

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВОДВИГУНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА

¹Вінницький національний технічний університет

Розроблено метод та засіб автоматизованого контролю механічних параметрів дводвигового електропривода похилого дифузійного апарата. Показано, що в виробничих умовах традиційна система автоматизованого керування, оснащена засобами контролю лише електричних параметрів, не задовольняє вимог щодо надійності роботи дводвигового електропривода з пружними зв'язками в кінематичній схемі.

Розроблено структурні схеми засобів контролю відносного кута повороту валів двигунів дводвигового електропривода та швидкостей їх обертання. Здійснено теоретичну оцінку метрологічних характеристик запропонованих вимірювальних каналів, побудовано їхні статичні характеристики та визначено похибки квантування. Встановлено, що похибка квантування вимірювального каналу відносного кута повороту валів двигунів обернено пропорційна, а вимірювальних каналів швидкостей обертання прямо пропорційна, кількості міток сенсорів обертання валів двигунів. Тому визначено оптимальну кількість міток для засобів контролю механічних параметрів, яка б забезпечувала необхідну достовірність контролю.

Розроблено алгоритми роботи засобів автоматизованого контролю відносного кута повороту валів двигунів та їх швидкостей обертання, подано результати впровадження у виробництво розроблених на основі теоретичних досліджень засобів контролю. Проведено експериментальні дослідження роботи засобів автоматизованого контролю механічних параметрів дводвигового електропривода, які показали повну адекватність вимірювання, як швидкостей обертання двигунів, так і відносного кута повороту їх валів. Реальні метрологічні характеристики цих засобів корелюються з теоретичними розробками.

За допомогою розроблених засобів контролю отримано експериментальні часові діаграми, які ілюструють роботу дводвигового електропривода похилого дифузійного апарата в коливальних передаварійних режимах, пов'язаних з наявністю пружно-дисипативного зв'язку між двигунами привода та нерівномірним розподілом моменту між ними. Експериментально підтверджено попередні теоретичні дослідження динамічних властивостей такої системи електропривода.

Ключові слова: автоматизований контроль, дводвиговий електропривод, похилий дифузійний апарат, статична характеристика, похибка квантування.

Вступ

Похилий дифузійний апарат (ПДА), який використовується в цукровому виробництві [1], [2] для екстракції соку з бурякової стружки і є транспортуючими шнековалами, розміщеними в коритоподібному корпусі, приводиться в рух здебільшого дводвиговим приводом постійного струму (рис. 1). Однаковість електромагнітних моментів двигунів в такій системі забезпечується послідовним увімкненням їхніх роторних обмоток та живленням від одного тиристорного перетворювача. Система автоматичного керування містить від'ємний зворотний зв'язок проти е. р. с. двигуна та струмового контуру, що забезпечують стабільний рівень швидкості обертання шнеків за різної завантаженості дифузійного апарата, а також слугують захистом від перевантажень та коротких замикань в системі привода. Сигнали зворотних зв'язків отримуються сенсорами напруги та струму.

Контроль і оцінка експлуатаційних характеристик привода виконується за допомогою приладів магніто-електричної системи, які вимірюють напругу та струм двигунів, що мають складну несинусоїдну форму, гармонічний склад яких залежить від режиму роботи ПДА. Як показали дослідження,

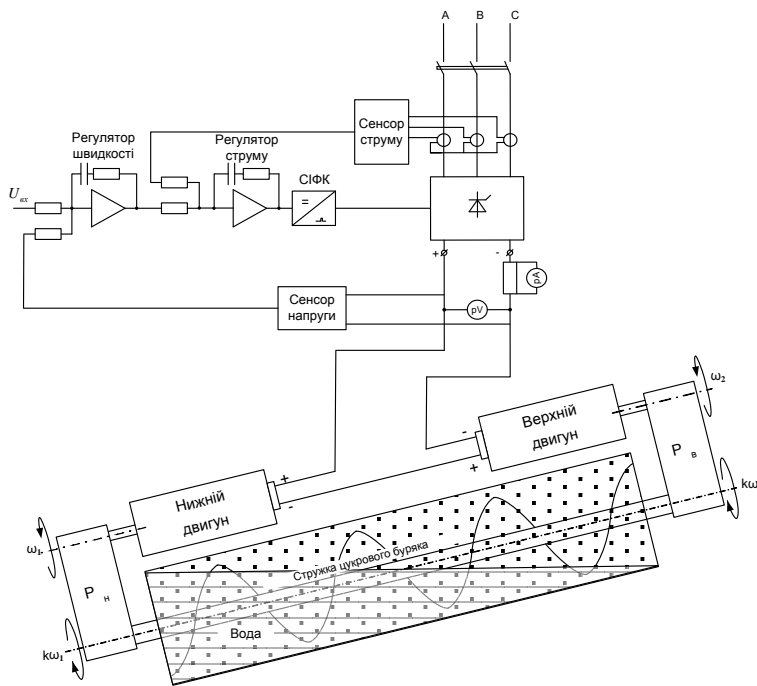


Рис. 1. Структурна схема ПДА

контролю механічних параметрів, що дозволить забезпечити необхідну достовірність контролю за станом привода ПДА.

