

вигации // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. ст. / ред. А. И. Громыко, А. В. Сарафанов ; отв. за вып. В. В. Сухотин, С. И. Трегубов. Красноярск : ИПК СФУ, 2007. С. 185–188.

4. Brown A., Atterberg S., Gerein N. Detection and Location of GPS Interference Sources Using Digital Re-

ceiver Electronics // Proceedings of ION Annual Meeting. San Diego, CA. June, 2000.

5. Тяпкин В. Н., Лубкин И. А. Использование рекуррентных адаптивных алгоритмов для решения задачи подавления активно-шумовых помех в системах спутниковой связи // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 2(28). С. 39–43.

V. N. Tyapkin, D. D. Dmitriev, T. G. Moshkina

POTENTIAL INTERFERENCE IMMUNITY OF NAVIGATION EQUIPMENT OF CUSTOMERS OF SATELLITE RADIO NAVIGATIONAL SYSTEMS

Potential interference immunity of navigation equipment, of a customer of satellite radio navigational systems, is considered, results of experimental researches of interference immunity are presented. A variant of the phased antenna grid with directional antennas, is presented as well.

Keywords: navigation equipment of customers, satellite radio navigational systems, interference immunity.

© Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г., 2012

УДК 629.735.015

Н. У. Ушаков

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ ОТ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАСС ВОЗДУШНОГО СУДНА

Дано теоретическое обоснование алгоритма оценки влияния момента от вращающихся масс воздушного судна (гироскопического момента и момента, вызванного изменением угловой скорости подвижных частей) на динамику движения. Рассмотрен общий случай ориентации вращающихся масс по отношению к связанной системе координат.

Ключевые слова: воздушное судно, вращающиеся массы, математическая модель, момент.

В математических моделях (ММ) динамики полета воздушного судна (ВС) моменты, (гироскопические моменты и моменты, зависящие от изменения угловой скорости подвижных частей), вызванные вращением с большой угловой скоростью подвижных частей двигателей, учитываются для поршневых однодвигательных ВС. Имеется полная ММ, описывающая вращательное движение системы «самолет + винт» [1]. В то же время в ММ многодвигательных ВС, в том числе магистральных ВС типа Ту-204, Ил-96-300 и др., упомянутые моменты, как правило, не учитываются [2; 3]. Общий подход к определению гироскопических моментов от вращающихся масс ВС рассмотрен в ряде работ [4–6]. Отметим, что вопросы движения космических аппаратов с учетом вращающихся масс детально разработаны в многочисленных публикациях, например в монографии Ю. П. Артюкина [7].

Настоящие результаты являются дальнейшим развитием исследований [8; 9].

Постановка задачи. Ставится задача теоретического обоснования математической модели динамики полета ВС, в которой будет учтен момент от вращающихся масс работающих двигателей. Затем на основании применения уточненной математической

модели предстоит количественная оценка влияния момента от вращающихся масс на динамику движения ВС относительно центра масс и в случае его существенного влияния выработка рекомендаций по управлению движением воздушного судна.

При решении задачи считаем, что угловая скорость вращения подвижной части двигателя Ω в общем случае величина переменная $\Omega = \Omega(t)$.

Математическая модель вращательного движения воздушного судна. Основное уравнение динамики движения объекта (твердого тела) относительно центра масс в общем случае имеет вид

$$J \cdot \frac{d\bar{\omega}}{dt} + \bar{\omega} \times J \cdot \bar{\omega} = \bar{M}, \quad (1)$$

где J – тензор инерции тела; $\bar{\omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости вращения тела относительно инерциального пространства; $\frac{d\bar{\omega}}{dt}$ – производная по времени вектора абсолютной угловой скорости; \bar{M} – вектор суммарного момента внешних сил, действующих на тело.

