

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 680.179.14.(088.8)

**ДРЕЙФ ВІЛЬНОГО ЕЛЕКТРОНА У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТАХ, ЩО
ОБЕРТАЮТЬСЯ**

¹⁾Скицюк В.І., ²⁾Вайнтрауб М.А., ¹⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; ²⁾Інститут професійно-технічної освіти АПН України, м. Київ, Україна

У статті розглядається дрейф вільного електрона у технологічних об'єктах, що обертаються під дією відцентрової сили при металообробці

Вступ. Постановка задачі

За останні кілька десятиліть електричні явища у металообробці були досить ретельно вивчені [1 , 2, 3]. Наразі це стосується здебільшого термоелектрики, яка супроводжує руйнацію матеріалів під час процесів різання. Така цікавість до саме цих процесів пояснюється тим, що є можливість приблизної оцінки температури у зоні різання. Ця система наукових досліджень була здебільшого спрямована на можливість посередньої оцінки ступеню зносу інструмента і, як наслідок, можливості побудови за цим принципом адаптивної системи керування процесом металообробки. Але всі спроби так і залишилися нереалізованими. З одного боку ця ситуація виникла тому, що конструкція металообробного верстата є дуже складним електромеханічним об'єктом, а з іншого, врахування виключно термоелектричних явищ виявило односторонність вирішення цієї проблеми. Одночасно з цим цей підхід до вирішення поставленої задачі залишив поза розглядом цілу низку електрофізичних явищ, які впливають на загальний результат роботи адаптивної системи.

Звідсіля є постановка задачі щодо дослідження електричних явищ процесів металообробки, оскільки наразі застосовано здебільшого цілеспрямованість на терморуйну силу (ТРС) різання, як одного із засобів вирішення проблеми не лише у лабораторних дослідженнях, а й основної фундації принципів адаптивної системи керування.

Не треба досить прискіпливого погляду, щоб побачити подвійність ТРС, тобто вона складається зі сталої та змінної складових. При досить достеменному дослідженні можна помітити, що, наприклад, термоелектричні явища можуть сягати своєю частотою десятків мегаГерц і пов'язані з перехідними процесами у технологічному обладнанні [4]. Позаяк виявляються зовсім недослідженими кілька фізичних ефектів, які стосуються процесів металообробки:

- контурна ЕРС, яка виникає у процесі металообробки при контактуванні різального інструмента і деталі під дією зовнішнього та внутрішнього електромагнітного поля (ЕМП);

- скін-ефект, який виникає на поверхні обладнання під дією зовнішнього та внутрішнього ЕМП;
- вихроструміві ефекти під дією ЕМП;
- уніполярна індукція, яка виникає у об'єктах, що обертаються, у статичному магнітному полі;
- рух виродженого електронного газу у об'єктах, що обертаються;
- рух виродженого електронного газу під дією вібрацій;
- ЕРС, яка виробляється підшипниками шпинделя;
- коливання опору шпинделя на масу верстата залежно від швидкості обертання.

Цей досить невеликий перелік неврахованих електрофізичних явищ у металообробці викликає щонайменше здивування, чому вони не були враховані при вимірюванні термо-ЕРС. Тому основна задача проблеми, що розглядається, - це визначення низки чинників, які впливають на загальний результат вимірювань.

Серед всіх відомих електричних явищ, пов'язаних з металообробкою [1, 2, 3, 4], рух елементарного носія заряду (електрона) і, як наслідок, виродженого електронного газу в тілах, що обертаються, залишився поза увагою. Тим не менш це явище має місце при обертанні циліндричних деталей та інструментів. Який внесок це явище робить у загальну картину електричних процесів у металообробці, досі не відомо. На першому етапі автори статті досліджують рух електрона як фізичного об'єкту в деталі, що обертається.

Кінематика руху електрона у деталі, що обертається

Електрони, як носії струму у масі металу, знаходяться у вільному стані, утворюючи таким чином вироджений електронний газ. Електричний заряд електрона становить: $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл, а маса $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг.

З класичної фізики відомо, що рух електрона під дією сторонньої сили $F_{ст}$ може бути описаний наступним диференціальним рівнянням [5]:

$$m_e \frac{dV}{dt} = F_{ст} - m_e \frac{V}{\tau} \quad (1)$$

де V - середня швидкість руху електрона у провіднику, τ – інерційний час, який залежить від форми кристалічної ґратки.

Так, наприклад, для міді $\tau \approx 2,5 \cdot 10^{-14}$ с.

