

мов определения ориентации в кватернионах для случая регулярной прецессии объекта // Вестник Харьк. политехн. ин-та, №2. – 1992, вып. 11. – С.79 – 83. **9. Плаксі́й Ю.А.** Еталонна тригонометрична кватерніонна модель обертання прецесійного типу твердого тіла // Вісник НТУ «ХПІ», випуск 37/2013. – Математичне моделювання в техніці та технологіях. – С. 141 – 147. **10. Бранець В.Н., Шмыглевский И.П.** Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 320 с.

Надійшла до редколегії 16.01.2014

УДК 629.7.05

Трьохчастотні аналітичні еталонні моделі обертання твердого тіла / Ю. А. Плаксі́й // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 175 – 185. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

Предложена новая аналитическая эталонная модель вращения твердого тела, основанная на тригонометрическом мультипликативном представлении кватерниона ориентации. Показаны возможности модели для оценивания точности алгоритмов определения ориентации в БИНС.

Ключевые слова: кватернион, ориентация, эталонная модель, дрейф.

UDC 629.7.05

Three-frequency analytical reference model of a rigid body rotation. / Yu. A. Plaksyі // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 175 – 185. Bibliog.: 10 titles. – ISSN 2222-0631.

A new analytical reference model of a rigid body rotation based on the trigonometric multiplicative representation of the orientation quaternion is suggested. The resources of the model for error analysis of orientation algorithms in strapdown inertial navigation systems are demonstrated.

Key words: quaternion, orientation, reference model, drift.

УДК 621.9

М.С. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

М.І. ГАСАНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;

І.В. ВОЛОШКІНА, інж., НТУ «ХПІ»

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ

Наведено математичну модель для розрахунку температури мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) у підсистемі використання. Температура визначається в залежності від етапу циклу шліфування. Модель побудована на основі рівняння зміни температури при проходженні рідини крізь місцевий опір.

Ключові слова: мастильно-охолоджувальна рідина, температура, підсистема використання МОР, теплові потоки.

Вступ. Ефективність використання мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) при шліфуванні визначається не тільки оптимальним складом, але і

їхнім тепловим станом [1]. Дослідження показали, що під час обробки нагрівання МОР впливає на теплові деформації елементів технологічної системи шліфування [2]. Ці деформації збільшують похибки у розмірах і формі деталей. Крім того, при підвищенні температури МОР до 35°C прискорюється розвиток мікроорганізмів, особливо при збільшенні механічних домішок та інших рідин, які є в МОР [3].

Постановка задачі. Для визначення теплового стану МОР в різноманітних умовах процесу обробки слід розробити математичну модель, яка допоможе прогнозувати точність виготовлення деталей на шліфувальних верстаках.

Математична модель. В основу математичної моделі покладено рівняння зміни температури рідини при проходженні її крізь місцевий опір (дроселі, клапани, очисники тощо) [4]:

$$\Delta t = t_{\text{вх}} - t_{\text{вих}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}}{\rho_{\text{жс}} \cdot c_{\text{жс}} \cdot m_t},$$

де $t_{\text{вх}}$ і $t_{\text{вих}}$ – температура рідини на вході та виході з опору, $^{\circ}\text{C}$; $P_{\text{вх}}$ і $P_{\text{вих}}$ – тиск рідини на вході і виході з опору, $\text{кг}/\text{см}^2$; $\rho_{\text{жс}}$, $c_{\text{жс}}$ – щільність, $\text{кг}/\text{см}^3$ та питома теплоємність рідини, $\text{ккал}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$; m_t – технічний еквівалент теплоти, $\text{кг} \cdot \text{см}/\text{ккал}$.

Модель враховує зміну фізичних параметрів МОР (щільності, питомої теплоємності та інших) від температури. При визначенні температури нагрівання МОР, яка йде від зони різання, враховуються наступні параметри шліфування: тангенціальна складова сили різання, швидкість шліфувального круга і параметри, які характеризують долю тепла, що йде в МОР.

Розроблено схему розподілу теплових потоків в системі використання МОР (рис. 1). Аналіз розрахункової схеми (рис. 2) показав, що рух МОР залежить від *етапу обробки (першого або другого)*; відповідно з цим виділяємо два контури руху МОР в системі. Перший контур рідини проходить під час завантаження та розвантаження заготовки, її зажиму та розжиму, а також під час швидкого підводу та відведення шліфувальної бабки. Другий контур рідини проходить під час *попереднього або кінцевого шліфування*, а також під час *виходжування*.