1. Основні механічні параметри привода похилого дифузійного апарата

Дослідження, проведені у [6] і [7], показали, що значний вплив на динамічні властивості системи привода ПДА має завантаження його шнековалів, їх швидкість обертання та нерівномірність завантаження двигунів. В традиційній системі привода завантаження дифузійного апарата опосередковано контролюється вимірюванням струму двигунів, а також на основі вимірювання загальної напруги можна опосередковано контролювати швидкість обертання шнеків, що є загалом адекватним. Початок виникнення коливальних режимів можна ідентифікувати за зміною різниці між напругами на двигунах привода, що за умови вимірювання електромеханічними засобами, здійсненого оператором, на якого покладено також велику кількість інших технологічних інформативних параметрів є не завжди виправданим. Нерівномірний розподіл навантаження вздовж шнековалів в традиційній системі привода не контролюється зовсім. Вимірювання відносного кута повороту валів двигунів привода, що через коефіцієнт передачі редукторної системи є кутом закручування шнековалів, дасть змогу контролювати накопичену потенційну енергію деформації шнековалів, яка виникає внаслідок нерівномірного завантаження та є передумовою виникнення коливальних режимів.

До пропонованих контрольованих механічних параметрів привода ПДА належать кутові швидкості нижнього ω_1 та верхнього ω_2 двигунів та відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\theta$. Автоматизований контроль цих параметрів дозволить підвищити надійність роботи дводвигунового електропривода за рахунок недопущення аварійних режимів, описаних вище.

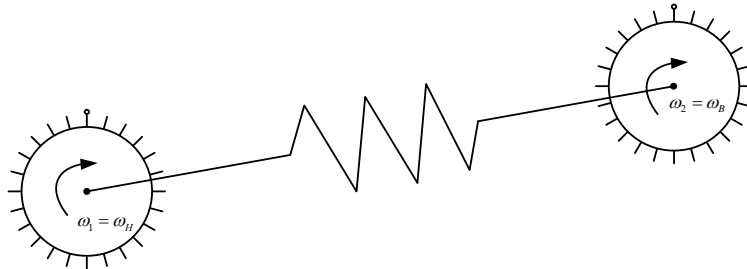


Рис. 2. Сенсори повороту валів двигунів

проведені у [3] і [4], вимірювання таких електричних величин приладами вказаної системи супроводжуються значними похибками.

В таких системах привода неодноразово спостерігались коливальні режими [5], пов'язанні з наявністю значного пружно-дисипативного зв'язку між двигунами привода, що має нелінійний характер. В найгірших випадках система втрачає стійкість. Такі режими по суті є аварійними ситуаціями і можуть призвести до незворотних наслідків. Тому контроль за основними параметрами, які характеризують роботу привода, є надзвичайно важливим. Однак контроль виключно електричних параметрів є недостатнім, оскільки вони не дають змоги точно визначати момент наближення системи до границі стійкої роботи. Тому виникає важлива й актуальна задача розробки засобів автоматизованого

На рис. 2 схематично зображено сенсорну структуру вимірювання механічних параметрів привода ПДА, яка складається з двох сенсорів повороту (обертання) валів двигунів, що мають пружний зв'язок через редуктори та шнековали ПДА та обертаються з кутовими швидкостями ω_1 та ω_2 , відповідно.

Сенсор повороту вала має Z міток,

а кут між двома сусідніми мітками визначається

$$\theta_0 = \frac{360^\circ}{Z}. \quad (1)$$

2. Вимірювальний канал відносного кута повороту валів двигунів

На рис. 3 подана структурна схема вимірювального каналу (ВК) відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА. Пояснюють його принцип роботи часові діаграми (рис. 4).

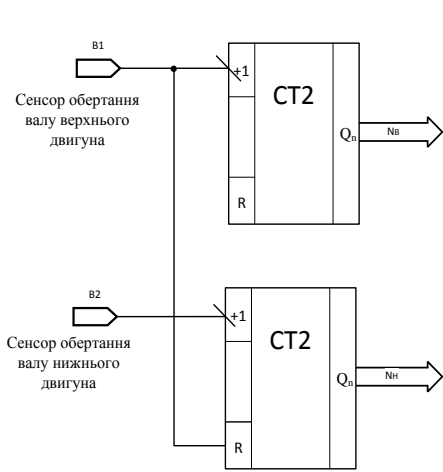


Рис. 3. Структурна схема ВК відносного кута повороту валів двигунів електропривода ПДА

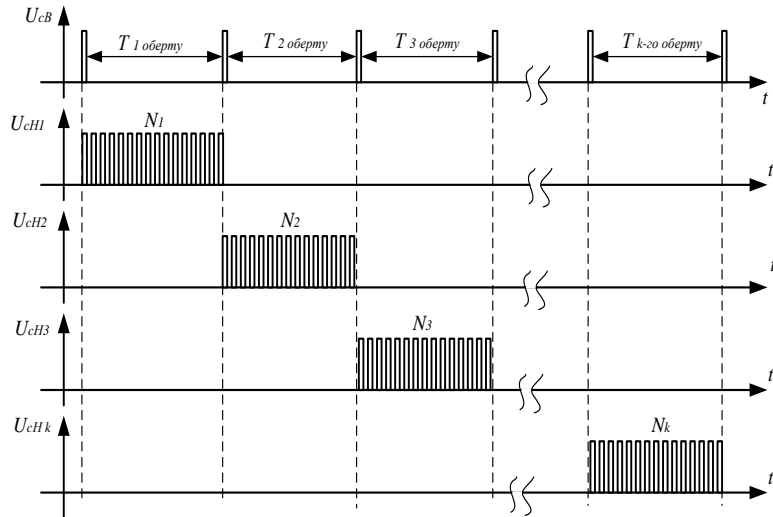


Рис. 4. Часові діаграми роботи ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