Звідси (1) маємо дві невизначені величини, а саме $F_{ст}$ та V . Обидві величини мають векторний характер, а, отже, мають наступний опис. Стороння сила $F_{ст}$ є складовою комплексної дії класичних механічних сил стосовно обертального руху, тобто у векторному вигляді:

$$F_{ст} = F_n + F_\tau + F_k \quad (2)$$

де F_n – нормальна відцентрова сила, F_τ – тангенціальна сила, F_k – сила Коріоліса.

Відповідним до цих сил є вектори швидкості, тобто:

$$V_{ст} = V_n + V_\tau + V_k \quad (3)$$

де V_n – нормальна швидкість, V_τ – тангенціальна швидкість, V_k – швидкість Коріоліса.

Аналогічно маємо векторну залежність щодо прискорення:

$$\mathbf{a}_{CT} = \mathbf{a}_n + \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_k \quad (4)$$

де \mathbf{a}_n – нормальне прискорення, \mathbf{a}_τ – тангенціальне прискорення, \mathbf{a}_k – прискорення Коріоліса.

Для того, щоб вирішити рівняння (1), не вистачає величин F_{CT} та V . З векторної діаграми руху визначимо вплив кожної з цих величин на параметри руху (рис. 1).

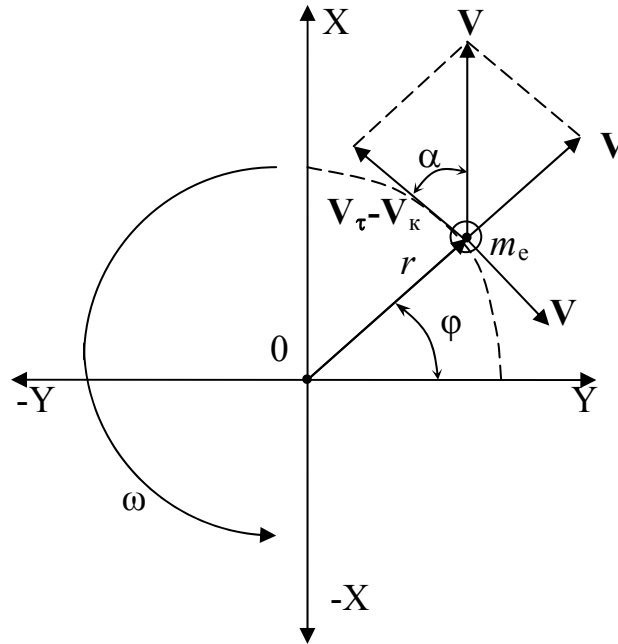


Рис. 1. Векторна діаграма швидкостей руху електрона

Користуючись законами класичної фізико-механіки маємо можливість отримати наступні залежності, а саме стосовно прискорення

$$a_\tau = \gamma r; a_n = \omega^2 r; a_k = 2\omega V_n \quad (5)$$

де γ - кутове прискорення.

Стосовно швидкості маємо наступне:

$$V_\tau = \omega \cdot r; V_n = \omega^2 \tau \cdot r; V_k = -2\omega V_n \cdot \tau \quad (6)$$

Стосовно сил, діючих на електрон, отримуємо:

$$F_\tau = 0; F_n = m_e \omega^2 r; F_k = -2m_e \omega^3 V_n \quad (7)$$

З виразів (5, 6, 7) отримуємо наступні залежності стосовно F_{CT} та V .

$$F_{CT} = \sqrt{F_k^2 + F_n^2} = \sqrt{(-2m_e \omega^3 \tau r)^2 + (m_e \omega^2 r)^2} = m_e \omega^2 r a \quad (8)$$

де $a = \sqrt{4\omega^2 \tau^2 + 1}$.

Повний вектор швидкості електрона матиме наступний вигляд:

$$V = \sqrt{(V_{\tau} - V_{\kappa})^2 + V_{\text{H}}^2} = \sqrt{(\omega r - 2\omega V_{\text{H}} \tau)^2 + (\omega^2 \tau r)^2} = \omega \cdot r \cdot b \quad (9)$$

де $b = \sqrt{4\omega^4 \tau^4 - 3\omega^2 \tau^2 + 1}$.

