

УДК 681.236

Ю.П. КОНДРАТЕНКО (д-р техн.наук, проф.), **І.Л. НАЗАРОВА**
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
 y_kondratenko@rambler.ru, nil_sound@mail.ru

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЄМНІСНОГО ДАТЧИКА З КОНІЧНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА

Розроблено математичну модель ємнісного датчика з конічною конфігурацією чутливого елемента, яка дозволяє визначати напрямок та величину проковзування і може використовуватись для визначення параметрів проковзування деталей в адаптивних робототехнічних системах. Проведено перевірку адекватності отриманої моделі і її порівняльний аналіз з існуючими моделями.

Математична модель, ідентифікація напрямку проковзування, ємнісний датчик.

Вступ. Розробка адаптивних роботів, що працюють в умовах невизначеності масогабаритних характеристик та фізичних властивостей предметів маніпулювання, базується на принципах штучного інтелекту і потребує дослідження та удосконалення сенсорних систем [1, 2, 3]. В роботі [4] на основі аналізу інтелектуальних засобів вимірювань [5, 6] показано доцільність розробки інтелектуального датчика проковзування адаптивного робота з мікропроцесорною системою обробки сигналів, який поєднує переваги інтелектуальної сенсорної системи і при цьому не потребує додаткових обчислювальних ресурсів від центральної системи керування роботом. Якість роботи інтелектуальних датчиків залежить від структури і характеристик чутливих елементів, а також від характеристик їх апаратних і програмних складових [7]. Таким умовам задовольняє датчик на основі ємнісних чутливих елементів [4], для яких побудовано математичні моделі двох геометричних конфігурацій чутливого елемента: циліндричної і прямокутної. Моделі такого класу є досить наближеними, але достатньо простими та зручними для аналізу і, крім того, для малих відхилень чутливого елемента адекватність даних моделей підтверджується експериментальними випробуваннями виготовленого зразка інтелектуального датчика. Для дослідження динамічних режимів системи керування адаптивного робота доцільно побудувати більш точну математичну модель ємнісного чутливого елемента, яка пов'язує геометричні параметри проковзування з його вихідним сигналом.

Метою даної статті є розробка та дослідження математичної моделі ємнісного датчика з конічною конфігурацією чутливого елемента в аналітичній формі.

Постановка задачі. Формування мінімального стискального зусилля є основною вимогою, що пред'являється до системи керування захватним пристроєм адаптивного робота, при переміщенні чи оперуванні предметами з апріорно невідомими малогабаритними характеристиками та фізичними властивостями, зокрема, з достатньо тендітними або небезпечними предметами. При цьому, якщо сформованого зусилля недостатньо для надійного утримання предмета, то при здійсненні спробних рухів відбудеться його проковзування, яке необхідно ідентифікувати та усунути щонайшвидше. Причиною виникнення проковзування також може бути зіткнення предмету маніпулювання з перешкодою. Невчасна реакція системи чи її повна відсутність може привести до виникнення аварійної ситуації або нескінченного циклу процесу захоплення предмета. В таких випадках необхідно передбачити адаптивні алгоритми реакції системи. При цьому недостатньо лише ідентифікувати проковзування, але й необхідно визначати його напрямок. В роботі [4] обґрунтовано використання двокоординатної системи ідентифікації сигналів проковзування. В роботах [8, 9] наведено конструкцію датчика проковзування, принцип дії якого базується на реєстрації зміни ємності обкладинок конденсаторів при переміщенні предмета.

Синтез математичної моделі ємнісного датчика проковзування. Розглянемо більш детально удосконалений ємнісний датчик, схематичне рішення якого наведено на рис.1. Чутлива система датчика містить реєструвальні елементи, які виконано у вигляді конічних конденсаторів. Перші обкладинки 1 конденсаторів розташовано на частині стрижня 2 чутливого елемента, розміщеного в ізолюваному від деталі пазу 3.

