

определить зависимость между случайными величинами C_i (сложность) и T_i (трудоемкость).

3. Рассчитать коэффициенты уравнения регрессии.

4. Рассчитать прогнозную трудоемкость изготовления детали для данных производственных условий, мин, по формуле

$$T = a + bC. \quad (4)$$

В формуле (4) свободный член a характеризует затраты времени, несвязанные с обработкой. Сюда входят вспомогательное и подготовительно-заключительное время операции. Коэффициент регрессии $b = \operatorname{tg} \alpha$ характеризует производительность оборудования и уровень организации труда на данном производстве.

Библиографические ссылки

1. Шарин Ю. С., Шмурыгин Н. Д., Терентьев В. Н. Вопросы нормирования механообработки и теория сложности. – Екатеринбург : УГТУ, 2001. – 259 с.
2. Якимович Б. А., Кориунов А. И. Экспертные методы оценки структурно-параметрической сложности деталей. – М. : Машиностроение : Информатика машиностроения. – 1997. – № 3. – С. 28–32.
3. Кугаевский С. С. Технология обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ : монография. В 2 ч. – Ч. 1. Обработка внутренних контуров. – Екатеринбург : УГТУ, 2000. – 142 с.
4. Кугаевский С. С. Технология обработки корпусных деталей на станках с ЧПУ : монография. В 2 ч. – Ч. 2. Обработка плоскостей и отверстий. – Екатеринбург : УГТУ, 2001. – 96 с.

S. S. Kugaevskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University after First President of Russia
B. N. Yeltsyn, Yekaterinburg

Use of Design and Technological Components in Calculation of Prognostic Labour Intensity

A method of the prognostic labour intensity calculation of design and technological components is considered. A set of design and technological parameters and an algorithm of technological decisions are offered.

Key words: prognostication of labour intensity, structural complexity, design and technological component, tooling method.

УДК 531.36; 629.7

А. В. Алексеев, кандидат технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева

В. С. Красников, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева

УГЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ РАЗГОННОГО БЛОКА С ЖИДКИМ ТОПЛИВОМ

Предложена математическая модель движения вокруг центра масс разгонного блока (РБ) с тороидальным баком, заполненным жидким топливом. Определены зависимости параметров движения от времени численным и аналитическим методами. Исследованы предельные случаи ориентации в углах Эйлера.

Ключевые слова: разгонный блок, параметры Кэли – Клейна, углы Эйлера, кинематические уравнения.

Для проведения высокоточных работ и экспериментов на борту космического аппарата необходимо обеспечивать определенные условия: заданное движение центра масс, угловое движение, минимальный вибрационный режим и т. д. Следовательно, необходимо учитывать любые возмущения, возникающие при движении космического аппарата. Одним из таких возмущений является влияние жидкого топлива, расположенного на борту, а именно: из-за наличия свободной поверхности и расхода топлива происходит постоянное изменение инерционно-массовых характеристик, кроме того, циркуляционные движения жидкого топлива могут вызвать гироскопические явления.

Реальный разгонный блок будем моделировать твердым телом с тороидальной полостью, целиком заполненной жидкостью. Форма полости выбрана не случайно: это один из наиболее распространенных типов баков наряду с цилиндрическими и сферическими, используемых в РБ. Таким образом, ставится задача моделирования движения РБ с жидким топливом в тороидальном баке, а также получения аналитических зависимостей параметров движения от времени.

Под простейшими случаями движения твердого тела с полостями, наполненными жидкостью, будем подразумевать случаи, когда движение жидкости в полости можно полностью охарактеризовать конечным числом переменных [1]. Очевидно,

это возможно лишь при полном заполнении жидкостью полости, когда отсутствует свободная поверхность. Известно, что если при этом движение жидкости является потенциальным или же однородным вихревым, то движение системы описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями вместе с уравнением Лапласа [2, 3]. Исследование движения системы в этих случаях значительно упрощается.

Математическая модель

В случае когда полость целиком заполнена жидкостью и за начало подвижных осей принят центр инерции системы, уравнения движения принимают простой вид:

$$\frac{d\mathbf{G}}{dt} + \omega \times \mathbf{G} = \mathbf{L} \tag{1}$$

Суммарный момент количеств движения твердого тела и жидкости в его полости:

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}^* + \mathbf{R},$$

где вектор \mathbf{R} представляет собой линейную функцию главных циркуляций и является постоянным в связанной системе координат.