Запишемо рівняння зміни температури по ланках контурів системи.

Для елементів першого контуру зміна температури має вигляд:

$$t_1 = \frac{P_0 - P_1}{\rho_{\text{жс}0,1} \cdot c_{\text{жс}0,1} \cdot m_t} - t_0 \text{ – ланка } 0 - 1 \text{ (трубопровід),}$$

$$t_2 = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{\text{жс}1,2} \cdot c_{\text{жс}1,2} \cdot m_t} - t_1 \text{ – ланка } 1 - 2 \text{ (насос),}$$

$$t_3 = \frac{P_2 - P_3}{\rho_{\text{жс}2,3} \cdot c_{\text{жс}2,3} \cdot m_t} - t_2 \text{ – ланка } 2 - 3 \text{ (трубопровід),}$$

$$t_4 = \frac{P_3 - P_4}{\rho_{жс3,4} \cdot c_{жс3,4} \cdot m_t} - t_3 - \text{ланка } 3 - 4 \text{ (очисник)},$$

$$t_{n-1} = \frac{P_4 - P_{n-1}}{\rho_{жс4,n-1} \cdot c_{жс4,n-1} \cdot m_t} - t_4 - \text{ланка } 4 - (n-1) \text{ (інші елементи та апарати)},$$

$$t_n = \frac{P_{n-1} - P_n}{\rho_{жсn-1,n} \cdot c_{жсn-1,n} \cdot m_t} - t_{n-1} - \text{ланка } (n-1) - n \text{ (інші елементи та апарати)},$$

$$t_{n+1} = \frac{P_n - P_{n+1}}{\rho_{жсn,n+1} \cdot c_{жсn,n+1} \cdot m_t} - t_n - \text{ланка } n - (n+1) \text{ (трубопровід)},$$

$$t_{n+2} = \frac{P_{n+1} - P_{n+2}}{\rho_{жсn+1,n+2} \cdot c_{жсn+1,n+2} \cdot m_t} - t_{n+1} - \text{ланка } (n+1) - (n+2) \text{ (клапан)},$$

$$t_{n+3} = \frac{P_{n+2} - P_{n+3}}{\rho_{жсn+2,n+3} \cdot c_{жсn+2,n+3} \cdot m_t} - t_{n+2} - \text{ланка } (n+2) - (n+3) \text{ (трубопровід)}.$$

Для елементів другого контуру зміна температури має вигляд:

$$t_{n+4} = \frac{P_n - P_{n+4}}{\rho_{жсn,n+4} \cdot c_{жсn,n+4} \cdot m_t} - t_n - \text{ланка } n - (n+4) \text{ (трубопровід)},$$

$$t_{n+5} = \frac{P_{n+4} - P_{n+5}}{\rho_{жсn+4,n+5} \cdot c_{жсn+4,n+5} \cdot m_t} - t_{n+4}$$

– ланка $(n+4) - (n+5)$ (клапан керування),

$$t_{n+(m-1)} = \frac{P_{n+5} - P_{n+(m-1)}}{\rho_{жсn+5,n+(m-1)} \cdot c_{жсn+5,n+(m-1)} \cdot m_t} - t_{n+5}$$

– ланка $(n+5) - (n+(m-1))$ (трубопровід),

$$t_{m+n} = t_{n+(m-1)} + \Delta t_{n+m}$$

– ланка $(n+(m-1)) - (m+n)$ (між входом та виходом із зони різання),

$$t_{m+n+j} = t_{m+n} + \Delta t_{m+n+j}$$

– ланка $(m+n) - (m+n+j)$ (на виході із зони різання та вході в резервуар).

Температура на виході із першого контура дорівнює

$$t_{m+n+j} = \frac{P_{n+2} - P_{n+3}}{\rho_{жсn+2,n+3} \cdot c_{жсn+2,n+3} \cdot m_t} - \frac{P_{n+1} - P_{n+2}}{\rho_{жсn+1,n+2} \cdot c_{жсn+1,n+2} \cdot m_t} -$$

$$\frac{P_{n+1} - P_n}{\rho_{жсn,n+1} \cdot c_{жсn,n+1} \cdot m_t} - \frac{P_{n-1} - P_n}{\rho_{жсn-1,n} \cdot c_{жсn-1,n} \cdot m_t} - \frac{P_4 - P_{n-1}}{\rho_{жс4,n-1} \cdot c_{жс4,n-1} \cdot m_t}$$

$$- \frac{P_3 - P_4}{\rho_{жс3,4} \cdot c_{жс3,4} \cdot m_t} - \frac{P_2 - P_3}{\rho_{жс2,3} \cdot c_{жс2,3} \cdot m_t} - \frac{P_1 - P_2}{\rho_{жс1,2} \cdot c_{жс1,2} \cdot m_t} - \frac{P_0 - P_1}{\rho_{жс0,1} \cdot c_{жс0,1} \cdot m_t} - t_0.$$