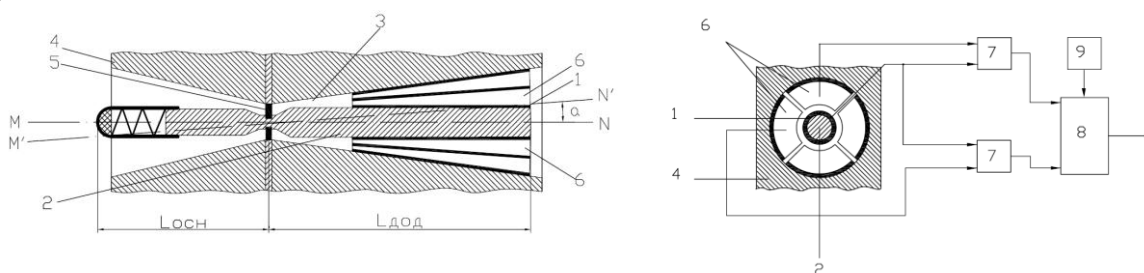


Рисунок 1 - Конструкція ємнісного датчика з конічною конфігурацією чутливого елемента

Стрижень 2 зв'язаний з губкою 4 захватного пристрою за допомогою пружного елемента 5. Друга обкладка 6 розташована на внутрішній поверхні паза 3. Обкладки конденсаторів підключено до відповідного перетворювача "ємність-дискретний код" 7, сигнал з якого поступає до регулятора 8, який за допомогою бази правил 9 формує оцінку стану проковзування (напрямок та інтенсивність).

Стан проковзування можна вичерпним чином описати залежностями координат напрямку проковзування у часі і їх похідними. Розглянемо найбільш типовий випадок, коли деталь у захватному пристрої має 2 ступені рухомості, якому відповідає двокоординатна модель. Найбільш доцільною є форма чутливого елемента з ортогональними сегментами. Подібна конфігурація чутливого елемента наведена, наприклад, у [6], де елемент має симетричну форму і складається з чотирьох сегментів. Для двокоординатної моделі достатньо фіксувати ємність двох ортогональних конденсаторів, а, отже, достатньо двоканального датчика ємності для визначення точного напрямку проковзування, що дозволяє спростити відому модель.

Таким чином, ємнісний чутливий елемент є конденсатором, обкладки якого лежать на сегментах співвісних конічних поверхонь. Поперечний переріз конденсаторів показано на рис.2,б. На рис. 2 конус поділено на чотири рівних сегмента, отже ємність кожного з чотирьох конденсаторів у чотири рази менша, ніж у цільного конічного конденсатора. Насамперед побудуємо математичну модель осесиметричної системи, тобто цільного конічного конденсатора.

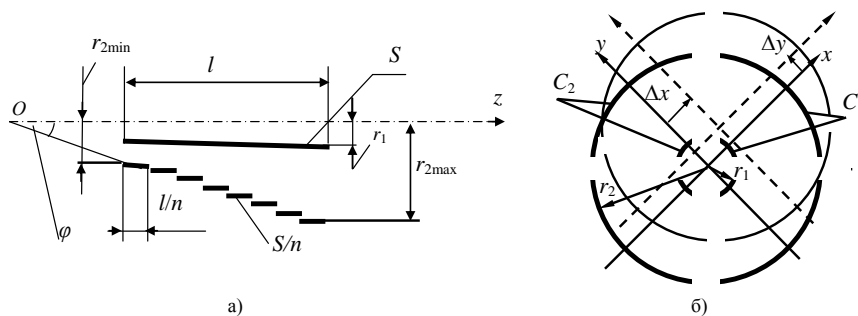


Рисунок 2 – Позначення для побудови математичної моделі ємнісного чутливого елемента

Представимо чутливий елемент як набір «елементарних конденсаторів», зокрема, як паралельне з'єднання n циліндричних конденсаторів з нескінченно малою довжиною (рис.2,а), утворених співвісними циліндричними обкладками.

Приймемо обмеження, що координатна система є ортогональною і нерухомою відносно деталі, яка проковзує в захватному пристрої робота, і внутрішнього циліндра кожного елементарного конденсатора, а її початок знаходиться у точці O (рис. 2,а). Зовнішній циліндр кожного елементарного конденсатора є рухомих і має можливість рухатись відносно предмета. Позначимо r_1 - радіус внутрішньої обкладки конденсатора, r_2 - відстань від осі симетрії до зовнішньої обкладки елементарного конденсатора, Δx і Δy - зміни координат центру рухомого елемента елементарного циліндричного конденсатору вздовж осей x і y , відповідно. Довжина обкладок конденсаторів C_1 і C_2 , утворених провідними поверхнями коаксіальних циліндрів, розділеними діелектричними вставками на чотири однакових сектора, дорівнює l (l - довжина відрізка, перпендикулярного площині рисунка 1,б).

