лопасти до центра давления сечения;

x_B — продольное смещение вертолета как твердого тела;

x_{BT} — продольное смещение втулки;

x_I — расстояние по хорде от продольной оси лопасти до центра масс сечения;

y — ордината в невращающейся системе координат на диске несущего винта (положительна, когда отсчитывается вправо, в сторону наступающей лопасти);

Y — поперечная сила несущего винта (направлена в сторону наступающей лопасти); производная поперечной силы вертолета (употребляется с индексом);

y_B — поперечное смещение вертолета как твердого тела;

y_{BT} — поперечное смещение втулки;

- z — аппликата в невращающейся системе координат на диске несущего винта (положительна, когда отсчитывается вверх); отклонение сечения в плоскости взмаха;
 Z — производная вертикальной силы вертолета (употребляется с индексом);
 z_B — вертикальное смещение вертолета как твердого тела;
 $z_{вт}$ — вертикальное смещение втулки;
 α — угол атаки сечения лопасти; угол атаки плоскости диска (положителен при наклоне диска вперед);
 α_x — возмущение положения втулки по крену;
 α_y — возмущение положения втулки по тангажу;
 α_z — возмущение положения втулки по рысканию;
 $\alpha_{1, 270}$ — угол атаки концевое сечения лопасти на азимуте 270° ;
 $\alpha_{\mu+0,4, 270}$ — угол атаки сечения с координатами $r/R = \mu + 0,4$ и $\psi = 270^\circ$;
 β — угол взмаха (положителен при взмахе вверх);
 $\beta_{\text{констр}}$ — конструктивный угол конусности;
 β_{1c} — угол продольного наклона конуса лопастей (положителен при наклоне вперед);
 β_{1s} — угол поперечного наклона конуса лопастей (положителен при наклоне в сторону отступающей лопасти);
 $\gamma = \rho a c R^4 / I_L$ — массовая характеристика лопасти;
 Γ — циркуляция присоединенного вихря;
 $\delta_0, \delta_1, \delta_2$ — коэффициенты в формуле $c_d = \delta_0 + \delta_1 \alpha + \delta_2 \alpha^2$;
 δ_3 — угол, определяющий коэффициент компенсации взмаха ($K_p = \tan \delta_3$);
 ξ — угол качания (положителен, когда лопасть отклоняется противоположно вращению);
 $\xi_{\text{констр}}$ — конструктивный угол отставания;
 η, η_β — форма основного тона махового движения;
 η, η_ξ — форма основного тона качания;
 η_k, η_{2k} — форма изгибных колебаний по k -му тону в плоскости взмаха;
 η_{xk} — форма изгибных колебаний по k -му тону в плоскости диска;
 θ — угол установки лопасти (положителен, когда носок лопасти поднят вверх);
 θ_B — угол тангажа вертолета как твердого тела;
 $\varphi_{уп}$ — угол установки, определяемый управлением (общий и циклический шаги);
 $\varphi_{эфф}$ — угол установки, определяемый упругим кручением лопасти;

- $\theta_{\text{тр}}$ — угол наклона траектории полета (скорость набора высоты $V_c = V \sin \theta_{\text{тр}}$);
 $\theta_{\text{кр}}$ — градиент линейной крутки лопасти;
 θ_0 — общий шаг лопасти;
 θ_{1c}, θ_{1s} — коэффициенты циклического шага лопасти;
 $\theta_{0.75}$ — общий шаг на радиусе $r = 0,75 R$;
 λ — коэффициент протекания [$\lambda = (V \sin \alpha + v)/(\Omega R)$], положителен, когда поток через диск направлен сверху вниз); удлинение лопасти;
 λ_c — коэффициент скорости;
 $\lambda_i = v/(\Omega R)$ — индуктивный коэффициент протекания;
 λ_x — коэффициент продольного изменения индуктивной скорости;
 λ_y — коэффициент поперечного изменения индуктивной скорости;
 λ_0 — коэффициент средней индуктивной скорости;
 $\mu = V \cos \alpha/(\Omega R)$ — характеристика режима работы винта;
 ν, ν_β — собственная частота основного тона махового движения;
 $\nu_{\text{эфф}}, \nu_{\beta\text{эфф}}$ — эффективная собственная частота махового движения при наличии компенсатора взмаха ($\nu_{\text{эфф}}^2 = \nu^2 + \gamma K_p/8$);
 ν_k, ν_{zk} — собственная частота изгибных колебаний по k -му тону в плоскости взмаха;
 ν_{xk} — собственная частота изгибных колебаний по k -му тону в плоскости диска;
 ν_z — собственная частота основного тона качания;
 ξ_k — форма крутильных упругих колебаний по k -му тону;
 ρ — плотность воздуха; радиальная координата при интегрировании по размаху лопасти;
 $\sigma = N\sigma/(\pi R)$ — коэффициент заполнения;
 $\varphi = \arctg(u_p/u_T)$ — угол притекания потока к сечению лопасти;
 φ_B — угол крена вертолета как твердого тела;
 ψ — азимут лопасти или полярная координата на диске винта; безразмерное время ($\psi = \Omega t$);
 ψ_B — угол рыскания вертолета как твердого тела;
 ψ_m — азимут m -й лопасти ($m = 1, 2, \dots, N$);
 $\omega, \omega_0, \omega_\theta$ — собственная частота тангажа вертолета; собственная частота проводки управления;
 ω_k — собственная частота упругих крутильных колебаний по k -му тону;
 Ω — частота вращения несущего винта (рад/с).