

обчислювальна техніка в технологічних процесах. –2002. -№1. -С. 133-138.

4. Гаврилов А.Н. Точность производства в приборостроении и машиностроении. – М.: Машиностроение, 1973. – 567с.

Скицюк В.И., Диордица И.М., Науменко В.И. Измерение формы детали в статическом состоянии и линейном детерминированном движении режущего инструмента. Статья посвящена вопросам, связанным с геометрической точностью изготовления деталей цилиндрической формы на токарных станках с системами CNC. Исследуется возможность получения высокоточных геометрических форм цилиндрического вида с помощью комплексной адаптивной системы процессом металлообработки.	Skytsiouk V.I., Diorditsa I.M., Naumenko V.I. Dimension of the detail form at the statical state and linear determinated motion of the cutting tool. The work state at problems of the geometry fidelity of the cylindrical details on the lathes with CNC system. Possibility receiving of the precision of the geometry fidelity of the cylindrical details by means of complex adaptive system for the metal processing is investigated.
--	---

*Надійшла до редакції
11 січня 2005 року*

УДК 621: 538

ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ КОНТРОЛЮ ВЗАЄМОДІЇ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА З ДЕТАЛЛЮ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

Скицюк В.І., Ключко М.М., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут" м. Київ, Україна

В роботі йдеться про засади теоретичного обґрунтування контролю точності виготовлення прецизійних деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, які покладені в основу сучасних контрольно-вимірювальних систем для підвищення ефективності металообробки

Вступ. Постановка завдання

Контроль зносу різального інструмента є одною з актуальних завдань, які виникають при створенні автоматизованих систем прецизійного процесу обробки металів. Процес контролю містить, по-перше, реєстрацію моменту торкання та заглиблення інструмента в деталь, яка оброблюється, для подальшого визначення стадій стану різальної частини інструменту. Як довели дослідження [1, 2, 3], високоточним методом визначення моменту торкання є метод, за яким вся система обладнання разом із деталлю розглядається як замкнений електричний ланцюг.

Перша проблема, що виникає на шляху створення прецизійних методів та приладів контролю виготовлення деталей у прецизійному приладобудуванні, - це відсутність електричних моделей, які діють на підставі вимірювання змінних або пульсуючих струмів та наслідки їх дії у замкненому електричному колі технологічної системи обладнання (ТОС).

З робіт [1, 2, 3] ясно, що існуючі електричні моделі металооброблювального обладнання мають низку суттєвих недоліків, оскільки перевага надається статичним електричним струмам під час металообробки. Моделей, які описують момент торкання та його контроль за змінним струмом, дуже мало [1, 2], а опис електричних моделей стадії “присутність” зовсім відсутній. Тому метою цієї роботи є створення електричної моделі технологічного обладнання, котра може бути використаною при подальших розробках схем контрольно-вимірювальних пристроїв для систем керування процесом лезвійної механообробки на CNC-верстатах. Пропонуємо нові електричні моделі для токарної обробки враховують вади попередніх моделей.

1 Моделювання електричної схеми токарного обладнання

Електричні моделі, що наведені на рис. 1 та 2, складаються з наступних активних та пасивних компонентів:

- $E_1(t)$ та $E_3(t)$ - еквівалентні генератори змінної напруги по підтримці фізичного принципу роботи системи торкання;
- $E_2(t)$ - еквівалентний генератор напруги ближньої присутності;
- $i_0(t)$ - еквівалентний генератор шумового струму;
- R_1 та R_9 - еквівалентний внутрішній опір генераторів напруги;
- R_3 - еквівалентний опір шпінделя верстата;
- R_4 - еквівалентний опір зони торкання;
- R_5 - еквівалентний опір пінолі верстата;
- R_6 та R_7 - еквівалентні частини опору деталі відносно точки торкання;
- R_2 - еквівалентний опір кола ближньої присутності;
- ключ “Т” - імітатор торкання.

При металообробці у процесі торкання інструменту до деталі можуть виникати чотирьох видів.