Уравнения движения системы относительно центра масс в векторном выражении имеет вид

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}^*) + \omega \times (\mathbf{G}_1 + \mathbf{G}^* + \mathbf{R}) = \mathbf{L}.$$

Такой же вид имеет уравнение движения системы около неподвижной точки. Если оси абсолютной системы координат направить по главным осям эллипсоида $\mathbf{r}(\theta^* + \theta^{(1)})\mathbf{r} = \mathbf{1}$, то векторное уравнение (1) в проекциях на оси жестко связанной с телом системы координат дает следующие 3 скалярных обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\begin{cases} A\dot{p} + (C - B)qr + R_3q - R_2r = L, \\ B\dot{q} + (A - C)pr + R_1r - R_3p = M, \\ C\dot{r} + (B - A)pq + R_2p - R_1q = N, \end{cases} \tag{2}$$

полученных Н. Е. Жуковским [1], где A, B, C обозначают главные моменты преобразованного тела для точки O , равные суммам моментов инерции твердого тела и эквивалентного тела относительно соответствующих осей координат, направленных по главным осям эллипсоида инерции для точки O ; L, M, N – проекции внешнего момента на связанные оси координат; p, q, r – проекции вектора мгновенной угловой скорости ω на оси связанной системы координат; R_1, R_2, R_3 – проекции вектора \mathbf{R} момента количеств циклического движения жидкости, которые определяются для всех кольцевидных полостей в форме тел вращения вокруг оси x_3 через потенциал циклического движения жидкости:

$$\chi = \frac{\chi}{2\pi} \vartheta, \quad \vartheta = \arctg \frac{x_2}{x_1}.$$

Тогда

$$R_1 = R_2 = 0, \quad R_3 = \rho \int_{\tau} \frac{d\chi}{d\vartheta} d\tau = \frac{M_2\chi}{2\pi}, \tag{3}$$

т. е. для кольцевидных полостей вращения главный момент количеств начального движения равен произведению массы жидкости на циркуляцию скорости, деленную на 2π .

Получение аналитических зависимостей параметров движения от времени

Для решения поставленной нами задачи введем следующие допущения, характерные для РБ и позволяющие упростить решение динамических уравнений.

1. Будем считать, что движение происходит под действием только тяги маршевых двигательных установок, которая не создает момента относительно центра масс. Тогда проекции внешнего момента на оси связанной системы координат равны нулю:

$$N = M = L = 0.$$

2. В качестве топливных баков используются только топливные баки тороидальной формы, т. е. для них проекции момента циклического движения жидкости на оси связанной системы координат имеют вид (3).

3. РБ является динамически симметричным:

$$A = B \neq C.$$

4. Топливный бак расположен перпендикулярно продольной оси симметрии РБ.

Перепишем систему (2) с учетом введенных допущений:

$$\begin{cases} A\dot{p} + (C - B)qr + R_3q = 0, \\ B\dot{q} + (A - C)pr - R_3p = 0, \\ C\dot{r} = 0. \end{cases}$$

Получим для свободного РБ аналитические зависимости параметров движения:

$$\begin{cases} p(t) = p_0 \cos kt - q_0 \sin kt, \\ q(t) = p_0 \sin kt + q_0 \cos kt, \\ r(t) = r_0, \end{cases} \tag{4}$$

где p_0, q_0, r_0 – начальные условия;

$$k = \frac{1}{A} [r_0(C - A) + R_3] - \text{циклическая частота.}$$

Система (4) является аналитическим решением динамических уравнений, по которым можно анализировать изменение проекций угловой скорости на оси связанной системы координат. Подставляя данное решение в кинематические уравнения в той или иной форме, решим задачу Дарбу, состоящую в определении параметров ориентации по известным угловым скоростям.