Температура на виході із другого контура вираховується так:

$$\begin{aligned}
 t_{m+n+j} = & \Delta t_{n+m} - \Delta t_{n+m+j} \frac{P_{n+(m-1)} - P_{n+m}}{\rho_{жп+5,n+(m-1)} \cdot c_{жп+5,n+(m-1)} \cdot m_t} - \\
 & \frac{P_{n+4} - P_{n+5}}{\rho_{жп+4,n+5} \cdot c_{жп+4,n+5} \cdot m_t} \frac{P_{n+4} - P_n}{\rho_{жп+4,n} \cdot c_{жп+4,n} \cdot m_t} \frac{P_{n-1} - P_n}{\rho_{жп-1,n} \cdot c_{жп-1,n} \cdot m_t} - \\
 & \frac{P_4 - P_{n-1}}{\rho_{ж4,n-1} \cdot c_{ж4,n-1} \cdot m_t} \frac{P_3 - P_4}{\rho_{ж3,4} \cdot c_{ж3,4} \cdot m_t} \frac{P_2 - P_3}{\rho_{ж2,3} \cdot c_{ж2,3} \cdot m_t} \frac{P_1 - P_2}{\rho_{ж1,2} \cdot c_{ж1,2} \cdot m_t} - \\
 & \frac{P_0 - P_1}{\rho_{ж0,1} \cdot c_{ж0,1} \cdot m_t} - t_0.
 \end{aligned}$$

Значення t_0 визначається як температура, що встановилася в резервуарі на етапі 1

$$t_0 = t_d + \frac{A_0}{\sqrt[3]{V^2}},$$

де t_d – температура довкілля, °C; V – об'єм рідини в резервуарі, дм³; A_0 – кількість тепла, яке виділяється в гідросистемі в одиницю часу, ккал/ч.

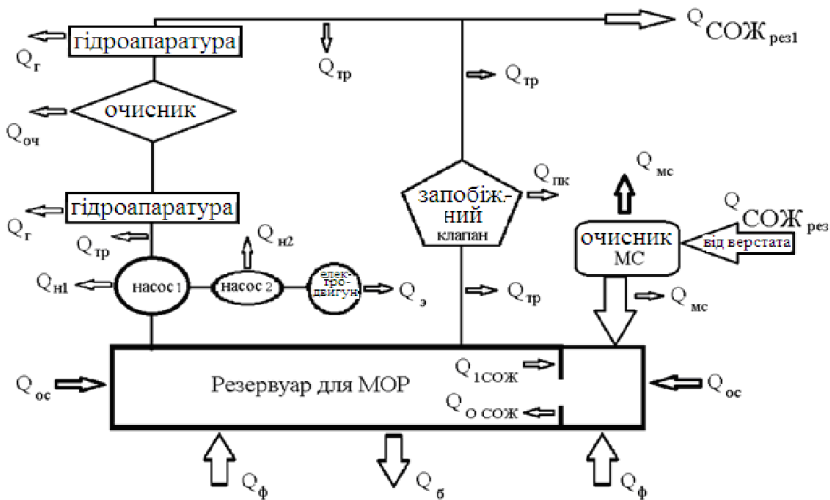


Рис. 1 – Розподіл теплових потоків в підсистемі використання МОР:

$Q_{н1}, Q_{н2}$ – тепло, яке виділяють насоси; Q_3 – виділяє електродвигун насоса;

Q_2 – тепло, яке виділяється при проходженні гідроапаратури; $Q_{тр}$ – при

проходженні трубопроводів; $Q_{сож рез}$ – тепло від МОР, яка зливається з верстату;

$Q_{пк}$ – тепло, яке виділяється при проходженні запобіжного клапану; $Q_{ос}$ – тепло від

довкілля; $Q_{сож рез1}$ – тепло, яке йде в зону різання; $Q_{ф}$ – тепло від фундаменту;

$Q_{оч}$ – тепло, яке виділяється при проходженні очисника.