Співвідношення проєкцій зміщення рухомої обкладки на осі x (Δx) та y (Δy) з відстанями r_1 та r_2 повинні відповідати умовам $\Delta x \ll r_1 < r_2$, $\Delta y \ll r_1 < r_2$.

Згідно з моделлю датчика проковзування [4], враховуючи, що модель є гомотетичною, ємність одного сектора циліндричного конденсатора (рис.1,б) без урахування впливу ортогональних обкладок дорівнює:

$$C = \frac{0,5\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1 + \Delta x}}.$$

В кінчній моделі радіуси внутрішніх циліндрів однакові і не змінюються вздовж подовжньої осі циліндра ($r_1 = const$). Радіуси зовнішніх циліндрів залежать від координати по осі z , що співпадає з подовжньою віссю внутрішніх циліндрів, з початком в т. O (рис.2,а), та від кута φ наступним чином:

$r_2 = (z + \Delta z)tg\varphi$, де z - поточна координата центра елементарного конденсатора по осі z , $\Delta z = l_i = l/n$ - нескінченно мала довжина елементарного конденсатора.

Ємність кінчного конденсатора представляє собою суму ємностей елементарних циліндричних конденсаторів.

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n \frac{0,5\pi\epsilon_0 \Delta z}{\ln \frac{(z_i + \Delta z)tg\varphi}{r_1 + \Delta x}}.$$

Для малих відхилень $\Delta z \ll z_i$, $\Delta x \ll r_1$, тому

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n \frac{0,5\pi\varepsilon_0\Delta z}{\ln \frac{z_i \operatorname{tg}\varphi}{r_1}}. \quad (1)$$

Переходимо від інтегральної суми до інтегралу і виконуємо заміну змінної інтегрування

$$C_{\Sigma} = \int_{z_0}^{z_1} \frac{0,5\pi\varepsilon_0}{z \cdot \operatorname{tg}\varphi} dz = 0,5\pi\varepsilon_0 \frac{r_1}{\operatorname{tg}\varphi} \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{z \cdot \operatorname{tg}\varphi} d\left(\frac{z \cdot \operatorname{tg}\varphi}{r_1}\right), \quad (2)$$

де $z_1 - z_0 = l$ (рис.2, а).

Отриманий інтеграл (2) має аналітичний розв'язок - інтегральний логарифм. Для випадку визначених границь інтегрування ємність конічного конденсатора можна розрахувати за допомогою ряду, який збігається при $z \cdot \operatorname{tg}\varphi / r_1 \neq 1$

$$C_{\Sigma} = 0,5\pi\varepsilon_0 \frac{r_1}{\operatorname{tg}\varphi} \left[\ln \ln \left(\frac{z_1 \operatorname{tg}\varphi}{r_1} \right) - \ln \ln \left(\frac{z_0 \operatorname{tg}\varphi}{r_1} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\left(\ln \frac{z_1 \operatorname{tg}\varphi}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!} - \frac{\left(\ln \frac{z_0 \operatorname{tg}\varphi}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!} \right) \right]. \quad (3)$$

На рис. 3 показано результати моделювання ємності сектору конічного конденсатора за залежністю (3).

Для перевірки отриманої залежності ємності конічного конденсатора (3) від геометричних параметрів ($l = 50$ мм, $r_1 = 1$ мм, φ , $r_2(\varphi)$) (рис.3) проведено її порівняння із залежностями ємностей циліндричних конденсаторів з радіусами внутрішніх обкладинок r_1 і зовнішніх обкладинок відповідно $r_{2\min}$ і $r_{2\max}$ (рис.2, а) для поточного φ . Аналіз наведених залежностей показує, що значення ємності конічного конденсатора не виходить з області, обмеженої ємностями циліндричних конденсаторів. Крім того, різниця між ємностями конічного і циліндричного конденсаторів показує абсолютну похибку при використанні в моделі ємнісного датчика попередньо обраної циліндричної конфігурації чутливого елемента [4]. При цьому похибки визначення зміни ємності при малих відхиленнях кута φ , зумовлених проковзуванням деталі, практично не залежать від обраних моделей. Це пояснюється тим, що нахил кривих для кожного значення кута φ приблизно однаковий як для конічного, так і для циліндричних конденсаторів. Це пояснює, чому при відомій grubості математичної моделі чутливого елемента з циліндричною конфігурацією, вона дозволяє достатньо точно визначити проковзування при малих відхиленнях кута φ , що підтверджується експериментальними випробуваннями виготовленого зразка інтелектуального датчика. Математична модель чутливого елемента з конічною конфігурацією є більш точною, ніж розроблена раніше в роботі [4], і може використовуватись в системах ідентифікації проковзування з відповідним чутливим елементом.