Нульова мітка сенсора обертання верхнього двигуна відмічає його оберти. В разі проходження вперше за час роботи ПДА нульової мітки біля чутливого елемента сенсора верхнього двигуна відкривається система збігу і починається підрахунок міток, що проходять повз чутливий елемент сенсора обертання нижнього двигуна, який закінчується в момент наступного її проходження. Тобто за цей час вал верхнього двигуна зробить один повний оберт або $\theta_{B1} = 360^\circ$, а вал нижнього двигуна повернеться на кут

$$\theta_{H1} = N_1 \cdot \theta_0,$$

де N_1 — кількість міток, підрахована двійковим лічильником.

Тоді відносний кут між двома валами двигунів за час першого оберту верхнього двигуна, тобто на момент другого проходження нульової мітки його сенсора, складе

$$\Delta\theta_1 = \theta_{H1} - \theta_{B1} = N_1 \cdot \theta_0 - 360^\circ.$$

Отримане значення кута заноситься до регістру і в цей же момент стартує підрахунок міток сенсора нижнього двигуна за другий оберт верхнього. Вали верхнього і нижнього двигунів за цей час обернуться на кути $\theta_{B2} = 360^\circ$ та $\theta_{H2} = N_2 \cdot \theta_0$, відповідно, а відносний кут між валами зміниться на величину $\Delta\theta_2 = N_2 \cdot \theta_0 - 360^\circ$. У випадку, коли за цей оберт лічильник підраховує Z міток, це означатиме, що відносно положення валів протягом цього часу не змінилось. В будь-якому іншому випадку відносний кут повороту валів двох двигунів на момент проходження втретє нульової мітки сенсора на валу верхнього двигуна визначиться як сума його значень за два оберти:

$$\Delta\theta_{\Sigma(2)} = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 = (N_1 + N_2) \cdot \theta_0 - 2 \cdot 360^\circ.$$

Далі вимірювання проводиться циклічно, і в момент проходження кожної нульової мітки сенсора верхнього двигуна результат, отриманий за попередній період, додається до вже отриманого раніше значення.

Аналогічно можна записати відносний кут, на який закрутяться вали двигунів за k -й оберт верхнього двигуна:

$$\Delta\theta_k = N_k \cdot \theta_0 - 360^\circ. \quad (2)$$

А відносний кут на момент завершення k -го оберту верхнього двигуна визначиться як їх сума значень за окремі його оберти

$$\Delta\theta_{\Sigma K} = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \dots + \Delta\theta_k = (N_1 + N_2 + \dots + N_k) \theta_0 - K \cdot 360^\circ = \theta_0 \sum_{k=1}^K N_k - K \cdot 360^\circ.$$

Або, якщо позначити $N_{\Sigma K} = \sum_{k=1}^K N_k$, отримаємо:

$$\Delta\theta_{\Sigma K} = \theta_0 \cdot N_{\Sigma K} - K \cdot 360^\circ. \quad (3)$$

Визначимо з рівняння (2) кількість підрахованих двійковим лічильником міток сенсора нижнього двигуна за k -й оберт верхнього

$$N_k = \frac{\Delta\theta_k + 360^\circ}{\theta_0} = \frac{\Delta\theta_k}{\theta_0} + \frac{360^\circ}{\theta_0}.$$

Враховуючи (1), після певних перетворень, отримаємо:

$$N_k = \frac{Z}{360^\circ} \Delta\theta_k + Z. \quad (4)$$

Отримане рівняння є рівнянням перетворення розробленого вимірювального каналу за один цикл, яким є повний оберт верхнього двигуна. Його статична характеристика показана на рис. 5а.