1.1 Перша ситуація при торканні інструменту до деталі

Торкання відсутнє (ключ “Т” розімкнений), деталь не обертається (але ця ситуація є уявним явищем з погляду засад фізики). Фактично торкання існує через мережу електромагнітних полів, які є властивістю всіх верстатів, оскільки в основі їх побудови є електромагнітні матеріали. В цієї ситуації сума струмів, які входять у точку В, дорівнюють сумі вихідних струмів:

$$i_0 + i_1 = i_5. \quad (1)$$

Струм $i_2 = 0$, тому що за умови джерело напруги $E_2(t) = 0$ при $n_{\text{дет}} = 0$.

У статичному стані сигнал присутності у первинному перетворювачі утворюється завдяки струму i_7 скрізь деталь, який знаходиться з умови:

$$i_5 = i_0 + i_1 = i_3 + i_7 \quad (2)$$

$$\text{де } i_1 = \frac{E_1(t)}{R_1 + R_5 + \frac{R_3(R_6 + R_7)}{R_3 + R_6 + R_7}};$$

$$i_7 = (i_0 + i_1) \frac{R_3}{R_3 + R_6 + R_7}.$$

Струм від електромагнітних шумів i_0 досить невеликий, щоб утворити сигнал достатньої потужності. При цьому головну роль відіграє струм i_1 , тобто та його частина, котра протікає скрізь оброблювану деталь. Величина його залежить від величини опору навантаження на джерело напруги $E_1(t)$, що генерує спеціальний генератор струму:

$$i_1 = \frac{E_1(t)}{R_1 + R_{AB}}, \quad (3)$$

де R_{AB} - опір частини схеми між точками А та В (точки підключення генератора) при відсутності торкання, що обчислюється за умови [4, 5]:

$$R_{AB} = R_5 + \frac{R_3(R_6 + R_7)}{R_3 + R_6 + R_7}. \quad (4)$$

У статичному стані опори R_3 та R_5 практично рівні між собою та коливаються у межах 0,1...2 Ом. Опір деталі ($R_6 + R_7$) здебільшого не перевищує 0,3...5 Ом, тобто струм i_7 коливається у межах приблизно однієї третини від i_1 і для розрахунків у наведеному прикладі з достатньою точністю визначається як:

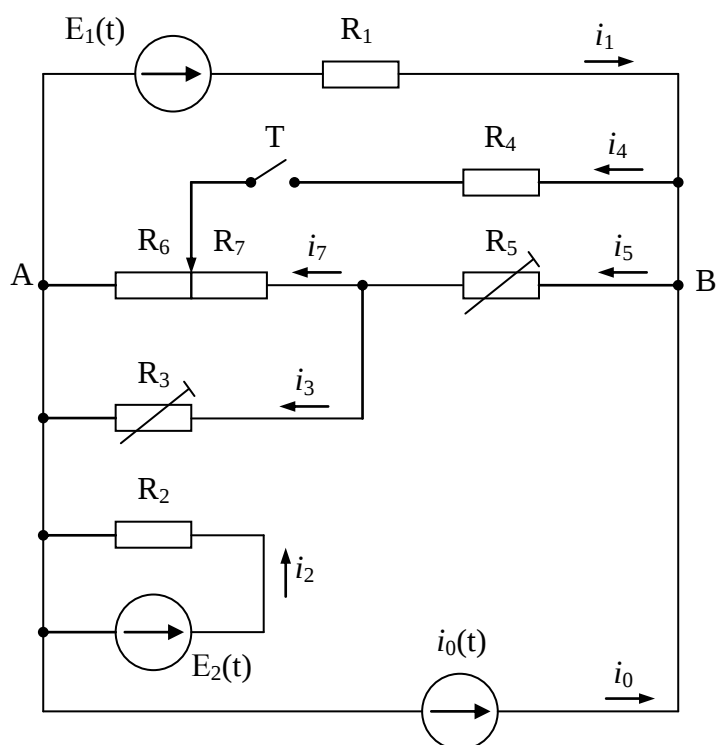


Рисунок 1 - Схема електричної моделі токарного верстата

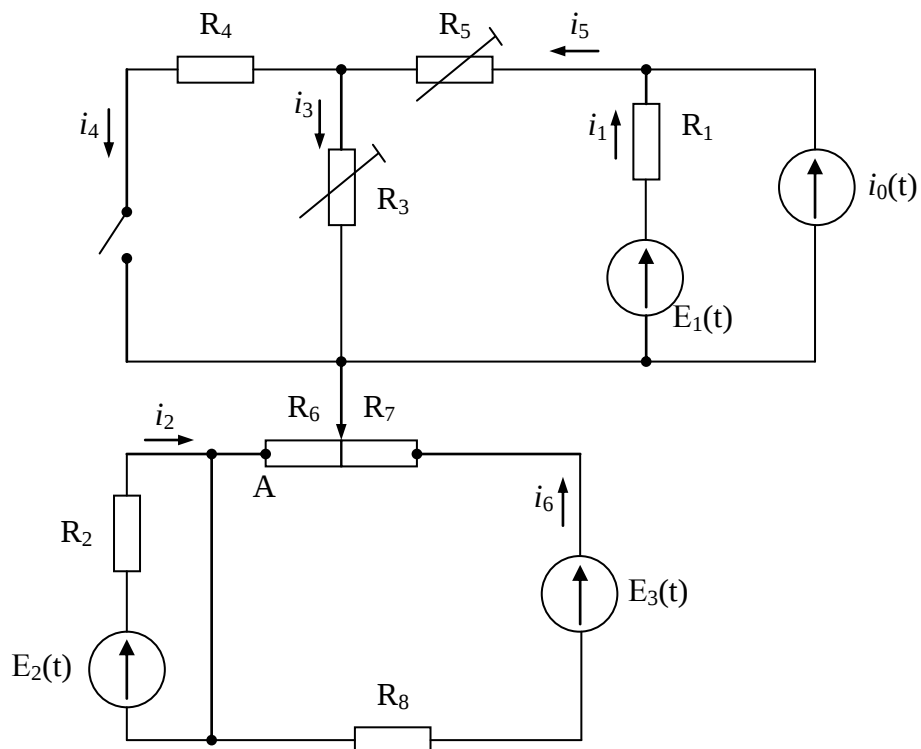


Рисунок 2 - Схема електричної моделі фрезерного верстата та ОЦ

$$i_7 \approx (i_1 + i_0) / 3. \quad (5)$$

Струм i_3 не є корисним, оскільки являє собою паразитне навантаження джерела напруги $E_1(t)$. Витрати енергії настільки малі, що вони при отриманні сигналу присутності не впливають на перерозподіл струмів у ланцюзі верстата.

1.2 Друга ситуація при торканні інструменту до деталі

У цьому випадку на різницю від попереднього є імітація торкання, тобто ключ “Т” замкнений. Наявність струму i_5 не є важливим, позаяк присутність вважається зареєстрованою. При торканні чутник реагує на струм i_4 . Опір R_4 є нелінійним опором зони торкання, але в межах заглиблення різального інструменту у деталь (до 1 мкм) при їх торканні лінійність витримується досить вірно (рис. 3, 4). Струм i_4 , на який безпосередньо реагує чутник при торканні, у такому разі буде дорівнювати [5, 6, 7]:

$$i_4 = U_{AB} \frac{R_5(R_5 + R_6 + R_7) + R_5 R_7}{(R_4 + R_5) \cdot (R_5 + R_6 + R_7) + (R_5 + R_6) R_7} \cdot \frac{R_5 + R_6 + R_7}{R_5(R_5 + R_6 + R_7) + (R_5 + R_6) R_7}, \quad (6)$$

де напруга U_{AB} визначається як: $U_{AB} = R_{AB}(i_1 + i_0)$;

$$R_{AB} = \frac{[R_7 \cdot R_4 + R_6(R_4 + R_5 + R_7)] \cdot [R_5 \cdot R_7 + R_3(R_4 + R_5 + R_7)]}{(R_4 + R_5 + R_7) \cdot [R_7(R_4 + R_5) + (R_3 + R_6) \cdot (R_4 + R_5 + R_7)]} + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_7}. \quad (7)$$

Звідсіля видно, що при торканні, контактуючу групу інструмент-деталь можна розглядати як джерело струму з напругою холостого ходу U_{AB} та внутрішнім опором R_{AB} , які відповідають попередньому випадку. Якщо зважити на те, що для підвищення надійності електричне коло верстату містить джерело $E_1(t)$, то навіть при його відсутності або виході з ладу ($i_1 = 0$) струм через зону контакту проходитиме за рахунок струму $i_0(t)$:

$$U_{AB} = R_{AB} \cdot i_0, \quad (8)$$

що є цілком достатнім для отримання сигналу торкання.