Для определения ориентации РБ будем использовать параметры Кэли – Клейна, в которых кинематические уравнения запишутся в виде

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \frac{r}{2}\alpha I + \frac{I}{2}(p - qI)\beta, \\ \dot{\beta} = -\frac{r}{2}\beta I + \frac{I}{2}(p + qI)\alpha, \\ \dot{\gamma} = \frac{r}{2}\gamma I + \frac{I}{2}(p - qI)\delta, \\ \dot{\delta} = -\frac{r}{2}\delta I + \frac{I}{2}(p + qI)\gamma. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя в систему дифференциальных уравнений первого порядка (5) аналитические выражения для угловых скоростей (4) и решая задачу Коши для этой системы с начальными условиями $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \delta_0$, после введения замены

$$\mu = \sqrt{-k^2 - r_0^2 - 2kr_0 - q_0^2 - p_0^2}$$

получим следующие аналитические выражения для параметров Кэли – Клейна:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= A_0 e^{-\frac{1}{2}(lk-\mu)t} - B_0 e^{-\frac{1}{2}(lk+\mu)t}; \\ \beta(t) &= \frac{C_0 e^{-\frac{1}{2}(lk+\mu)t} + D_0 e^{-\frac{1}{2}(lk-\mu)t}}{(-p_0 + Iq_0)e^{-lkt}}, \end{aligned}$$

где константы μ, A_0, B_0, C_0, D_0 определяются из начальных условий системы.

Аналитические решения для $\delta(t), \gamma(t)$ являются комплексным сопряжением $\alpha(t), \beta(t)$ и наоборот, с точностью до знака [4]:

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= -\bar{\beta}(t); \\ \delta(t) &= \bar{\alpha}(t). \end{aligned}$$

Для определения ориентации РБ в привычных углах Эйлера необходимо воспользоваться их связью с параметрами Кэли – Клейна [5]:

$$\begin{cases} \theta = \arccos(\alpha\delta + \beta\gamma), \\ \varphi = \frac{1}{2} \arccos \left(\operatorname{Re} \left(\frac{\alpha\gamma}{\beta\delta} \right) \right), \\ \psi = \frac{1}{2} \arccos \left(\operatorname{Re} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\delta} \right) \right). \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, получены аналитические зависимости углов Эйлера от времени, которые найти напрямую из кинематических соотношений Эйлера весьма сложно, а в некоторых случаях невозможно. С помощью полученных соотношений (6) можно анализировать влияние параметров системы, в том числе и жидкости, на угловое движение РБ.

Предельные случаи ориентации в углах Эйлера

Как известно, при $\theta = 0$ или $\theta = \pi$ углы ψ, φ не определены, а определена только их сумма $\psi + \varphi$. Эта особенность углов Эйлера делает их малоприменимыми для исследования движения вблизи указанных значений угла нутации. В этом случае необходимо использовать другие углы. Однако если использовать решение, полученное выше, то эта проблема устраняется. Например, численное решение для нулевого начального угла нутации получить невозможно из-за возникновения деления на ноль в кинематических уравнениях Эйлера.

При следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} \theta(0) = 0, \\ \varphi(0) = 0, \\ \psi(0) = 0 \end{cases}$$

получаются аналитические зависимости углов Эйлера от времени, для одного из которых приведен график (рис.).

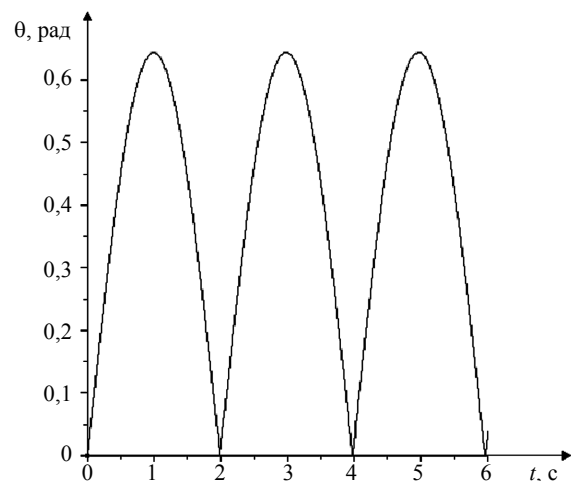


График зависимости $\theta(t)$

Библиографические ссылки

1. Жуковский Н. Е. О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью. – М. : Гостехиздат, 1949.
2. Моисеев Н. Н., Румянцев В. В. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость. – М. : Наука, 1965.
3. Алексеев А. В., Дорошин А. В. Приведение спутника-гиростата с полостью с жидкостью к системам твердых тел с вязким трением // Полет. – 2007. – № 9. – С. 26–33.
4. Лурье А. И. Аналитическая механика. – М. : ГИФМЛ, 1961.
5. Голдстейн Г. Классическая механика : пер. с англ. – 2-е изд. – М., 1975.