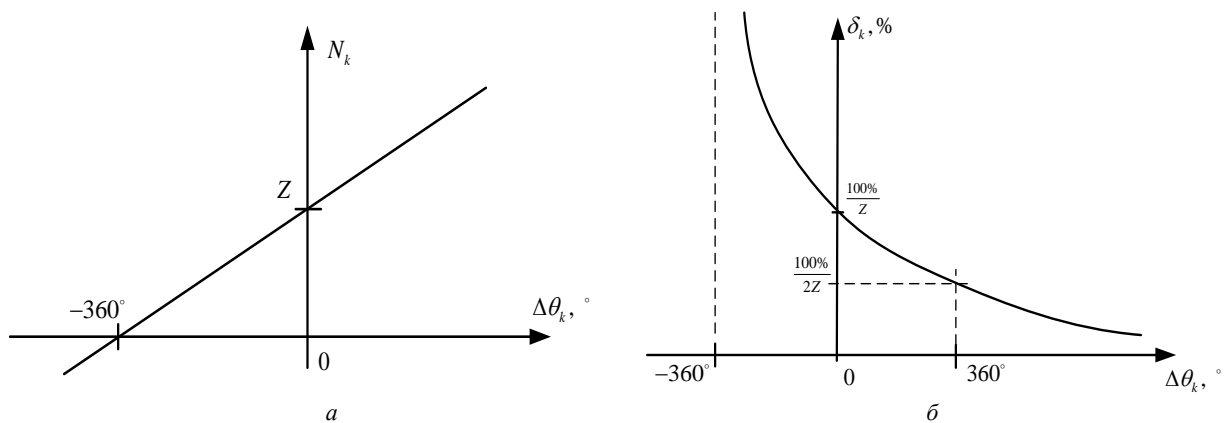


Рис. 5. Теоретичні: а — статична характеристика; б — похибка квантування ВК відносного кута повороту валів двигунів електропривода ПДА

Похибка квантування визначається за виразом

$$\delta_k \% = \frac{1}{N_k} 100 \% = \frac{1}{\frac{Z}{360^\circ} \Delta\theta_k + Z} 100 \%, \quad (5)$$

а її графік показаний на рис. 5б.

З отриманої залежності (5) видно, що похибка квантування зменшується зі збільшенням вимірюваної величини, а також залежить від кількості міток сенсорів повороту валу двигуна. Для зменшення похибки квантування використовують енкодера з великою кількістю міток ($Z \geq 600$).

Принцип дії вимірювального каналу відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА можна описати алгоритмом його роботи, показаним на рис. 6.

Після ініціалізації системи відбувається підрахунок імпульсів, сформованих мітками сенсорів обертання верхнього та нижнього двигунів. На наступному етапі за (2) визначається відносний кут повороту валів двигунів за час одного повного оберту верхнього двигуна, після чого визначене значення додається до отриманого у попередньому циклі. Результат суми запам'ятовується та передається до бази даних за допомогою UART порту до системи контролю та керування приводом ПДА.

Крім цього, поточне значення відносного кута повороту валів двигунів порівнюється з допустимим і в разі його перевищення подається сигнал увімкнення захисту.

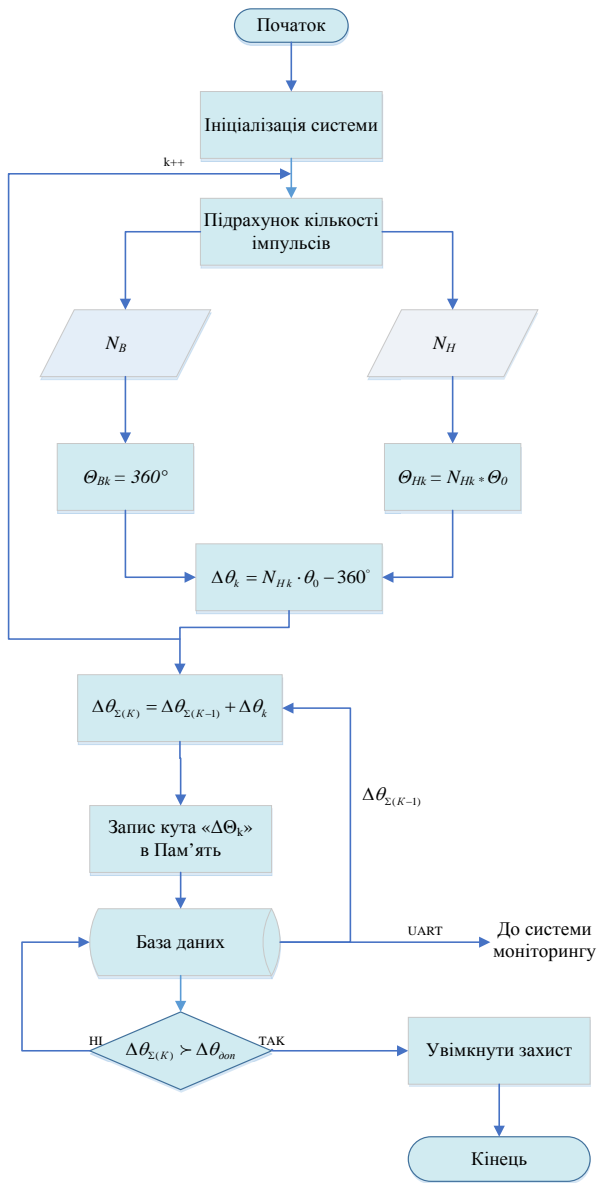


Рис. 6. Алгоритм роботи ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

Варто зазначити, що відносний кут повороту валів двигунів привода ПДА є приведеним до швидкості обертання двигунів кутом радіального закручування шнековалів ПДА і відрізняється передатним числом редукторів, яке дорівнює 1:1250.

3. Вимірювання швидкості обертання валів двигунів

Окрім відносного кута повороту валів двигунів система автоматизованого керування приводом ПДА здійснює вимірювання швидкостей обертання кожного двигуна.

Засоби їх вимірювання використовують ту саму сенсорну структуру, що й ВК відносного кута повороту валів двигунів, та виконані на основі цифрових частотомірів миттєвих значень (рис. 7).