У більшості випадків такий струм i_4 при торканні коливається у межах 100...500 мкА (в залежності від частоти) без джерела $E_1(t)$ і до 5000 мкА з джерелом. При розгляданні вказаної ситуації необхідно зауважити, що відбувається перерозподіл струмів у ланцюзі верстата. Струми i_3 та i_5 , як у попередньому випадку, мають паразитичний характер, відбираючи частину енергії джерел струму і знижуючи, як наслідок, потужність струму i_4 .

З усіх випадків реєстрації торкання це є найгірший з погляду перепаду струму i_4 . Основною причиною такої ситуації є надто малі значення опорів R_3 та R_5 у статичному торканні, тобто опорів, які відповідають відповідно опору шпінделя та пінолі верстата.

1.3 Третя ситуація при торканні інструменту до деталі

Існує обертання деталі, але торкання відсутнє, сигнал присутності у чутнику формується за рахунок струму i_7 та i_2 , тобто:

$$i_7 = (i_0 + i_1) \cdot \frac{R_3^V}{R_3^V + R_6 + R_7} \quad (9)$$

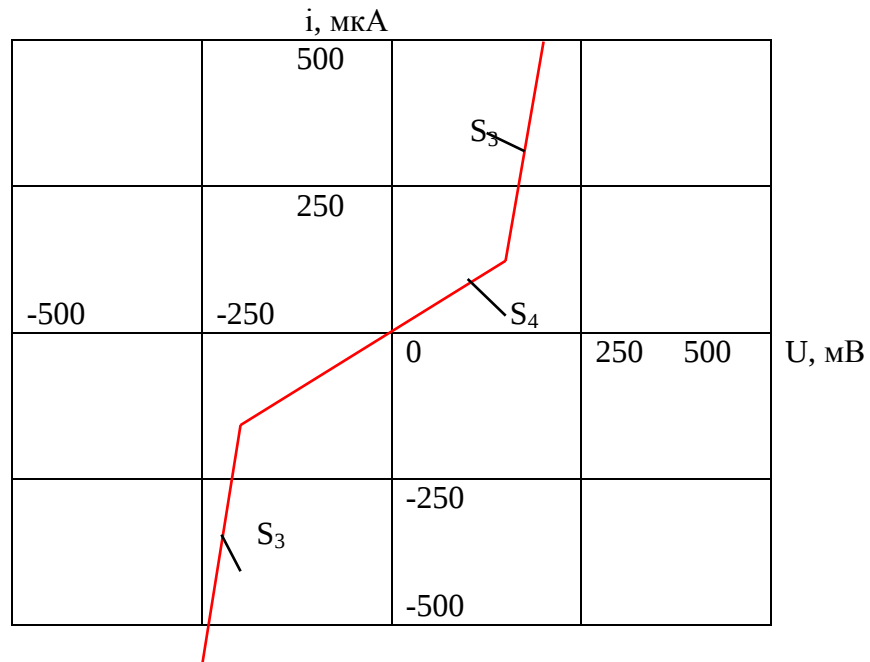


Рисунок 3 - Вольтамперні характеристики зони контакту при глибині занурення інструменту в деталь – 3 мкм (крутизна характеристики $=0,0016$ А/В, $S_1=0,16$ А/В, $S_2=0,0013$ А/В, струм – постійний), контактна пара дюраль Д16–ВК8