Применяя формулу (1) к воздушному судну, имеющему вращающиеся части (роторы) (см. рисунок), получим выражение для вектора момента ($\bar{M}_{вр\Sigma}$):

$$\bar{M}_{вр\Sigma} = -(J_p \cdot \frac{d\bar{\Omega}}{dt} + \bar{\omega} \times J_p \cdot \bar{\Omega} + \bar{\Omega} \times J_p \cdot \bar{\omega} + \bar{\Omega} \times J_p \cdot \bar{\Omega}), \quad (2)$$

где J_p – тензор инерции ротора относительно начала связанной с ВС системы координат,

$$\bar{\Omega} = \Omega \bar{i}_1, \quad (3)$$

где \bar{i}_1 – орт, направленный по продольной оси ВС.

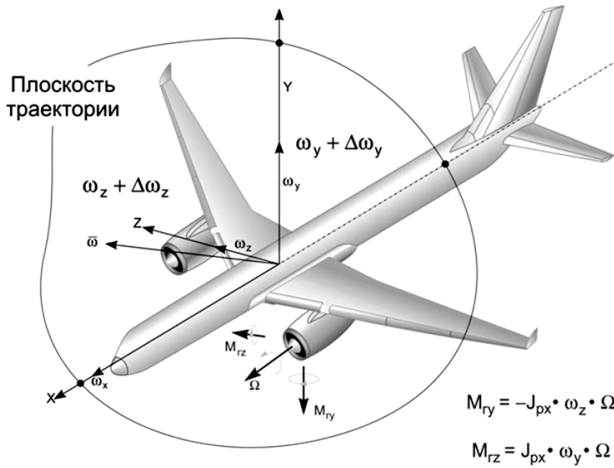


Схема пространственной ориентации ВС с массой, вращающейся с угловой скоростью $\bar{\Omega}$

Учитывая (3), имеем

$$\frac{d\bar{\Omega}}{dt} = \Omega \bar{\omega} \times \bar{i}_1 + \dot{\Omega} \bar{i}_1. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получим выражение для гироскопического момента ($\bar{M}_{Г\Sigma}$):

$$\bar{M}_{Г\Sigma} = -\Omega (J_p \cdot \bar{\omega} \times \bar{i}_1 + \bar{\omega} \times J_p \cdot \bar{i}_1 + \bar{i}_1 \times J_p \cdot \bar{\omega}). \quad (5)$$

В (2) имеем член $\bar{\Omega} \times J_p \cdot \bar{\Omega}$, после соответствующих вычислений можно показать, что

$$\bar{\Omega} \times J_p \cdot \bar{\Omega} = 0.$$

Момент (\bar{M}_{Ω}), вызванный изменением угловой скорости подвижных частей, равен

$$\bar{M}_{\Omega} = -J_p \cdot \dot{\bar{i}}_1 \dot{\Omega}. \quad (6)$$

Рассмотрим возможность ориентации вращающихся масс по отношению к связанной системе координат, заданной ортами \bar{e} . В этом случае производная по времени вектора

$$\bar{\Omega} = \Omega \bar{e}, \quad (6a)$$

$$\frac{d\bar{\Omega}}{dt} = \Omega \bar{\omega} \times \bar{e} + \dot{\Omega} \bar{e}. \quad (6b)$$

Подставляя (6 а) и (6 б) в (5) и (6), получим

$$\bar{M}_{Г\Sigma} = -\Omega (J_p \cdot \bar{\omega} \times \bar{e} + \bar{\omega} \times J_p \cdot \bar{e} + \bar{e} \times J_p \cdot \bar{\omega}). \quad (5a)$$

$$\bar{M}_{\Omega} = -J_p \cdot \dot{\bar{e}} \dot{\Omega}. \quad (6b)$$

Суммарный момент от вращающихся масс равен

$$\bar{M}_{вр\Sigma} = \bar{M}_{Г\Sigma} + \bar{M}_{\Omega}. \quad (7)$$

Представим векторы $\bar{M}_{Г\Sigma}$ и \bar{M}_{Ω} в координатной форме.