Отримані залежності (8) та (9) підставляємо у (1), звідкіля:

$$m_e \omega b \frac{dr}{dt} = m_e \omega^2 r a - m_e \frac{\omega r b}{\tau} \quad (10)$$

Розділимо обидві частини рівняння (10) на $m_e \omega$:

$$b \frac{dr}{dt} = \omega r a - \frac{r b}{\tau} \quad (11)$$

Перетворимо рівняння (11) у зручне для вирішення поставленої задачі, тобто:

$$\frac{dr}{dt} = r \left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) \quad (12)$$

Рівняння (12) можна вирішити простим інтегруванням, але необхідно визначитись з його межами стосовно радіусу r та часу t . Верхня межа радіусу знаходження електрона у межах маси деталі є радіус деталі $R_{\text{д}}$, а плинний радіус R .

Мінімальний радіус розташування електрона (R_0) не може бути рівним нулю з наступних причин:

- по-перше, електрон є рухливою елементарною частинкою, яка не може знаходитися у стані спокою;
- по-друге, якщо електрон стабільно знаходиться на осі обертання, то це протирічить законам обертання циліндричних об'єктів (деталей) у механообробці;
- по-третє, електрон не може знаходитися на осі обертання деталі, оскільки це суперечитиме одному з фундаментальних законів фізики – співвідношенню Гейзенберга [5]:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2} \quad (13)$$

де Δx , Δy , Δz - невизначеність трьох просторових координат; Δp_x , Δp_y , Δp_z - невизначеність проекцій імпульсу p мікрооб'єкту на координатній осі XYZ.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.5459 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с}, \quad h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с} - \text{ стала Планка.}$$

Як наслідок, величина мінімального радіусу обертання електрона навколо осі деталі не може бути менше за певну величину. Цією величиною визначаємо R_0 .

Для того, щоб вирішити рівняння (1) необхідно застосувати низку початкових умов, а саме: а) ідеальна кристалічна ґратка металу; б) електрон рухається у площині перерізу координат XY, яка перпендикулярна осі обертання Z; в) товщина площини дорівнює діаметру електрона; г) матеріал деталі не має магніт-

них властивостей, у супротивному випадку необхідно було б враховувати сили та радіуси Лоренца.

Діапазон зміни часу визначається як момент старту електрона з орбіти радіусом R_0 , тобто нижня межа часу дорівнює нулю. Верхня межа, яка нас цікавить $T=1/n_{\text{об}}$, де $n_{\text{об}}$ – швидкість обертання деталі. Проінтегруємо обидві частини рівняння (12).

$$\int_{R_0}^R \frac{dr}{dt} = \int_0^t \left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) dt \Rightarrow \ln \frac{R}{R_0} = \left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) t \quad (14)$$

Звідкіля
$$\frac{R}{R_0} = e^{\left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) t} \quad (15)$$

З рівняння (15) отримуємо наступну залежність:

$$R = R_0 e^{\left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) t} \quad (16)$$

Аналогічно для швидкості отримуємо залежність:

$$V = \omega \cdot R_0 \cdot b \cdot e^{\left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) t} \quad (17)$$

Досліджуємо співвідношення $(\omega a/b - 1/\tau)$ на можливу величину при різних значеннях ω . Швидкість обертання деталі $n_{\text{об}}$ обиралася з наступного ряду: 100; 1000; 10000; 30000; 50000 об/хв. Таке дослідження доводить, що у межах розглядаємих реальних швидкостей обертання технологічного об'єкту можна стверджувати, що

$$\left(\frac{\omega a}{b} - \frac{1}{\tau} \right) t \rightarrow \omega t \quad (18)$$

де $\omega = 2\pi n_{\text{а}}$.

Отже, з виразів (16) та (17) остаточно отримуємо наступний вигляд:

$$R = R_0 e^{\omega t}; \quad V = \omega R_0 e^{\omega t} \quad (19)$$

Зміна радіусу обертання та швидкості за один період T становитиме:

$$R_{\text{о}} = R_0 (1 + e^{\omega T}); \quad V_{\text{о}} = \omega R_0 (1 + e^{\omega T}) \quad (20)$$

Швидкість V_T (20) є повною (середньою) швидкістю електрона у масі метала. Нас цікавить відцентрована швидкість електронів у масі деталі i , як наслідок, різниця потенціалів між його віссю (центром) та периферією зовнішньої поверхні. Тобто з (6) отримуємо наступні залежності:

$$V_i = \omega^2 \tau R_0 e^{\omega t}; \quad V_{i\text{о}} = \omega^2 \tau R_0 (1 + e^{\omega T}) \quad (21)$$

Звідси можна зробити висновок, що швидкість дрейфу електрона у радіальному напрямку пропорційна квадрату кутової частоти та радіусу обертання у момент старту.