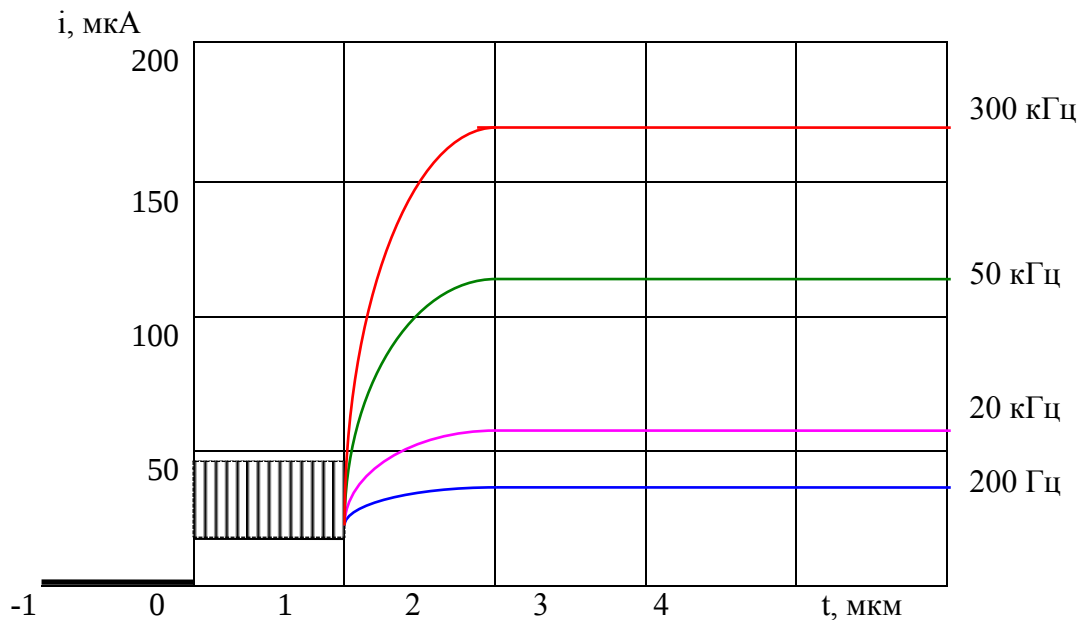


Рисунок 4 - Залежність величини струму через зону контакту від глибини занурення інструменту у деталь та частоти, обраної для роботи генератора струму підтримки фізичного принципу роботи (верстат ТПК-125), контактна пара латунь ЛС59–ВК8

$$i_2 = \frac{E_2(t)}{R_2} \quad (10)$$

Тут вплив струму i_0 досить незначний, і його не варто враховувати у цьому випадку. Опір $R_6 + R_7$, як вже вказувалось, теж досить незначний, але починають діяти динамічні складові опорів R_3 та R_5 , тобто для цього випадку треба враховувати швидкість обертання валу шпінделя та опорного конусу пінолі верстата.

Цей випадок торкання найбільш складний з погляду класичних фізичних процесів, які відбуваються з тілами, що обертаються, але, в першу чергу зі шпинделем. Оскільки не було ніяких засад стосовно цього питання, то первинна теза мала наступний вигляд:

$$\begin{aligned} R_3^V &= R_3(0) + R_{д3} \cdot \frac{V_{\text{пш}}}{V_{\text{пш}} + 1}; \\ R_5^V &= R_5(0) + R_{д5} \cdot \frac{V_{\text{пш}}}{V_{\text{пш}} + 1}; \end{aligned} \quad (11)$$

де $R_3(0)$ та $R_5(0)$ - сталі значення опору шпінделя та пінолі при $n_{\text{дет}}=0$;

$R_{д3}$ та $R_{д5}$ - омічні швидкісні коефіцієнти шпінделя та пінолі;

$V_{\text{пш}}$ та $V_{\text{пш}}$ - лінійна швидкість у підшипниках шпінделя та пінолі верстата;

R_3^V та R_5^V - відповідні опори при $V \neq 0$.

При обертанні деталі $V_{\text{пш}} \gg V_{\text{пш}}$ за рахунок того, що існує досить суттєва різниця у радіусах підшипників шпінделя та пінолі. Збільшення опорів R_3 та R_5 призводить до перерозподілу струмів у ланцюзі верстата. Загальне навантаження на джерело $E_1(t)$ спадає, що призводить до небажаного підвищення напруги U_{AB} . Струм i_7 при цьому значно підвищується і практично дорівнює струму i_1 :

$$i_7 = (i_0 + i_1) \cdot \frac{R_3^V}{R_3^V + R_6 + R_7}, \quad (12)$$

$$\text{де } i_1 = \frac{E_1(t)}{R_1 + R_5^V + \frac{R_3(R_6 + R_7)}{R_3 + R_6 + R_7}} \quad (13)$$