Вектор суммарного гироскопического момента $\bar{M}_{Г\Sigma}$ удобно представить в виде двух слагаемых:

$$\bar{M}_{Г\Sigma} = \bar{M}_{Г} + \Delta \bar{M}_{Г}, \quad (8)$$

где $\bar{M}_{Г}$ – вектор гироскопического момента в предположении, что центробежные моменты инерции ротора равны нулю; $\Delta \bar{M}_{Г}$ – составляющая вектора гироскопического момента, вызванная центробежными моментами ротора относительно центра масс ВС.

При совершении в (5) соответствующих вычислений получены следующие выражения для компонентов гироскопического момента от i -го работающего двигателя ВС:

$$M_{iГx} = 0, \quad (9)$$

$$M_{iГy} = (-J_{ipx} - J_{ipy} + J_{ipz}) \cdot \omega_z \cdot \Omega, \quad (10)$$

$$M_{iГz} = (J_{ipx} - J_{ipy} + J_{ipz}) \cdot \omega_y \cdot \Omega, \quad (11)$$

$$\Delta M_{iГx} = -\Omega (J_{ipxz} \omega_y - J_{ipxy} \omega_z), \quad (12)$$

$$\Delta M_{iГy} = -\Omega J_{ipyz} \omega_y, \quad (13)$$

$$\Delta M_{iГz} = \Omega J_{ipyz} \omega_z, \quad (14)$$

где $M_{Г\Sigma x}$, $M_{Г\Sigma y}$, $M_{Г\Sigma z}$ – компоненты вектора $\bar{M}_{Г\Sigma}$ гироскопического момента в связанной с ВС системе координат; ω_y , ω_z – угловые скорости рыскания и тангажа соответственно; J_{ipx} , J_{ipy} , J_{ipz} – моменты инерции ротора i -го двигателя относительно связанных с ВС осей координат; J_{ipxy} , J_{ipxz} , J_{ipyz} – центробежные моменты инерции ротора i -го двигателя.

Для n работающих двигателей имеем

$$M_{\Sigma Гx} = \sum_{i=1}^n M_{iГx}, \quad (15)$$

$$M_{\Sigma Гy} = \sum_{i=1}^n M_{iГy}, \quad (16)$$

$$M_{\Sigma Гz} = \sum_{i=1}^n M_{iГz}. \quad (17)$$

Вектор \bar{M}_{Ω} также представим в виде двух слагаемых:

$$\bar{M}_{\Omega} = \bar{M}_{\Omega 0} + \Delta \bar{M}_{\Omega}, \quad (18)$$

где $\bar{M}_{\Omega 0}$ – вектор момента, вызванного изменением угловой скорости Ω , в предположении, что центробежные

моменты инерции ротора равны нулю; $\Delta \bar{M}_{\Omega}$ – составляющая вектора \bar{M}_{Ω} , вызванная центробежными моментами ротора относительно центра масс ВС;

