

13. **Монастирський В.Ф.** Прогнозування технічного стану стрічкових конвеєрів за допомогою діагностики / **В.Ф. Монастирський, В.И. Плахотник** // Шахтний і кар'єрний транспорт. М.: Надра. - 1986. - Вип.10. - С.38-42.
14. **Савицкий А.И.** Диагностика электродвигателей и параметров конвейера по сигналу мощности (тока) / **А.И. Савицкий, Л.И. Ефименко** // Новое в технологии и технике переработки минерального сырья» Сб. научных трудов ПАО НИПИ «Механобрчермет» - Кривой Рог: Изд-во Механобрчермет. -2011. - С.208-215.
15. **Воробйов В.А.** Стан і перспективи вдосконалювання температурного захисту електродвигунів. / **В.А. Воробйов, А.Б. Тубис, И.В. Нікітіна** // Електротех. пр-сть. Сірий.07. Електр. апарати й пристрої низької напруги: Оглядінформ. - 1990. - Вип.15. - 36 с.

Рукопис подано до редакції 04.04.17

УДК 681.2.084

С.Т. ТОЛМАЧОВ, д-р техн. наук, І.М. БУРЧАК, магістр
Криворізький національний університет

СИСТЕМА БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРУ МОМЕНТУ НА ВАЛУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета. Метою даної публікації є викладення досвіду розробки та впровадження системи автоматичного безконтактного виміру та бездротової передачі інформації щодо крутного моменту на валу електродвигунів в умовах експлуатації в широкому діапазоні зміни статичного та динамічного навантаження.

Методи дослідження. Проведено порівняльний аналіз існуючих та перспективних систем безпосереднього виміру моменту на обертових валах електричних машин. Основна увага приділена найбільш поширеним на сьогодні тензорезисторним системам вимірювання пружних деформацій валу. Практична робота по конструюванню системи безконтактного виміру моменту пов'язана з підбором параметрів та формуванням тензорезисторного моста, реалізацією дистанційної передачі інформації з тензодатчиків після її оцифрування на зовнішній приймач за допомогою радіомодуля Bluetooth. Для програмування мікроконтролера використана апаратна та програмна платформа Arduino. Мова програмування пристроїв Arduino заснована на C/C++. Для роботи з кодами АЦП використано середовище розробки та платформа для виконання програм LabVIEW, що базується на графічній мові програмування «G» фірми National Instruments. Для фільтрації високочастотних шумів використано фільтр медіальної фільтрації.

Наукова новизна. Доказано, що на основі сучасних досягнень в галузі інтегральної електроніки можна створювати безконтактні та безпроводні системи виміру моменту та інших характеристик двигунів, вартість яких може бути значно меншою, ніж присутніх на сучасному ринку аналогів.

Практична цінність. Використання результатів роботи дає можливість в лабораторних умовах виконувати лабораторно-практичні заняття та наукові дослідження з однієї з важливих проблем електромеханіки – ефективного моніторингу моменту на обертових валах двигунів.

Результати роботи. Розроблено та впроваджено функціонально завершений пристрій для безпосереднього виміру крутного моменту. Практична реалізація системи показала, що тензорезистори як чутливі до пружних деформацій елементи залишаються одними з найбільш дешевих, точних та надійних компонентів в системах автоматичного вимірювання зусиль та моментів.

Ключові слова. Крутний момент, вимірювання, тензорезистори, Bluetooth, Arduino, LabVIEW.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Задача надійного виміру крутного моменту двигунів є однією зі складних і важливих науково-технічних проблем. Розробка доступних для широкої практичної реалізації методів визначення моменту необхідна не тільки для розрахунку керуючих впливів систем регулювання, для наукового обґрунтування при розробці конструкцій нових двигунів, але й для рішення задач діагностики, визначення параметрів та сертифікації двигунів, що пройшли стадію ремонту, забезпечення високого рівня їх енергоефективності у процесі експлуатації. Необхідність вимірювання і керування моментом на валу присутня в приводах стрічкових конвеєрів, транспортерів, дозаторів, підйомних механізмів, робототехнічних комплексів. Відповідно кожний тип задач формує свої вимоги до параметрів вимірювальної частини дослідного стенда, точності вимірювань, способу та діапазону навантажень, тривалості досліджень, форми та способу передачі інформації, відповідного програмного забезпечення.