Як наслідок такого перерозподілу струмів є значне зростання реєструємої зони присутності навколо деталі, що є дуже незручним у виробництві і додає складнощів у вихідних колах генератора для стабілізації струму i_7 . Але безпосередньо у ближній зоні деталі сигнал формується за рахунок шорсткісних та внутрішніх дефектів деталі. Тому еквівалентом цієї функції є струм, генеруємий джерелом $E_2(t)$ у вигляді струму i_2 . Потужність еквівалентного струму є функцією, залежною від лінійної швидкості обертання деталі, а джерело $E_2(t)$ треба розглядати як функціональний генератор шорсткості та дефектності деталі.

Більш достеменно дослідження цього випадку доводить, що вирази (11) для R_3^V та R_5^V виправдовуються лише у вузьких межах. У зв'язку з цим були проведені дослідження із застосуванням сучасних приладів, оскільки, як

виявляється, якість приладів, а саме – величина $R_{\text{вх}}$ суттєво впливає на кінцеві результати. Емпіричні дослідження та пошук комплексних аналогій довели, що реально характеристика перехідних опорів з дуже великою вірогідністю наближається до наступних залежностей:

$$R_3^V = R_3(0) \cdot V_{\text{пш}} \cdot V_{\text{пш}} + e^{-\frac{f(R_{\text{зм}})}{n^2}}$$

$$R_5^V = R_5(0) \cdot V_{\text{пш}} \cdot V_{\text{пш}} + e^{-\frac{f(R_{\text{зм}})}{n^2}}$$
(14)

де $f(R_{\text{зм}})$ – комплексна характеристика електричного опору мастила та його гідродинаміки.

На рис. 5 відображено результати дослідів трьох токарних верстатів з зростаючим радіусом підшипників шпінделя, тобто $R_{\text{пш1}} < R_{\text{пш2}} < R_{\text{пш3}}$, тобто з графічного матеріалу зрозуміло, що радіус підшипника суттєво впливає на загальний електричний опір системи обладнання. З погляду фізики процесу найбільш впливовим параметром є функція $f(R_{\text{зм}})$, оскільки в її складових закладено ефект Магнуса [8]:

$$F_M = l \rho V_{\text{л}} (2\pi \omega R^2)$$
(15)

де l – довжина циліндричної поверхні підшипника шпінделя (ролика або радіус кульки);

ρ – щільність мастильної рідини;

V_M – швидкість відносного руху мастила у підшипниках шпінделя, для роликів та кульок лінійна швидкість руху її центра маси;

ω – кутова швидкість циліндричної поверхні, поверхні ролика, поверхні кульки підшипника;

R – радіус циліндричної поверхні, ролика або кульки підшипника.

Величина $2\pi \omega R^2$ визначає циркуляцію швидкості змащувальної рідини. Окрім того, автори вважають, що на величини R_3^V та R_5^V значно впливає приповерхневий шар (δ) змащуючої рідини:

$$\delta = \frac{l}{\sqrt{R_e}},$$

де l – подовженість тіла (ширина треку підшипника), а R_e – число Рейнольдса.

Загальний висновок полягає у тому, що сила підйому (F_M) разом з властивостями приповерхневого шару намагаються підняти вал шпінделя на гідродинамічну подушку. Відбувається це не одразу, а поступово, тому і характер опорів R_3^V та R_5^V має таку залежність, як наведено на рис. 5 та у виразі (14).

Фактично є можливість визначити три особливі фрагменти у поведінці цих опорів, які впливають на перерозподіл струмів у верстаті.