$$\bar{M}_{i\Omega 0x} = -J_{ipx} \cdot \dot{\Omega}, \quad (19)$$

$$\bar{M}_{i\Omega 0y} = 0, \quad (20)$$

$$\bar{M}_{i\Omega 0z} = 0, \quad (21)$$

$$\Delta M_{i\Omega x} = 0, \quad (22)$$

$$\Delta M_{i\Omega y} = J_{ipxy} \cdot \dot{\Omega}, \quad (23)$$

$$\Delta M_{i\Omega z} = J_{ipxz} \cdot \dot{\Omega}. \quad (24)$$

Для n работающих двигателей имеем

$$M_{\Sigma\Omega x} = \sum_{i=1}^n M_{i\Omega x}, \quad (25)$$

$$M_{\Sigma\Omega y} = \sum_{i=1}^n M_{i\Omega y}, \quad (26)$$

$$M_{\Sigma\Omega z} = \sum_{i=1}^n M_{i\Omega z}, \quad (27)$$

$$M_{\text{вр}\Sigma x} = M_{\Sigma\Gamma x} + M_{\Sigma\Omega x}, \quad (28)$$

$$M_{\text{вр}\Sigma y} = M_{\Sigma\Gamma y} + M_{\Sigma\Omega y}, \quad (29)$$

$$M_{\text{вр}\Sigma z} = M_{\Sigma\Gamma z} + M_{\Sigma\Omega z}. \quad (30)$$

Моменты инерции ротора двигателя относительно связанных с ВС осей координат $J_{px}, J_{py}, J_{pz}, J_{pxy}, J_{pxz}, J_{pyz}$ можно представить как

$$J_{px} = J_{px}^c + m_p (y_p^2 + z_p^2), \quad (31)$$

$$J_{py} = J_{py}^c + m_p (x_p^2 + z_p^2), \quad (32)$$

$$J_{pz} = J_{pz}^c + m_p (x_p^2 + y_p^2), \quad (33)$$

$$J_{pxy} = J_{pxy}^c + m_p x_p \cdot y_p, \quad (34)$$

$$J_{pxz} = J_{pxz}^c + m_p x_p \cdot z_p, \quad (35)$$

$$J_{pyz} = J_{pyz}^c + m_p y_p \cdot z_p, \quad (36)$$

где $J_{px}^c, J_{py}^c, J_{pz}^c, J_{pxy}^c, J_{pxz}^c, J_{pyz}^c$ – собственные моменты инерции ротора двигателя; собственные центробежные моменты ротора двигателя равны нулю; x_p, y_p, z_p – координаты центра масс ротора в связанной с ВС системе координат с началом в центре масс ВС; m_p – масса ротора двигателя.

Исходные данные для вычисления моментов, вызванных вращением масс ВС: компоненты угловой скорости ВС $\omega_x, \omega_y, \omega_z$; собственные моменты инерции ротора двигателя $J_{px}^c, J_{py}^c, J_{pz}^c$; x_p, y_p, z_p – координаты центра масс ротора в связанной с ВС системе координат с началом в центре масс ВС; m_p – масса ротора двигателя; Ω – угловая скорость вращения ротора двигателя; $\dot{\Omega}$ – производная угловой скорости ротора двигателя по времени.

После подстановки компонентов соответствующих гироскопических моментов и моментов, вызванных изменением угловой скорости подвижных частей, в выражения для имеющейся математической модели ВС [2] получим:

$$\bar{M}_{x\Sigma} = \frac{(m_{x\Sigma} \cdot q \cdot S \cdot L + M_{xp} + M_{x\emptyset} + M_{\text{вр}\Sigma x})}{I_x}, \quad (37)$$

$$\bar{M}_{y\Sigma} = \frac{(m_{y\Sigma} \cdot q \cdot S \cdot L + M_{yp} + M_{y\emptyset} + M_{\text{вр}\Sigma y})}{I_y}, \quad (38)$$

$$\bar{M}_{z\Sigma} = \frac{(m_{z\Sigma} \cdot q \cdot S \cdot b + M_{zp} + M_{z\emptyset} + M_{\text{вр}\Sigma z})}{I_z}, \quad (39)$$

где $m_{x\Sigma} \cdot q \cdot S \cdot L, m_{y\Sigma} \cdot q \cdot S \cdot L, m_{z\Sigma} \cdot q \cdot S \cdot b$ – аэродинамические моменты ВС; $M_{xp}, M_{yp}; M_{zp}$ – моменты от тяги двигателей ВС; $M_{x\emptyset}, M_{y\emptyset}, M_{z\emptyset}$ – моменты от шасси при движении ВС по взлетно-посадочной полосе.