Розроблена математична модель (3) (рис.3) ємнісного датчика з конічною конфігурацією чутливого елемента дозволяє визначити величину проковзування в заданому напрямку за вихідними даними ємнісного датчика (за величинами ємностей C_1 або C_2).

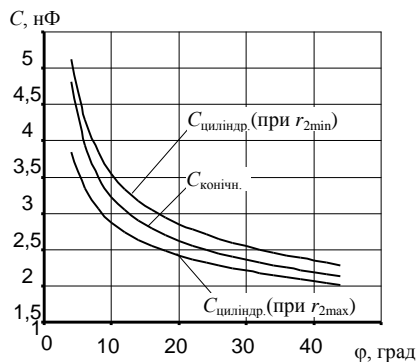


Рисунок 3 - Залежності ємностей сегментів конічного конденсатора від кута між обкладинками і граничними до нього циліндричних конденсаторів

Для того, щоб вивести залежність зміни ємності сектору конічного конденсатора від малого відхилення кута φ від попереднього усталеного значення $\Delta C = f(\Delta\varphi)$, розкладемо залежність (3) у ряд Тейлора і відкинемо члени, що є меншими першого порядку малості. Для цього продиференціюємо залежність (3) по φ .

$$dC_{\Sigma} = \frac{\partial C_{\Sigma}(\varphi)}{\partial \varphi} d\varphi,$$

$$dC_{\Sigma} = 0,5\pi\epsilon_0 r_1 \frac{1}{\sin^2 \varphi} \left[\frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln \frac{z_1 \operatorname{tg} \varphi}{r_1} \ln \frac{z_0 \operatorname{tg} \varphi}{r_1}} - \ln \frac{z_1 \operatorname{tg} \varphi}{r_1} + S \right] d\varphi,$$

$$\text{де } S = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k \left(\left(\ln \frac{z_1 \cos \varphi}{r_1} \right)^{k-1} - \left(\ln \frac{z_0 \cos \varphi}{r_1} \right)^{k-1} \right) - \left(\ln \frac{z_1 \cos \varphi}{r_1} \right)^k + \left(\ln \frac{z_0 \cos \varphi}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!},$$

$$dC_{\Sigma} = A d\varphi,$$

(4)

$$\text{де } A = 0,5\pi\epsilon_0 r_1 \frac{1}{\sin^2 \varphi} \left[\frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln \frac{z_1 \operatorname{tg} \varphi}{r_1} \ln \frac{z_0 \operatorname{tg} \varphi}{r_1}} - \ln \frac{z_1 \operatorname{tg} \varphi}{r_1} + S \right].$$

При переході від диференціалів до кінцевих різниць отримуємо лінійну залежність ΔC від $\Delta \varphi$:

$$\Delta C_{\Sigma} = A \Delta \varphi,$$

де A є постійним коефіцієнтом для фіксованого значення φ .

Використання у системі ідентифікації проковзування лінійних рівнянь з постійними коефіцієнтами дозволить значно підвищити швидкість прийняття рішень щодо стану проковзування, якщо розділити у часі задачу обчислення коефіцієнтів і задачу прийняття рішень (розпаралелити обчислення), при умові, що прийняття рішень про ідентифікацію виконуються у реальному часі, а обчислення коефіцієнтів виконуються у фоновому режимі.

Розроблена лінеаризована математична модель (4) ємнісного датчика з кінцевою конфігурацією чутливого елемента дозволяє визначити величину проковзування у відповідному напрямку за вихідними даними ємнісного датчика (за величиною ємності C_1 або C_2) для малих проковзувань.