- У фрагменті швидкостей від 0 до V_A спостерігається якісна реєстрація моменту торкання, але реєстрація моменту присутності вимагає значних енергетичних витрат;

• У фрагменті швидкостей від n_A до n_B якість процесу як торкання так і присутності задовільний. Основна перевага цієї ділянки швидкостей є можливість контролю процесу металообробки за рахунок дуже крутої залежності опору від швидкості обертання деталі. Тобто співвідношення для струму i_4 :

$$i_4 = - \left(\frac{\partial R}{\partial n} \cdot \frac{\partial P_y}{\partial t} \right). \quad (17)$$

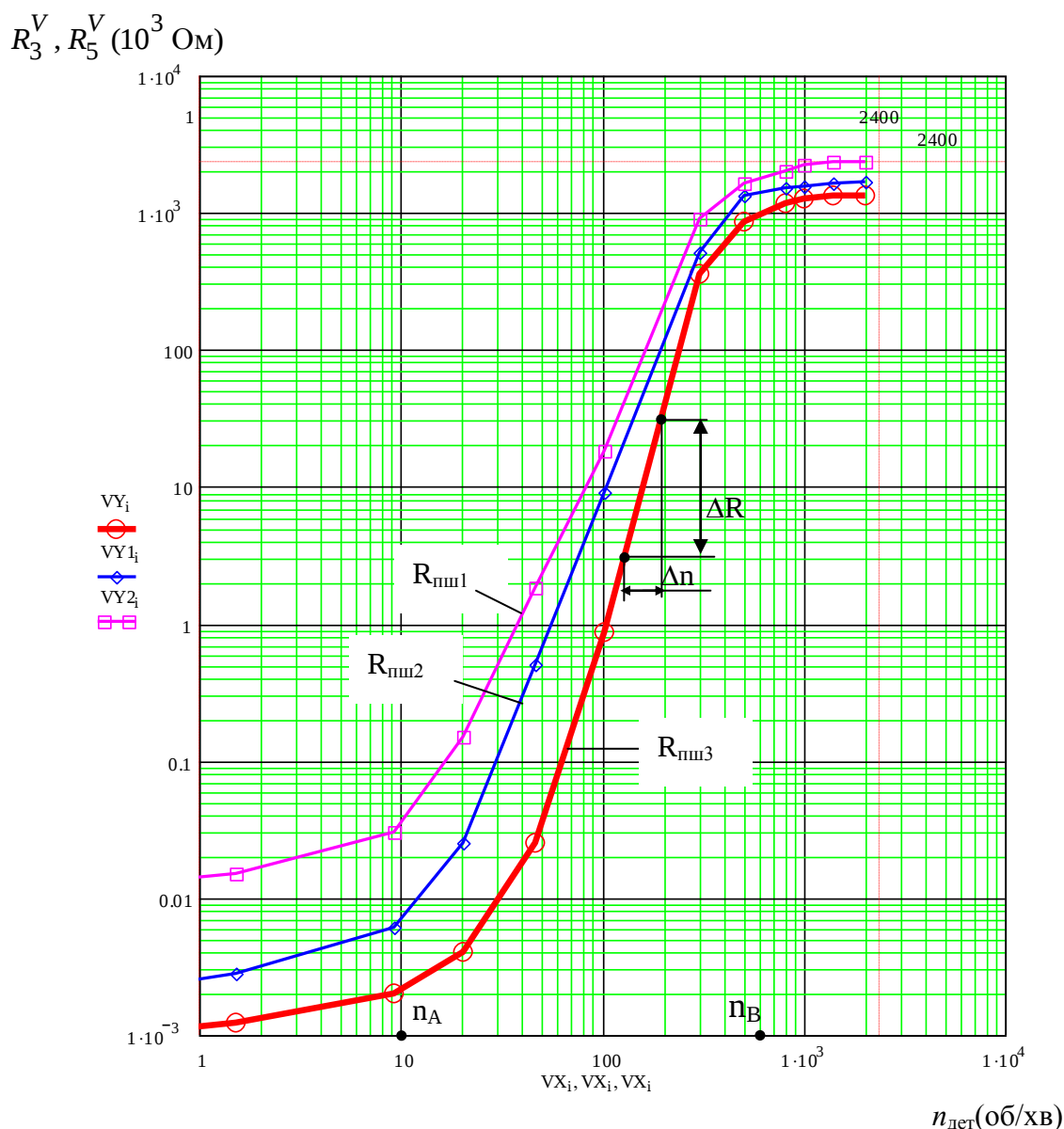


Рисунок 5 – Залежність опору шпінделя R_3^V та R_5^V від швидкості його обертання

Особливо ефективний цей фрагмент при аварійних (критичних) ситуаціях.