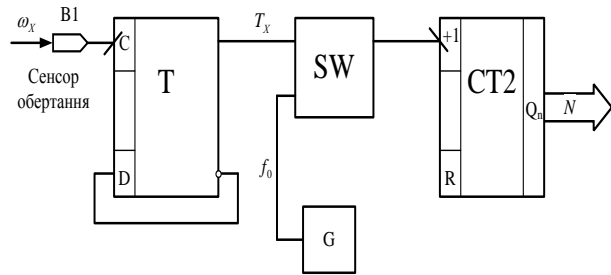


Рис. 7. Структурна схема ВК кутової швидкості

Принцип дії ВК кутової швидкості ґрунтується на квантуванні часового проміжку проходження двох сусідніх міток сенсорів повороту вала T_x сигналами зразкової частоти. Процес ілюструють часові діаграми, показані на рис. 8.

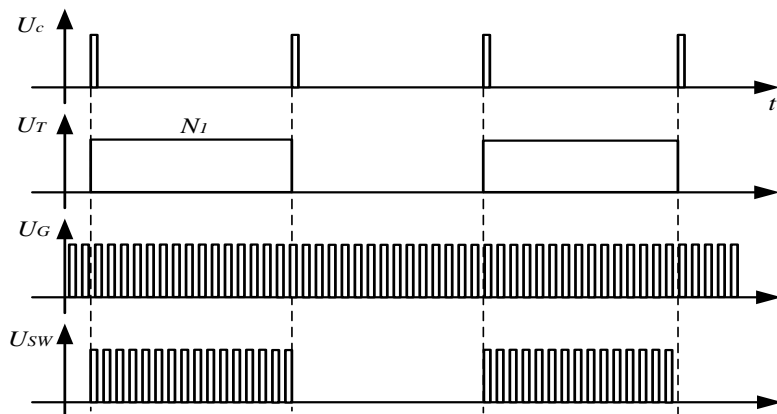


Рис. 8. Миттєві діаграми ВК кутової швидкості

Кутова швидкість обертання вала дорівнює відношенню кута між двома сусідніми мітками $2\pi/Z$ до часу проходження їх біля чутливого елемента сенсора обертання вала T_x

$$\omega_X = \frac{2\pi}{Z \cdot T_X}$$

Час T_X у схемі збігу SW квантується імпульсами зразкової частоти f_0 . Імпульси f_0 з виходу генератора G через відкриту схему збігу SW надходять на вхід двійкового лічильника СТ2. У лічильнику після закінчення кожного періоду T_X формується код

$$N = f_0 \cdot T_X = \frac{2\pi \cdot f_0}{Z \cdot \omega_X} \quad (6)$$

Останнє співвідношення є рівнянням перетворення ВК кутової швидкості, графічне представлення (статична характеристика) якого показано на рис. 9а

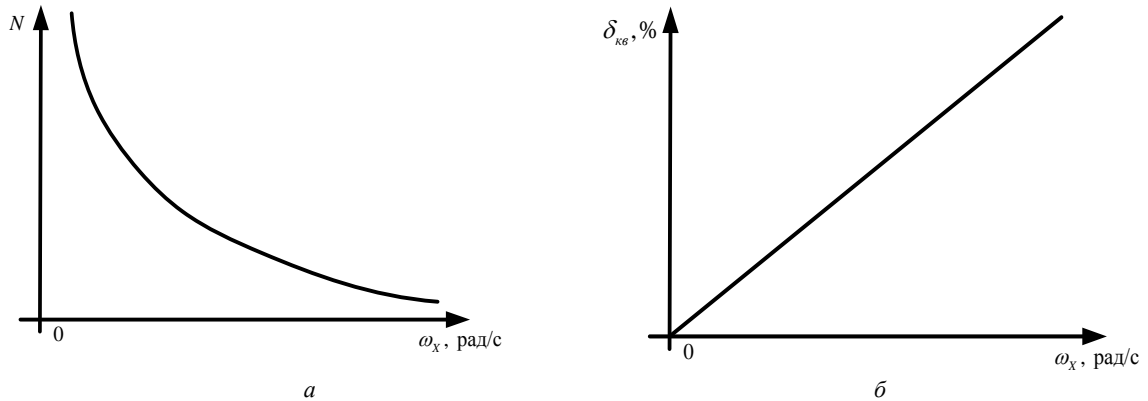


Рис. 9. Теоретичні статична характеристика та похибка квантування вимірювального каналу кутової швидкості

Похибка квантування визначається за виразом

$$\delta_{kv}, \% = \frac{1}{N} 100 \% = \frac{Z \cdot \omega_X}{2\pi \cdot f_0} 100 \% \quad (7)$$

та показана на рис. 9 у вигляді графічної залежності.

Аналіз рівняння похибки квантування показує, що можливим шляхом зменшення δ_{kv} є збільшення частоти квантування f_0 , а також залежить від вимірювальної величини та кількості міток сенсора обертання валу двигуна Z.