Для визначення залежності ємності секторів конденсатора від напрямку проковзування найбільш зручно задати напрямок проковзування за допомогою кута θ в площині руху деталі (рис.4).

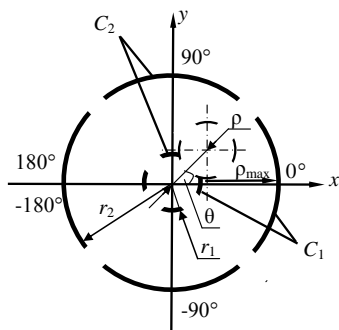


Рисунок 4 - Позначення для побудови математичної моделі залежності напрямку і величини проковзування від положення обкладинок ємнісного чутливого елемента

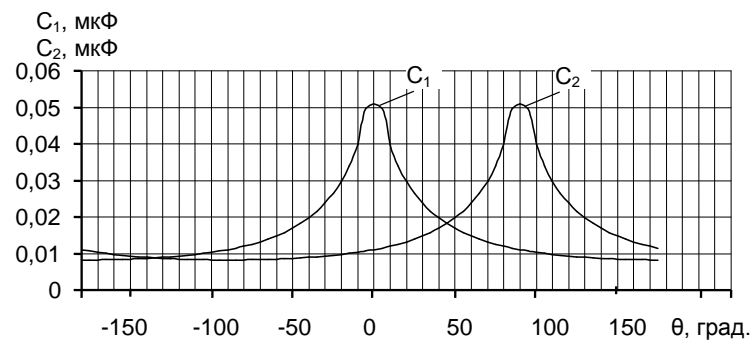


Рисунок 5 - Залежності ємностей конденсаторів C_1 і C_2 від кута напрямку проковзування θ

Виходячи з того, що обкладки секторів конусного конденсатора розташовані взаємно перпендикулярно та із заданих можливих значень кута θ , відстань r_2 для обкладинок C_1 і C_2 буде відповідно:

$$r_{2C1} = \rho_{\max} - \rho \cos \theta; \quad r_{2C2} = \rho_{\max} - \rho \sin \theta,$$

де ρ_{\max} – обмежена геометричною конструкцією чутливого елемента відстань між внутрішньою та зовнішньою обкладками конденсатора; ρ – полярний радіус напрямку проковзування; θ – кут напрямку проковзування.

Отже, при

$$\operatorname{tg} \varphi_{C1} = \frac{\rho_{\max} - \rho \cos \theta}{z_1}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{C2} = \frac{\rho_{\max} - \rho \sin \theta}{z_1}.$$

Можна здійснити наступну трансформацію моделі (4) для ємності конденсатора C_1 в залежності від кута

проковзування θ :

$$C_{\Sigma 1} = 0,5\pi\epsilon_0 \frac{r_1}{z_1} \left[\ln \ln \left(\frac{\rho_{\max} - \rho \cos \theta}{r_1} \right) - \ln \ln \left(\frac{z_0 \frac{\rho_{\max} - \rho \cos \theta}{z_1}}{r_1} \right) + S_1 \right], \quad (5)$$

де

$$S_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\ln \frac{\rho_{\max} - \rho \cos \theta}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\ln \frac{z_0 \frac{\rho_{\max} - \rho \cos \theta}{z_1}}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!}.$$

Ємність конденсатора C_2 в залежності від кута проковзування θ визначається наступним чином:

$$C_{\Sigma 2} = 0,5\pi\epsilon_0 \frac{r_1}{z_1} \left[\ln \ln \left(\frac{\rho_{\max} - \rho \sin \theta}{r_1} \right) - \ln \ln \left(\frac{z_0 \frac{\rho_{\max} - \rho \sin \theta}{z_1}}{r_1} \right) + S_2 \right], \quad (6)$$

де

$$S_2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\ln \frac{\rho_{\max} - \rho \sin \theta}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\ln \frac{z_0 \frac{\rho_{\max} - \rho \sin \theta}{z_1}}{r_1} \right)^k}{k \cdot k!}.$$

На рис.5 побудовано залежності ємностей конденсаторів C_1 і C_2 від кута напряму проковзування θ , що змінюється в діапазоні від -180 до 180° при $\rho_{\max} = 6$ мм, $\rho = 3$ мм. За допомогою отриманих залежностей (5) і (6) і рис.5 можна визначити напрямок і величину проковзування, використовуючи вихідні дані ємнісного датчика (за величинами ємностей C_1 і C_2) для двохкоординатної моделі.