- У фрагменті швидкостей від n_A до ∞ шпіндель повністю “зависає” на гідроподушці і стає гальванічно ізольованим від всієї маси верстата, тобто відбувається екранний гідроаеродинамічний ефект. Якщо шпіндель має гальванічний контакт з генератором поля, то у цьому випадку реєстрація присутності та торкання є практично ідеальною та легко керуємою за напрямком та потужністю.

1.4 Четверта ситуація при торканні інструменту до деталі

У цьому випадку інструмент торкається деталі, що обертається. Тоді струм i_4 обчислюється на тих же засадах, що і у (6) з тією різницею, що необхідно зробити підстановку у цьому виразі наступного вигляду:

$$R_3 = R_3^V \quad \text{та} \quad R_5 = R_5^V. \quad (18)$$

2 Обговорення результатів досліджень

Таким чином стосовно моделювання електричних явищ у токарних верстатах необхідно зробити наступні висновки:

- перерозподіл струмів, хоч і впливає на величину сигналу при торканні, але не є вирішальним при реєстрації торкання і слабо діє на кінцевий результат у межах точності обладнання;
- перерозподіл струмів досить сильно впливає на розмір зони присутності навколо деталі, що позитивно відбивається на точності визначення її розмірів і, як наслідок, не вимагає спеціальних конструктивних заходів для усунення цього недоліку.

Фрезерні верстати та ОЦ мають ті ж самі чотири ситуації торкання, що і у токарних верстатах, але значно простішу електричну модель, ніж у попередніх. Єдине невелике ускладнення, яке має система торкання при роботі, - це застосування одного або більшої кількості генераторів струму для забезпечення підтримки фізичного принципу роботи $E_1(t)$ та $E_3(t)$.

Ці джерела повинні бути незалежними, наприклад, джерело $E_1(t)$ обслуговує шпіндельну частину верстата, а джерело $E_3(t)$ обслуговує робочий стіл з деталлю.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

Запропоновані електричні моделі токарних верстатів, що визначають процес торкання інструменту до деталі і призначені для розрахунку процесів торкання технологічних об'єктів на основі їх елементарних фізичних властивостей, надають можливість отримати необхідну точність процесу обробки.

Перспективним напрямком подальших розвідок може бути дослідження процесів фрезерування та створення електричних моделей верстатів з CNC для цих типів механічної обробки металів.

Література

1. Махмудов К.Г. Контроль, диагностика и прогнозирование обработки металлов резанием по переходным процессам. 05.03.01 Диссертация на соискание уч. степени д-ра техн. наук. -К.: КПИ - 1994. – 374 с.
2. Шевченко В.В. Диагностика работоспособности режущего инструмента при чистовом точении на основе электромагнитных явлений. 05.03.01. Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. -К.: КПИ – 1985. – С.64.
3. Васильев С.В. Использование электрических явлений при резании для коррекции режимов обработки. Метод. рекоменд. - М.: ЭНИМС, 1981. – 76 с.
4. Скицюк В.И., Мирзаев А.И., Махмудов К.Г. Контроль процесса резания на основе виброакустического сигнала // Вторая научно-техническая конференция советских и польских молодых ученых выпускников высших учебных заведений СССР, Киев – Вроцлав 1986. – С.34-35.
5. Кузмичев В.Е. Законы и формулы физики/ Отв. ред. В.К.Тартаковский. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
6. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: методы измерений: Учеб. пособие для вузов. -Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1987. – 320 с.
7. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. - М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 560 с.
8. Г.И.Атабеков. Основы теории цепей. – М.: Энергия. – 1966. – 424 с.

Скицюк В.И., Ключко М.М. Физические основы контроля взаимодействия режущего инструмента с деталью на основе измерения переменного тока. В работе раскрыты основы теоретического обоснования контроля точности изготовления прецизионных деталей приборов в условиях автоматизированного производства, которые положены в основу современных контрольно-измерительных систем для повышения эффективности металлообработки.	Skysiouk V.I., Klotchko M.M. The basic physics of the control interaction of the cuuting tool and detail on basis of alternating current measuring. At work state of the basic theoretical justification of the control of the precision details production at the automatic industry, which at the basic modern control and measuring systems for increase productivity metal processing are offered.
--	---

*Надійшла до редакції
23 листопада 2005 року*