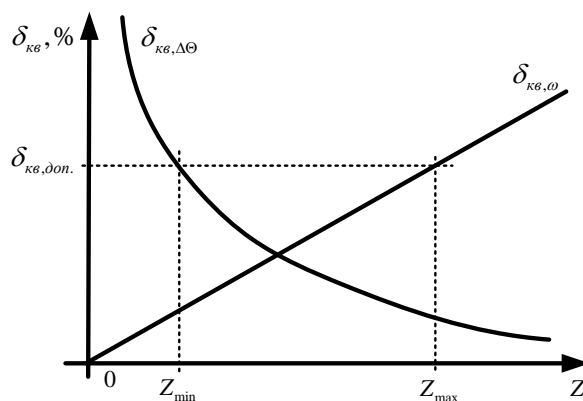


Рис. 10. Залежність похибки квантування від кількості міток сенсорів

Дослідимо залежність похибки квантування вимірювальних каналів механічних параметрів ПДА від кількості міток сенсорів обертання валу двигуна Z. Вони описуються рівняннями (5), (7) і показані на рис. 10.

Аналіз отриманих результатів показує, що кількість міток енкодерів задовольняє умову допустимої похибки квантування для ВК відносного кута повороту та ВК кутової швидкості обертання валів двигунів лише в певних межах $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$. Розширення цього діапазону можливе за рахунок ВК кутової швидкості, використовуючи квантування не одного а двох сусідніх проміжків. В такому разі похибку квантування ВК можна зменшити.

Розроблені ВК відносного кута повороту та ВК кутової швидкості обертання валів двигунів дають змогу визначати механічні параметри, які характеризують роботу системи привода ПДА з необхідною точністю та швидкістю. Це, своєю чергою, дозволить реалізувати систему автоматизованого контролю за відносним кутом повороту валів двигунів та їх кутовими швидкостями, яка б забезпечила надійну роботу електропривода похилого дифузійного апарата.

4. Експериментальні дослідження засобів вимірювання механічних параметрів ПДА

Експериментальні дослідження метрологічних характеристик полягають в отриманні експериментальних статичних характеристик вимірювальних каналів швидкостей обертання та відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА (рис. 11), а також оцінюванні похибок квантування цих каналів й порівняння їх з результатами, отриманими в ході теоретичних досліджень.

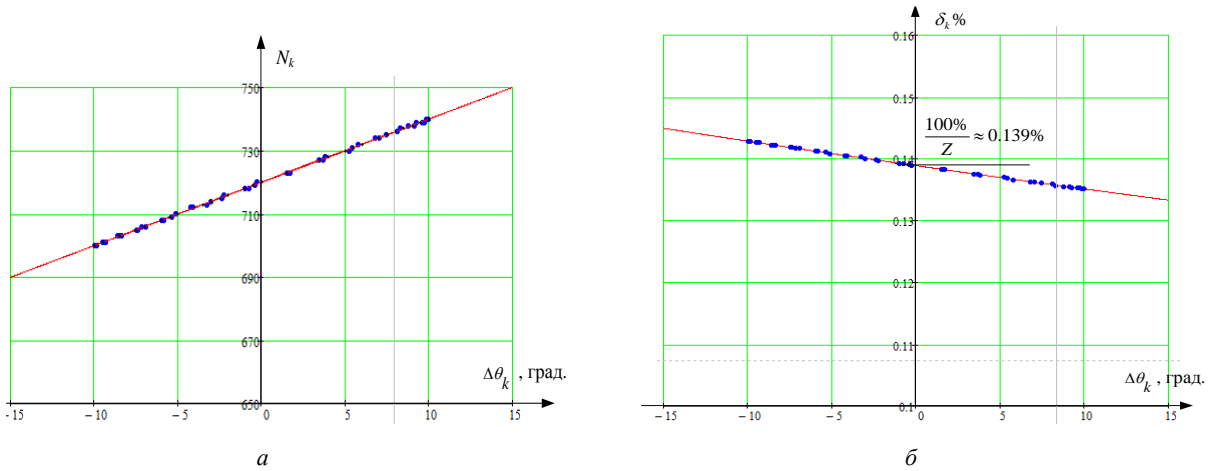


Рис. 11. Експериментальні: *a* — статична характеристика; *б* — похибка квантування вимірювального каналу відносного повороту валів двигунів

В дослідному зразку сенсорами обертання валів двигунів вибрано інкрементний енкодер Wachendorff WDG58E. Цей пристрій оснащений порожнистим валом, що дозволяє зручно з'єднати його механічно з валом двигуна основного привода. В проведених дослідженнях використовувався енкодер з кількістю імпульсів на періоді, що складає $Z = 720$.

Експериментальні дані знімалися на дослідному зразку, зібраному на ПДА марки ДС-8 Іллінецького цукрового заводу відповідно до наведених вище схем. Для побудови експериментальних метрологічних характеристик використана невелика вибірка, знята на проміжку часу $t = [66; 68,838]$ с, що відповідає 50 оборотам верхнього двигуна.

З отриманих даних можна побудувати експериментальну статичну характеристику ВК відносного повороту валів двигунів, показану на рис. 11 у вигляді точок. Суцільною лінією побудована теоретична статична характеристика, яка майже повністю збігається з отриманими дослідними даними. Як видно з наведених рисунків, отримані експериментальним шляхом дані повністю корелюються з описаними вище теоретичними викладами (див. рис. 5).