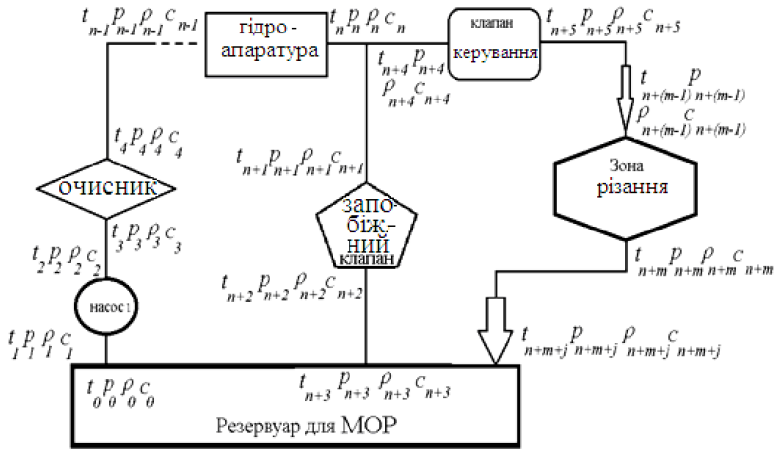


Рис. 2. – Розрахункова схема для моделювання температури в підсистемі використання МОР.

Значення A_0 визначають за формулою:

$$A_0 = 860 N_{\text{нід}} \cdot (1 - \eta),$$

де η – повний ККД системи; $N_{\text{нід}}$ – потужність, яка підводиться, кВт.

Потужність $N_{\text{нід}}$ залежить від етапу циклу обробки (а саме від того, яким контуром йде рідина).

Для першого контура $N_{\text{нід}}$ визначається за формулою

$$N_{\text{нід}} = N_{\text{т.н}} + \Delta N_n,$$

де $N_{\text{т.н}}$ – теоретична потужність насоса, кВт; ΔN_n – механічні втрати потужності, кВт.

Виникає потреба знати залежність фізичних параметрів рідини від температури у вигляді $P_{\text{жс}} = f(t)$ і $c_{\text{жс}} = f(t)$.

Питому теплоємність можна визначити за формулою [5]:

$$c_{\text{жс}} = [2020 + 1,6(t_{\text{жс}} - 100)] / 4187 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C},$$

де $t_{\text{жс}}$ – температура рідини, $^\circ\text{C}$.

Щільність рідини визначається наступною формулою [6]:

$$\rho = \frac{0,9}{g} \left[1 - \alpha(t - 15) - \frac{P_{\text{аб}} - P_{\text{атм}}}{H_u} \right],$$

де g – прискорення сили ваги, см/с^2 ; t – температура, $^\circ\text{C}$; $P_{\text{аб}}$ і $P_{\text{атм}}$ – відповідно абсолютний та атмосферний тиск; H_u – ізотермічний модуль об'ємної пружності; α – коефіцієнт, який для мінеральних масел визначається в межах $5 \cdot 10^{-4} < \alpha < 8,4 \cdot 10^{-4}$.

Втрати тиску по довжині при ламінарному режимі течії в трубопроводах

розраховують за формулою:

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вих}} = 8 \cdot v \cdot Q \cdot L \cdot d^4 \text{ кг/см}^2,$$

де v – коефіцієнт кінематичної в'язкості; Q – витрати рідини, $\text{дм}^3/\text{хв}$; L – довжина трубопроводу, м; d – діаметр трубопроводу, мм.

Зміни тиску в очиснику залежать від його конструкції. Якщо в якості очисника використовується гідроциклон, то перепад тиску можна знайти з *формули Честона*:

$$Q = 23,6 \cdot F_{\text{вх}} \sqrt{\Delta p},$$

де $F_{\text{вх}}$ – площа вхідного патрубку, см^2 ; Q – витрати рідини через гідроциклон, $\text{дм}^3/\text{хв}$; Δp – перепад тиску, кг/см^2 .

Перепад тиску, який створюється насосом, становить

$$\Delta p = \frac{N_T}{Q_H + Q_T} \text{ кг/см}^2,$$

де N_T – теоретична (індикаторна) потужність, $\text{кг}\cdot\text{см}/\text{хв}$; Q_H – фактична продуктивність насоса, $\text{см}^3/\text{хв}$; Q_T – протічка рідини, $\text{см}^3/\text{хв}$.