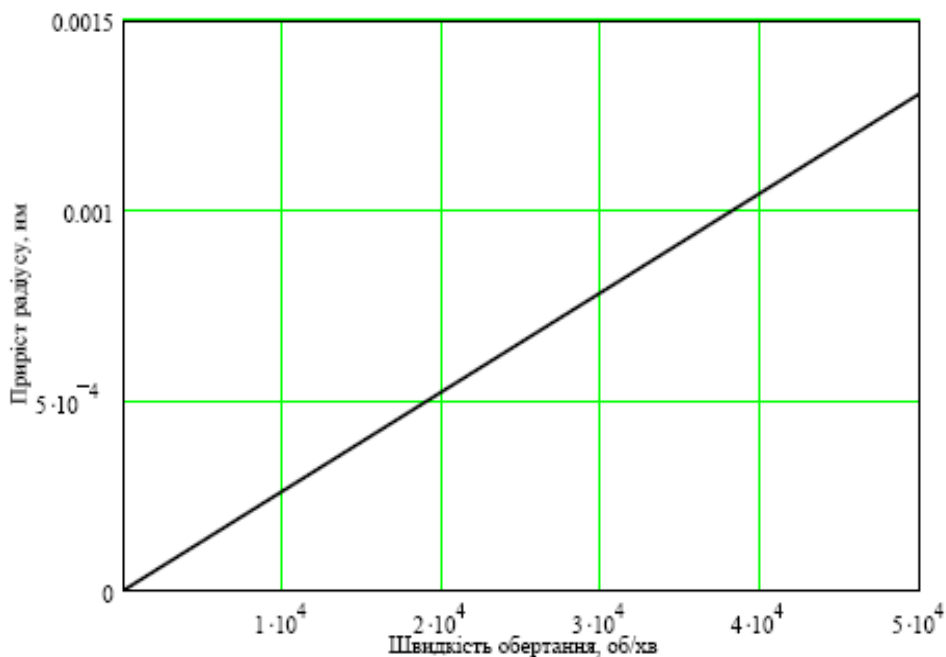


Рис. 2. Відносний приріст радіусу обертання електрона (20) при $R_0=10$ мм, $t=\tau$

Розрахунки за залежностями (19, 20) показують, що електрон отримує необмежену проникність (рис. 2) та швидкість (рис. 3, рис. 4), що співпадає з електронною теорією металів для ідеалізованого випадку [8].

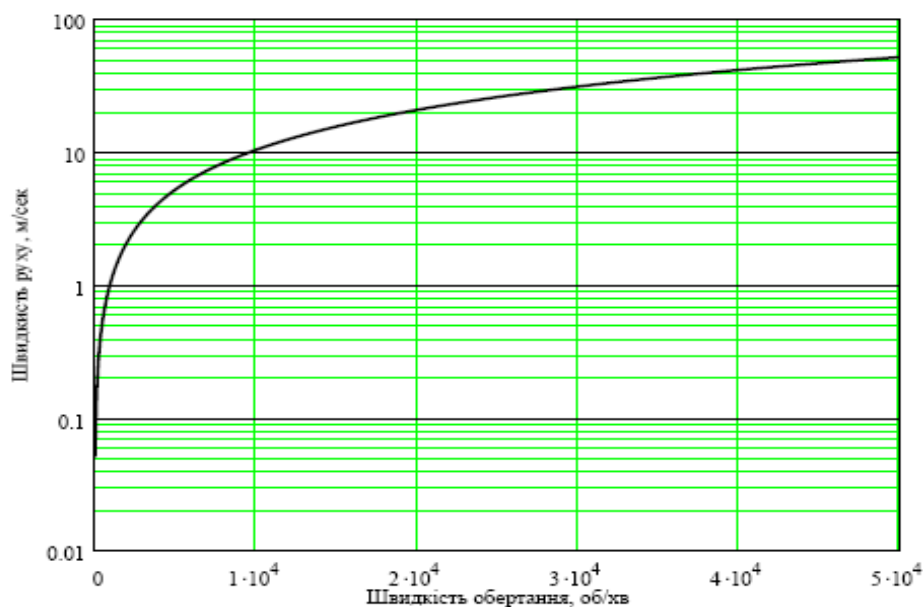


Рис. 3. Абсолютна швидкість руху електрона відносно нерухомої системи координат XY (19) при $R_0=10$ мм, $t=1$ с