Проблема є особливо актуальною для найбільш поширених асинхронних двигунів (АД), одним з недоліків яких є суттєве зменшення енергетичних показників (ККД, $\cos \varphi$) при недовантаженні. Не випадково нормативними документами Міністерства палива та енергетики України рекомендовано при коефіцієнті завантаження АД в діапазоні $0 < k_3 < (0,4-0,5)$ встановлення

двигуна меншої потужності, а при $(0,4-0,5) < k_3 < (0,7-0,75)$ доцільність зменшення встановленої потужності слід підтвердити відповідними розрахунками.

Для встановлення відповідності параметрів АД і навантаження найчастіше використовують зв'язок між потужністю на валу АД, частотою його обертання і крутним моментом. Але вимір моменту, особливо на обертових валах в умовах експлуатації, є складним технічним завданням, для вирішення якого розроблено значну кількість прямих та непрямих методів і пристроїв з різними принципами дії, системою обмежень, параметрами точності, універсальності тощо [1-10]. В останні десятиліття успіхи інтегральної стимулювали підвищення інтересу дослідників до цієї проблеми. Ряд закордонних фірм запропонували на зовнішній ринок великий спектр датчиків крутного моменту з високими технічними параметрами та функціональними можливостями [11-17]. Можна стверджувати, що прогрес у даному напрямку за останні 15-20 років перевершує досягнення всіх попередніх років. Але, на жаль, висока вартість цих пристроїв є суттєвою перешкодою на шляху їх широкого впровадження. Тому задача розробки недорогих та доступних для широкого практичного використання пристроїв при збереженні прийнятних параметрів точності, надійності та універсальності залишається актуальною. Саме у такому контексті розглядається основний матеріал даної публікації.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження проблеми вимірювання різних деформацій має достатньо велику історію. Способи вимірювання ККД (моменту, потужності на валу електричної машини) регламентуються ГОСТ 25941-83 [10]. За даним стандартом всі методи виміру класифікуються за двома типами – прямі й непрямі. Однозначної думки щодо доцільності застосування прямих або непрямих методів виміру моменту не існує, оскільки відповідь на це питання залежить від багатьох факторів як в області техніки та технологій, так і в області математичного моделювання. Слід зазначити, що незважаючи на значні успіхи у розробці та впровадженні пристроїв для прямого виміру моменту, велика вартість цих засобів вимірювання є серйозним обмежувальним фактором. Тому ГОСТ 25941-83 дозволяє застосовувати методи безпосереднього визначення ККД тільки для машин, що мають гарантовані значення ККД менше 85%. Для машин з великими значеннями ККД його визначення повинно проводитися непрямыми методами, які можна розділити на дві групи:

методи, що ґрунтуються на проведенні фізичних експериментів з подальшою обробкою їх результатів;

методи, засновані на математичному моделюванні з використанням каталожних даних та ідентифікації параметрів двигуна при деяких спрощуючих припущеннях.

Слід відзначити, що активний розвиток і досягнення техніки та технологій вимірювання фізичних величин дозволяють стверджувати, що деякі норми згаданого стандарту є застарілими і підлягають перегляду. Це стосується в першу чергу безпосередньому виміру крутного моменту на обертових валах електричних та інших машин за допомогою високочутливих датчиків, вихідний сигнал яких пропорційний моменту.

При навантаженні валу двигуна відбувається його скручування на кут, пропорційний крутному моменту. Цей кут можна виміряти за допомогою кутовимірювальної системи, яка реалізує перетворення вимірюваного моменту в електричний сигнал за допомогою оптичних, ємнісних, індуктивних, тензорезистивних, п'єзоелектричних, магнітопружних та інших типів перетворювачів [1]. Один із суттєвих недоліків цих систем полягає в тому, що для вимірювання крутного моменту потрібно відносно великий кут скручування. Це призводить до м'яких торсійних конструкцій, які дозволяють здійснювати тільки повільні вимірювальні процеси. Більш універсальними і точними є тензодатчики, які здатні реагувати на деформації навіть мікрометрового діапазону.