На підставі отриманих значень $\Delta\theta_k$ за кожний оберт верхнього двигуна, використовуючи (3), визначається поточний відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\theta_{\Sigma K}$. Результати розрахунків показані у вигляді часової діаграми у верхній

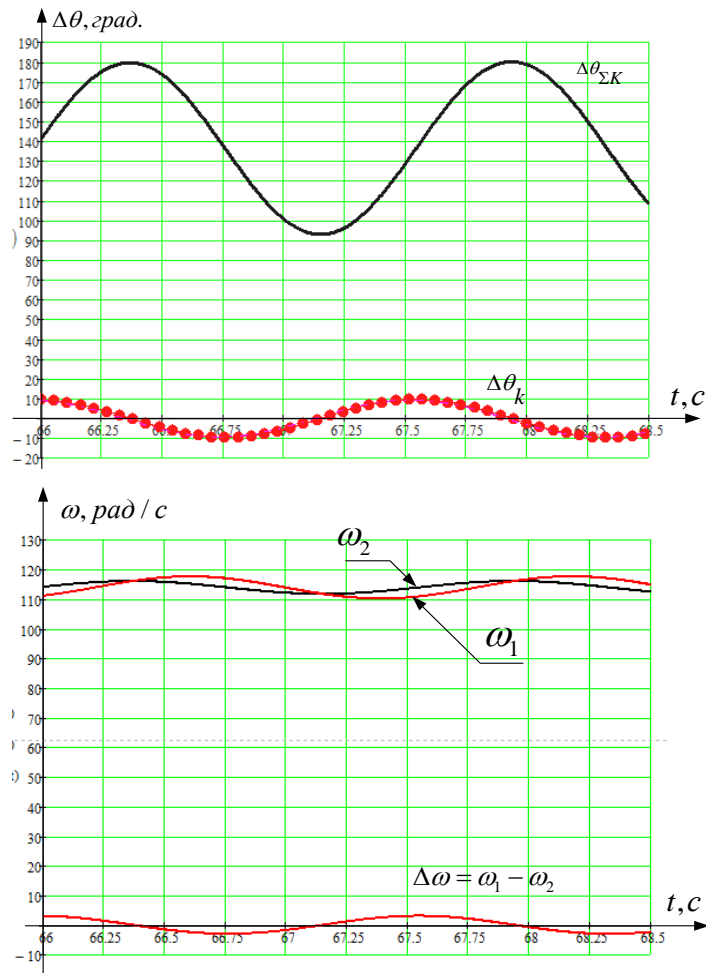


Рис. 12. Експериментальні часові діаграми механічних параметрів привода ПДА

частині рис. 12. Крива $\Delta\theta_{\Sigma K}$ є кривою інтегрування кривої $\Delta\theta_k$, що видно з діаграми. У нижній частині рис. 12 подано отримані часові діаграми швидкостей обертання двигунів ПДА, а також їхню різницю за той самий період часу. Результати дослідів корелюються з результатами, отриманими засобами математичного та імітаційного моделювання, поданими у роботах [6]—[8].

Висновки

Отже, проведені експериментальні дослідження роботи засобів вимірювання механічних параметрів привода ПДА показали повну адекватність вимірювання, як швидкостей обертання двигунів, так і відносного кута повороту їхніх валів. Реальні метрологічні характеристики цих засобів корелюються з теоретичними розробками. Таким чином, розроблені засоби вимірювання механічних параметрів привода ПДА можуть бути використані для побудови нових систем автоматизованого керування технологічним процесом або інтегровані до існуючих у якості додаткових засобів інформативності технологічного процесу. Також вони можуть бути використані для конструювання пристроїв захисту від аномальних режимів, пов'язаних, в першу чергу, з виникненням коливальних режимів у дводвигунових приводах з пружними зв'язками.

Додатковим випадком застосування розроблених засобів вимірювання механічних параметрів привода похилого дифузійного апарата можуть бути системи індивідуального асинхронного частотно-регульованого дводвигунового привода, які останнім часом подекуди починають використовуватись як заміна традиційному приводу постійного струму. В таких системах важливим є завдання синхронізації обертання двигунів, що може бути вирішено виключно через контроль механічних параметрів привода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. М. Гребенюк, *Технологическое оборудование сахарных заводов*. Москва: Пищевая промышленность, 1985.
- [2] В. М. Логвін, ред., *Технологія цукру Т. 1: Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози*. Київ, Україна: Експрес-об'ява, 2015.
- [3] В. І. Родінков, і А. М. Коваль, «Оцінка точності вимірювання струмів та напруг складної форми у трифазному одноконтурному керуваному випрямлячі,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 51-55, 2005.
- [4] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, і А. М. Коваль, «Оцінка точності вимірювання несинусоїдних величин приладом магнітоелектричної системи,» *Наукові праці ВНТУ*, № 2, 2009.
- [5] В. І. Родінков, А. М. Коваль, і В. В. Юр, «Незатухаючі електромагнітні коливання в електроприводах постійного струму,» *Вісник інженерної академії України*, № 1, с. 124-127, 2010.
- [6] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, і А. М. Коваль, «Дослідження динамічних режимів роботи системи привода похилого дифузійного апарата методом імітаційного моделювання,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 7-12, 2013.
- [7] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, і А. М. Коваль, «Динамічні властивості системи привода похилого дифузійного апарата,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 2, с. 86-93, 2013.
- [8] Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, і А. М. Коваль, «Математична і електричні моделі механічної частини шнекових дифузійних апаратів,» *Вісник інженерної академії України*, № 1, с. 155-160, 2010.
- [9] С. І. Моногаров, «Частотно-регульований електропривод диффузионной установки ГТДС-20,» *Технические и технологические системы*, № 1, с. 178-180, 2009.
- [10] В. І. Куроедов, і С. І. Моногаров, «Модернизация автоматизированного электропривода диффузионного аппарата ПДС-20,» *Энергосбережение и водоподготовка*, № 3, с. 60-61, 2010.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.04.2021