Висновок. Розроблена математична модель ємнісного датчика з конічною конфігурацією чутливого елемента дозволяє визначити напрямок і величину проковзування за вихідними даними ємнісного датчика (за величинами ємностей C_1 і C_2) для двохкоординатної моделі або за лінеаризованою моделлю для малих проковзувань і може використовуватись для визначення напрямку проковзування в системах ідентифікації проковзування з відповідним чутливим елементом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Седалищев В.Н. Методы и средства измерений неэлектрических величин: Учеб. Пособие / Седалищев В.Н. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 392 с.
2. Kondratenko Y.P. Measurement methods for slip displacement signal registration / Kondratenko Y.P. // Proceedings of the International Symposium "Measurement Technology and Intelligent Instruments". – Chongqing-Wuhan, China: Published by SPIE, USA, 1993. – pp. 1451-1461.
3. Adaptive Gripper Devices for Robotic Systems / [Kondratenko Y.P., Kondratenko V.Y., Shvets E.A., Shyshkin O.S.] // MECHATRONICS AND ROBOTICS (M&R-2007): Proceeding of Intern. Scientific-and-Technological Congress (October 2-5, 2007). – Saint-Petersburg: Polytechnical University Press, 2008. – Pp. 99-105.
4. Кондратенко Ю. Интеллектуальный датчик проковзування адаптивного робота з мікропроцесорною системою обробки сигналів / Кондратенко Ю., Назарова І. // Технічні вісті. – 2010/1(31), 2(32). – С. 74-77.
5. Романов В.Н. Теория измерений. Точность средств измерения: учеб. пособие / Романов В.Н. – СПб: СЗТУ, 2003. – 154 с.
6. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Джексон Р.Г. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
7. Раннев Г.Г. Интеллектуальные средства измерений: учебник [для студ. высш. учеб. заведений] / Раннев Г.Г. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 272 с.
8. Пат. на кор. мод. 27722 Україна. МПК (2006) B25J 19/02 Датчик для реєстрації проковзування з дискретним вихідним сигналом / Кондратенко Юрій Пантелійович (UA); Шишкін Олександр Сергійович (UA); Кондратенко Володимир Юрійович (UA); Марковський Ігор Володимирович (UA); Чернов Сергій Констянтинович (UA). u200707710, заявл. 09.07.2007. Опубл. 12.11.2007, бюл. № 18/2007
9. Kondratenko Y.P. Modern Sensor Systems of Intelligent Robots Based on the Slip Displacement Signal Detection / Kondratenko Y.P., Shvets E., Shyshkin O. // Annals of DAAAM for 2007 & Proceeding of the 18th Int. DAAAM Symp. "Intelligent Manufacturing and Automation", Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2007. – Pp. 381-382.

Надійшла до редколегії 20.03.2011

Рецензент: М.В.Гребченко

Ю.П. КОНДРАТЕНКО, И. Л. НАЗАРОВА
Национальный университет кораблестроения имени
адмирала Макарова

Y. KONDRATENKO, I. NAZAROVA
National University of Shipbuilding named after
Admiral Makarov

Математическая модель емкостного датчика с конической конфигурацией чувствительного элемента. Разработана математическая модель емкостного датчика с конической конфигурацией чувствительного элемента, которая позволяет определить направление и величину проскальзывания и может использоваться для определения параметров проскальзывания деталей в адаптивных робототехнических системах. Проведены проверка адекватности полученной модели и ее сравнительный анализ с существующими моделями.
Математическая модель, идентификация направления проскальзывания, емкостной датчик.

Mathematical Model of a Capacitive Sensor with a Conical Configuration of the Sensing Element. There is the mathematical model of a capacitive sensor with a conical configuration of the sensing element, which allows to determine the direction and magnitude of slippage and can be used to determine the parameters of detail's slippage in the adaptive robotic systems. Verification of the adequacy of the resulting model and its comparative analysis with existing ones are done.
The mathematical model, identification of the slippage direction, a capacitive sensor.