Деякі дослідники вважають початком історичного розвитку технології безпосереднього вимірювання крутного моменту далекий 1678-й рік, коли англійський учений Р. Гук встановив пропорційну залежність між деформацією і напруженням матеріалу (закон Гука). Помітний внесок у вирішення проблеми датований 1833-м роком. Він пов'язаний з мостовою схемою, яку англійський учений Х. Крісті запропонував для вимірювання найменших змін напруги. Після цього більше 100 років проводилися чисельні досліді з різними провідниками з метою пошуку найбільш чутливого до пружних деформацій провідникового матеріалу. І лише у 1938 році професор Руге розробив першу модель тензорезистора з можливістю його вільного наклеювання. Вже через три роки стали активно використовуватися перші індустріально виготовлені дро-

тяні тензорезистори, на основі яких були виготовлені перші статичні тензодатчики з вимірюванням крутного моменту реакції. Але більш важливим застосуванням датчиків крутного моменту завжди було вимірювання на обертовому валу машини.

Справжнім проривом у цьому напрямку стала поява на ринку в 1952 р. плівкових тензорезисторів. У цьому ж році плівкові тензорезистори були використані для вимірювань крутного моменту; при цьому передача вимірюваного сигналу тензорезисторного моста, наклеєного на обертовий вал, проводилася за допомогою контактних кілець. На даному етапі розробки перспективних датчиків крутного моменту виникли серйозні технічні проблеми, пов'язані з необхідністю забезпечення належної ізоляції кілець від валу і один від одного, сили натискання та надійності ковзаючого контакту, ретельної обробки поверхонь. Особливо значні труднощі виникали при високих швидкостях обертання валу.

Для усунення перелічених проблем з передачею сигналу була розроблена технологія безконтактної передачі сигналу з тензорезисторного моста. Перші зразки з реалізацією даної технології були пов'язані з передачею аналогового амплітудно-модульованого сигналу завдяки трансформаторній передачі. Після цього тензометрична техніка безконтактного виміру крутного моменту з обертових датчиків за динамікою свого розвитку стала основною.

Є всі підстави вважати, що тензометрична техніка в найближчому майбутньому залишиться основою датчиків крутного моменту [11,12]. Завдяки постійному зменшенню розмірів і поліпшенню стабільності електронних елементів стане можливим конструювати датчики з невпинним покращенням динаміки вимірювань. З іншого боку, поліпшена якість обробки сигналу інформації забезпечить збільшення точності вимірювального пристрою в цілому.

На сьогодні на ринку датчиків крутного моменту присутній великий спектр пропозицій провідних фірм і компаній у даній галузі – Datum Electronics (Великобританія) [13], Magtrol Inc (США) [14], НВМ (ФРН) [15], ТІЛКОМ (Білорусь). У всіх серіях датчиків застосовується технологія безконтактної передачі вимірюваного сигналу, що дозволяє проводити випробування при частоті обертання до 50000 об/хв. Тензодатчик серії M425 Datum Electronics для стандартного ряду корпусів забезпечує вимірювання моменту в інтервалі від 5 Нм до 10кНм, причому ті ж самі модульні елементи використовуються на замовлення для вимірювань в інтервалі від 1 Нм до 500 кНм. Датчик крутного моменту T40HS від НВМ в системі силової передачі для високошвидкісних випробувань потужності двигуна забезпечує надійні результати вимірювань крутного моменту в діапазоні до 1000 Нм з точністю 0,05%. Спеціально для компанії Marengo НВМ розробила чотири трикомпонентних датчика сили, які використовувалися при експериментальному аналізі напружено-деформованих станів комплектуючих гвинтокрила.

Останнім часом запропоновані акустоелектронні пасивні датчики на основі поверхнево-акустичних хвиль (ПАХ) [16,17]. В основі роботи ПАХ-датчиків лежить властивість поверхневих акустичних хвиль змінювати свою швидкість і частоту в залежності від стану середовища, по поверхні якого вони розповсюджуються. Вони чутливі до механічних напруг і температури середовища, що дозволяє використовувати ПАХ-датчики для вимірювання крутного моменту, тиску і температури за рахунок зміни резонансної частоти. Правда, істотним ускладненням на сьогодні є необхідність герметичного корпусу, який здатний передавати деформації безпосередньо на підкладку з розташованим на ній поверхнево активним резонатором. Тому створення ПАХ-датчиків без залежності від конструкції корпусу, а за рахунок деформації спеціально сконструйованого ємнісного елемента, є одним з перспективних напрямків розробки бездротових датчиків. Датчики на ПАХ виконуються у вигляді мініатюрних плівок або таблеток і застосовуються в різних пристроях – від електронних і промислових систем до біомедичних приладів. На сьогодні найбільшого поширення вони набули в системах моніторингу технічних параметрів автомобілів за двома основними напрямками: вимір крутного моменту в системах рульового керування та трансмісії, а також вимір тиску в шинах. Лідером у розробці ПАХ-датчиків є англійська компанія Transense, до якої останнім часом підключилися такі потужні корпорації як Honeywell, Michelin, Texas Instruments и ряд інших компаній.