Кухарчук Василь Васильович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, e-mail: bkuch@ukr.net ;

Коваль Андрій Миколайович — асистент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, e-mail: kovand1983@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Kukharchuk¹A. M. Koval¹

Mechanical Parameters Automated Control for a Two-motor Electric Drive of an Inclined Diffusion Apparatus

¹Vinnitsia National Technical University

The article is devoted to the mechanical parameters automated control method development. Control object is the two-engine electric drive of an inclined diffusion apparatus. It is shown that in production conditions, the traditional automated control system, equipped with only electrical parameters control system, does not meet the requirements for the reliability of the two-engine electric drive with elastic bonds in the kinematic circuit.

Structural schemes of two-motor electric drive's relative rotation angle and speed control methods are developed. Theoretical evaluation of metrological characteristics of the proposed measuring channels was carried out, its static characteristics were constructed, and quantization errors were determined. It was established that the quantization error of the measuring channel is directly proportional to the mark number of engine shaft rotation sensors. Therefore, the optimal number of marks for means of mechanical parameters control was determined, which would ensure the necessary reliability of control.

The algorithms of two-motor electric drive's relative rotation angle and speed automated control are developed, the production implementation results of developed control means based on theoretical research are presented. Experimental studies of the two-motor electric drive's relative rotation angle and speed automated control work, which showed the complete adequacy of measurement, both the speed of engines rotation and their shafts relative rotation angle, were carried out. The real metrological characteristics of these means correlate with theoretical developments.

With the help of developed control means, experimental time charts were obtained that illustrate the operation of an inclined diffusion apparatus two-engine electric drive, in transient gear modes associated with the presence of an elastic-dissipative connection between the drive engines and the uneven distribution of torque between them. Preliminary theoretical studies of the dynamic properties of such an electric drive system have been experimentally confirmed.

Keywords: automated control, two-engine electric drive, inclined diffusion apparatus, static characteristics, quantization error.

Kukharchuk Vasyl V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements, e-mail: bkuch@ukr.net ;

Koval Andrii M. — Assistant of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements, e-mail: kovand1983@gmail.com

B. V. Кухарчук¹A. M. Коваль¹

Автоматизированный контроль механических параметров двухдвигательного электропривода наклонного диффузионного аппарата

¹Вінницький національний технічний університет

Разработан метод и средство автоматизированного контроля механических параметров двухдвигательного электропривода наклонного диффузионного аппарата. Показано, что в производственных условиях традиционная система автоматизированного управления, оснащенная средствами контроля только электрических параметров, не удовлетворяет требованиям по надежности работы двухдвигательного электропривода с упругими связями в кинематической схеме.

Разработаны структурные схемы средств контроля относительного угла поворота валов двигателей двухдвигательного электропривода и скоростей их вращения. Дана теоретическая оценка метрологических характеристик предлагаемых измерительных каналов, построены их статические характеристики и определены погрешности квантования. Установлено, что погрешность квантования измерительного канала относительного угла поворота валов двигателей обратно пропорциональна, а измерительных каналов скоростей вращения — прямо пропорциональна количеству меток сенсоров вращения валов двигателей. Поэтому определено оптимальное количество меток для средств контроля механических параметров, обеспечивающее необходимую достоверность контроля.

Разработаны алгоритмы средств автоматизированного контроля относительного угла поворота валов двигателей и их скоростей вращения, представлены результаты внедрения в производство разработанных на основе теоретических исследований средств контроля. Проведены экспериментальные исследования работы средств автоматизированного контроля механических параметров двухдвигательного электропривода, которые показали полную адекватность измерения, как скоростей вращения двигателей, так и относительного угла поворота их валов. Реальные метрологические характеристики этих средств коррелируются с теоретическими разработками.

С помощью разработанных средств контроля получены экспериментальные временные диаграммы, иллюстрирующие работу двухдвигательного электропривода наклонного диффузионного аппарата в колебательных предаварийных режимах, связанных с наличием упруго-диссипативной связи между двигателями привода и неравномерным распределением момента между ними. Экспериментально подтверждено предыдущие теоретические исследования динамических свойств такой системы электропривода.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, двухдвигательный электропривод, наклонный диффузионный аппарат, статическая характеристика, погрешность квантования.

Кухарчук Василий Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электрических измерений, e-mail: bkuch@ukr.net ;

Коваль Андрей Николаевич — ассистент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, e-mail: kovand1983@gmail.com