A. V. Alekseev, Candidate of Technical Sciences, Samara State Aerospace University
V. S. Krasnikov, Candidate for a Master's Degree, Samara State Aerospace University

Angular Motion of Upper-Stage Rocket with Liquid Fuel

The mathematical model of movement of upper-stage rocket round the center of mass with the toroidal tank filled with liquid fuel is offered. Time dependencies of movement parameters are determined by numerical and analytical methods. Limiting cases of orientation in Euler's angles are investigated.

Key words: upper-stage rocket, Cayley-Klein parameters, kinematic equations, Euler's angles.

УДК 629.563

А. П. Куляшов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

В. А. Шапкин, доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

А. А. Кошурина, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

М. С. Крашенинников, аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

УНИВЕРСАЛЬНОЕ СПАСАТЕЛЬНОЕ СРЕДСТВО С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ*

Приводятся результаты анализа наиболее значительных аварий на нефтяных и газовых платформах, расположенных на шельфовых месторождениях, которые произошли в мире за последние 46 лет. Делается вывод о необходимости создания специального спасательного средства для платформ, расположенных в шельфовой зоне северных морей. В качестве такого средства рассматривается универсальное спасательное средство с роторно-винтовым двигателем. Показан результат реализации первого этапа приведенной методики определения наиболее оптимальных размеров роторно-винтового движителя.

Ключевые слова: спасательное средство, роторно-винтовой движитель, шельфовые месторождения, моделирование.

История промышленного освоения нефтегазовых месторождений в шельфовой зоне берет свое начало в 1947 г., когда американская компания «Керр Макги» построила первую в мире нефтяную платформу в Мексиканском заливе в 16 км от берега на глубине 6 м и тогда же начала с нее бурение [1]. В настоящее время порядка 35 % добытой нефти и 32 % газа приходится на шельфовые месторождения [2].

В связи с тем что запасы нефти и газа на материковых месторождениях неуклонно уменьшаются, актуальным становится вопрос о добыче нефти и газа именно с шельфовых месторождений.

Работа на таких платформах сопряжена с большей по сравнению с наземными комплексами опасностью. Это связано не только с более суровыми условиями, в которых добываются полезные ископаемые, но также и с тем, что в случае аварии территория, подверженная негативному воздействию неконтролируемых выбросов углеводородов, во много раз превышает таковую у наземных комплексов. В обеспечении безопасности данных объектов наиболее важную роль играют технические и технологические инновации, а также современные нормы и правила, предписывающие порядок проведения операций и мероприятий на платформах.

Хорошим примером внедрения современной системы норм обеспечения безопасности, явилась система саморегулирования нефтегазовых компа-

ний, работающих на шельфе (целеориентированный режим обеспечения безопасности). Данная система применена в Норвегии, Голландии, Великобритании и ряде других стран. Помимо эффективности отличительной чертой проведенных реформ явилась тенденция сосредоточения усилий компаний не на тотальном снижении аварийности, а на снижении аварийности с тяжелыми и значительными последствиями. Переход крупных нефтегазовых компаний на саморегулирование позволил за 5 лет снизить количество аварий со значительными последствиями в 3 раза [3].

Однако остающаяся вероятность возникновения крупных аварий диктует необходимость в надежной эвакуации персонала платформ. Рассмотрение крупных аварий на нефтегазовых платформах позволит определить превалирующие факторы риска, на которые необходимо обратить особое внимание при проектировании спасательных средств.

В общей сложности в период с 1965 г. по 2011 г., т. е. за последние 46 лет, на нефтегазовых платформах произошло более 60 инцидентов, в результате которых погибли по меньшей мере 610 человек, а 93 человека получили тяжелые травмы (см. табл.).

Обзор самых крупных аварий на нефтегазовых платформах и учет характера их протекания позволяет выделить следующие факторы риска (источники опасности).