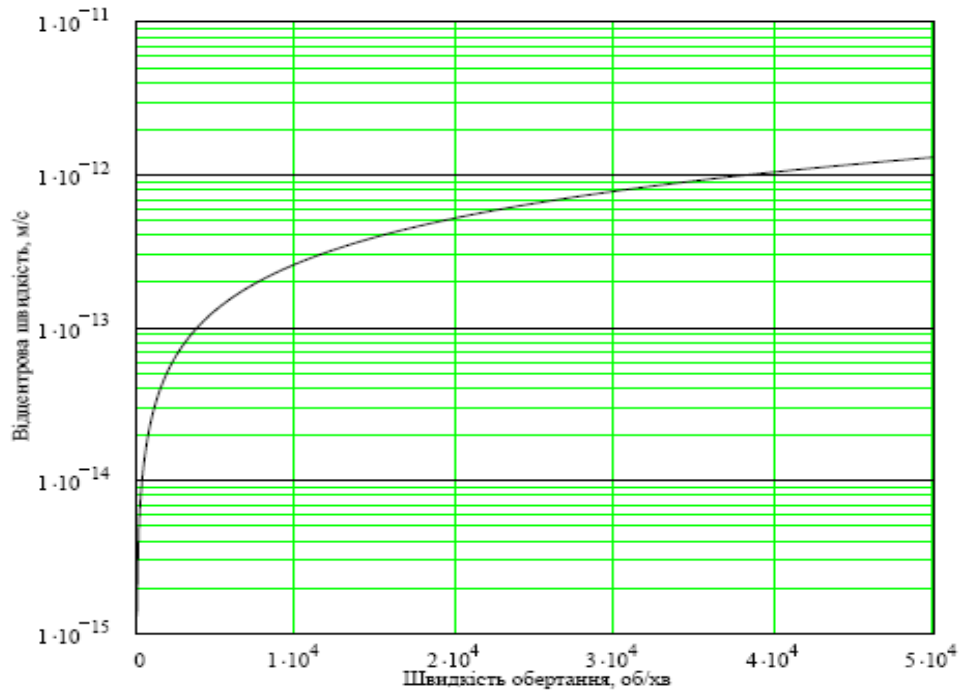


Рис. 4. Відцентрована швидкість електрона (21) при $R_0 = 10$ мм, $t = \tau$

Висновки

Проведені теоретичні дослідження довели, що є присутнім явище дрейфу електрона у площині перерізу, перпендикулярній осі обертання деталі. Величина цього дрейфу приблизно може бути визначена за виразом (21). Ця залежність надає можливості дослідити підгрунтя утворення різниці потенціалів між віссю обертання та поверхнею деталі. Як наслідок, подібне явище створює електромагнітне поле, яке є засобом технологічного контролю деталі та інструмента. Це є засади подальшого дослідження щодо значного підвищення точності електромагнітних пристроїв контролю якості надточної продукції приладобудування.

Ці дослідження, як і попередні [9], повинні бути використаними для підготовки фахівців технічного контролю або підготовки висококваліфікованих фахівців інтегрованих професій з експлуатації вимірювальної техніки у приладобудуванні, металургійній промисловості, машинобудуванні та інших галузях виробництва, оскільки вони вирішують основні проблеми новітніх технологій.

Література

1. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение. 1982. – С.305.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Коробов Ю. М., Прейс Г. А. Электрический износ при трении и резании металлов. – К.: Техника, 1976. – 200 с..
4. Васильев С.В. Использование электрических явлений при резании для коррекции режимов обработки. Метод. рекоменд. - М.: ЭНИМС, 1981. – 76 с.

5. Кузмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К.Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
6. В. Смайг. Электростатика и электродинамика. / Перев. со второго амер. издания А.В.Гапонова, М.А.Миллера. - М.: Изд. иностр. литературы, 1954. – 804 с.
7. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука. Глав. мат.-физ. лит., 1965. – 780 с..
8. Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И. Электронная теория металлов: моногр. – М.: Наука. Глав. мат.-физ. лит., 1971. – 416 с.
9. Скицюк В.І, Вайнтрауб М.А. Межі застосування ризику як об'єкту налагодження приладу. Частина I // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2009. – Вип. 37. – С. 152 - 161.

<p>Скицюк В.І, Вайнтрауб М.А. Дрейф свободного электрона в технологических вращающихся объектах В статье рассматривается дрейф свободного электрона в технологических объектах, которые вращаются под действием центробежной силы при обработке металлов</p>	<p>Skytsiouk V.I., Vaintraub M.A. The drift of the free electron in technological revolving objects In work state at the drift of the free electron in technological objects, which revolving under the action of the centrifugal force at the metal working</p>
---	---

*Надійшла до редакції
20 травня 2009 року*