С применением предложенного алгоритма в уточненной ММ динамики полета ВС можно оценить влияние суммарного момента от вращающихся масс на динамику движения, например, двухдвигательного воздушного судна при отказе одного из них. При решении задачи проводится математическое моделирование вариантов полета ВС без учета и с учетом в ММ момента $\bar{M}_{\text{вр}\Sigma}$.

Приведенный алгоритм вычисления компонентов суммарного момента от вращающихся масс и методика учета этого момента в общих уравнениях динамики движения ВС можно распространить на общий случай движущегося объекта (летательного аппарата (ЛА), вертолета, космического ЛА), имеющего вращающиеся массы с векторами оси вращения, направленными не только по его продольной оси, но и по направлениям поперечных осей с ортами \bar{i}_2, \bar{i}_3 . Рассмотрена также возможность ориентации вращающихся масс по отношению к связанной системе координат, которая задается ортами \bar{e} .

Результаты исследований могут быть использованы при разработке алгоритмов расчета на ЭВМ параметров движения летательных аппаратов, имеющих вращающиеся части, совершенствовании математических моделей ЛА и в задачах математического моделирования функционирования систем управления, авиационных тренажеров, робототехнических комплексов и других устройств ЛА. Дальнейшая задача состоит в количественной оценке влияния моментов от вращающихся масс на динамику движения ВС.

Библиографические ссылки

1. Оптимизация алгоритмов управления воздушным винтом спортивного самолета с поршневым двигателем с целью повышения его маневренности. Исследование влияния характеристик системы регулирования воздушного винта самолета Як-18Т на его маневренные свойства : отчет о НИР (промежуточ.) /

Головной ин-т повышения квалификации и переподготовки руководящих кадров и специалистов гражданской авиации ; рук. В. М. Кейн ; отв. исполн. Н. Ф. Юша. Л., 1991.

2. Разработка обучающего компьютерного комплекса для подготовки летного состава к эксплуатации самолета Ту-204 : отчет о НИР (заключительный) / Ульян. высш. авиацион. уч-ще гражданской авиации ; рук. В. М. Ржевский. Договор № 263. Ульяновск, 1999.

3. Совершенствование программ и методики проведения профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации на основе применения новых информационно-образовательных технологий : отчет о НИР (заключительный) / Ульян. высш. авиацион. уч-ще гражданской авиации ; рук. С. Г. Косачевский ; отв. исп. Н. У. Ушаков. Ульяновск, 2004. Инв. № 0220.0 501073.

4. Динамика полета транспортных летательных аппаратов : учеб. для вузов / А. Я. Жуков, В. И. Егоров, А. Л. Ермаков и др. ; под ред. А. Я. Жукова. М. : Транспорт, 1996.

5. Ушаков Н. У. О гироскопическом моменте от двигателей воздушного судна // Чкаловские чтения : сб. материалов VI Междунар. науч.-техн. конф. Егорьевск : ЕАТК ГА, 2007. С. 129–132.

6. Ушаков Н. У. О гироскопическом моменте от вращающихся масс воздушного судна // Динамика систем, механизмов и машин : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2007. Кн. 2. С. 166–170.

7. Артюхин Ю. П., Каргу Л. И., Симаев В. Л. Системы управления космических аппаратов, стабилизированных вращением. М. : Наука, 1979.

8. Ушаков Н. У. О моменте от вращающихся масс воздушного судна // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. Ч. 1. С. 171–173.

9. Ушаков Н. У. Алгоритм определения моментов от вращающихся масс воздушного судна // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011. Ч. 1. С. 193–194.

N. U. Ushakov

THEORETICAL JUSTIFICATION OF ALGORITHM OF DETERMINATION OF AIRCRAFT ROTATING MASS MOMENTS

The paper studies theoretical justification of estimation algorithm of aircraft rotating mass moments (gyroscopic moment and moment caused by moving parts rate changes) influence on aircraft movement, A general case of rotation mass orientation towards a fixed coordination system, is considered as well.

Keywords: aircraft, rotating mass, mathematical model, moment.