Перепад тиску на клапані визначається за формулою витрат

$$\Delta p = (\rho / 2g)(Q / \mu f)^2 \text{ кг/см}^2,$$

де ρ – щільність рідини, кг/см^3 ; g – прискорення сили ваги, $\text{см}/\text{с}^2$; Q – витрати рідини через клапан, $\text{см}^3/\text{с}$; μ – коефіцієнт витрати; f – площа перерізу робочого вікна, см^2 .

Температуру нагрівання МОР (на виході із зони різання) можна визначити за формулою:

$$t_{\text{МОР}} = \frac{Q_{\text{МОР}}}{c \cdot M},$$

де $Q_{\text{МОР}}$ – тепло, яке втрачається на нагрівання МОР; c – питома теплоємність; M – маса МОР в контакті:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot Q \cdot t,$$

Q – витрати рідини, $\text{см}^3/\text{с}$; t – час, хв.

Тепло, яке йде на нагрівання МОР визначається так:

$$Q_{\text{МОР}} = k_{\text{МОР}} \cdot P_z \cdot V_k,$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання; V_k – швидкість різання, м/с, $k_{\text{МОР}}$ – коефіцієнт, що вказує яка доля тепла йде в МОР. За даними С. С. Шахновського 85% тепла, яке виникає при шліфуванні, йде в МОР.

Висновки. Результати моделювання дають можливість визначити обсяг МОР в підсистемі використання МОР шліфувальних верстатів в залежності від режиму шліфування.

Список літератури: 1. Чулок А.И., Лобанцева В.С. Термический анализ эффективности действия СОЖ. – М.: Машиностроение, 1988. – 40с. 2. Марциняквичус А.Ю. Снижение тепловых деформаций круглошлифовального станка. Станки и инструмент. – 1991. – №5. – С. 7 – 10. 3. Бульжжев Е.М., Худобин Л.В. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при ме-

таллообработке. – М.: Машиностроение, 2004. – 352с. 4. *Баица Т.М.* Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие. – М.: Машгиз., 1963. – 696 с. 5. *Абрамов Е.И.* и др. Элементы гидропривода. Справочник. – Киев.: Техніка, 1977. – 320с. 6. *Кондаков Л.А.* и др. Машиностроительный гидропривод. – М.: Машиностроение, 1978 – 455с.

Надійшла до редколегії 14.01.2014

УДК 621.9

Моделювання теплового режиму в технологічній системі охолодження шліфувально-го верстату / М. С. Степанов, М. І. Гасанов, І. В. Волошкіна // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 185 – 191. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2222-0631.

Приведена математическая модель расчета температуры смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) в подсистеме применения. Температура определяется в зависимости от этапа цикла шлифования. Модель построена на основе уравнения изменения температуры при прохождении жидкости через местное сопротивление.

Ключевые слова: масляно-охлаждающая жидкость, температура, подсистема использования СОЖ, тепловые потоки.

UDC 621.9

Modeling of the thermal regime of a grinding machine mechanical cooling system / M. Stepanov, M. Hasanov, I.V. Voloshkina // Bulletin of National Technical University «KhPI.» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 185 – 191. Bibliog.: 6 titles. – ISSN 2222-0631.

A mathematical model for calculating the temperature of a machine tool coolant in the coolant application subsystem is proposed. The temperature is defined depending on the stage of the grinding cycle. The model is based on the equation describing the change of the machine tool coolant temperature on passing through the local resistance.

Key words: machine tool coolant, temperature, application subsystem, heat flow.

УДК 519.281.2:62-97/-98

Ф.Ф. СІРЕНКО, асист., НАКУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ПРИ ПАРАМЕТРИЧНІЙ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СПРОЩЕНОЇ СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТД НА ДІЛЯНЦІ ЗАПУСКУ

Математичне моделювання робочих процесів застосовується на етапах розробки та доведення авіаційних двигунів, зокрема при відпрацюванні програм системи автоматичного керування. В НАКУ «ХАІ» розроблено метод моделювання запуску, що базується на широкому використанні експериментальних даних та апіорних знань про об'єкт. В роботі наведено структуру моделі і алгоритм, який базується на апроксимації експериментальних даних зваженим методом найменших квадратів, що унеможливило отримання нефізичних результатів.

Ключові слова: стеганографія, стеганологія, стегоповідомлення, контейнер, вейвлет-перетворення.

© Ф. Ф. Сіренко, 2014