ПАХ-датчики мають ряд важливих переваг: відсутність джерел живлення, бездротове з'єднання з опитуваним пристроєм, проста установка, можливість роботи в агресивних середовищах з температурою до 250 °С, слабка чутливість до вібрацій та електромагнітних збурень, малі масогабаритні параметри, захищеність від зовнішніх впливів, великий термін служби і т. і.

За прогнозами [17] обсяг виробництва датчиків тиску Transense / Honeywell може досягти від декількох десятків до декількох сотень мільйонів штук на рік. Але на перспективність ПАХ-датчиків на сьогодні найбільше поширення набули датчики моменту на тензорезисторах.

Постановка завдання. Основним завданням публікації є викладення досвіду розробки та впровадження системи безконтактного вимірювання та бездротової передачі інформації щодо крутного моменту на обертових валах електродвигунів в широкому діапазоні зміни навантаження. Виконання цього завдання базується на наступних технічних умовах:

- використання тензометричного способу виміру крутного моменту;
- забезпечення температурної стабілізації та лінійності характеристик тензорезисторів;
- використання стандартних модулів Arduino як найбільш доступних на сучасному ринку засобів електронного забезпечення розробки;
- цифрова форма сигналу при його передачі з тензомоста;
- дистанційна передача інформації на основі радіомодуля Bluetooth;
- розробка програмного забезпечення для реалізації проекту;
- розробка зручного інтерфейсу на базі системи графічного програмування LabVIEW;
- цифрова фільтрація сигналу для усунення впливу високочастотних шумів;
- виконання комплексу фізичних експериментів в лабораторії електричних машин кафедри електромеханіки на базі асинхронного двигуна з фазним ротором типу MTF-111-6У2;
- підготовка технічної документації щодо розробленої системи виміру крутного моменту.

Викладення матеріалу та результати. Один з найбільш перспективних і поширених методів виміру крутного моменту через деформації валу базується на використанні тензометричного моста [11,12]. Основною проблемою при використанні тензометрів є надійна передача інформації з обертового валу для подальшої обробки. Для реалізації цієї функції довгий час використовувалися індукційні, контактні, світлотехнічні та інші пристрої. Сучасні досягнення інтегральної електроніки дозволяють максимально спростити передачу інформації і в той же час підвищити точність і надійність передачі та обробки даних за допомогою цифрових технологій. Дистанційна безконтактна і бездротова передача інформації з обертового валу електродвигуна стала на сьогодні одним із основних напрямків вирішення проблеми. Один із варіантів пристрою, що використовує тензометричні елементи та цифровий радіоканал, проілюстровано в публікації [6]. Бездротова передача сигналу з тензометричного моста реалізована також практично у всіх промислових системах виміру крутного моменту.

Використання тензодатчиків для вимірювання пружних деформацій валу двигуна дозволяє отримати досить точні показники. В комплексі з досягненнями сучасної електроніки та мікропроцесорної техніки це дозволило провідним фірмам налагодити випуск високотехнологічних пристроїв, які забезпечують точність вимірювання моменту у класі 0,1 і вище. Але ці системи вимірювання мають відносно високу вартість, яка іноді перевищує вартість самої машини. У той же час сучасний стан розвитку електроніки дозволяє конструювати системи виміру, що здатні конкурувати з промисловими аналогами при значному зменшенні їх вартості.

Сучасні засоби передачі інформації з обертового валу машини по Bluetooth дозволяють отримувати інформацію максимально зручно і просто. У лабораторії електричних машин кафедри електромеханіки реалізований пристрій для прямого безконтактного виміру крутного моменту на валу працюючого електродвигуна. Малогабаритний пристрій у вигляді повністю завершеного модуля для закріплення на валу машини (рис. 1) можна встановлювати на різні вали технологічних пристроїв, транспортних засобів та інших агрегатів, де потрібно реєструвати крутні моменти шляхом перетворення вимірюваних аналогових сигналів у цифровий код і передачі на статичний приймач для подальшої обробки.

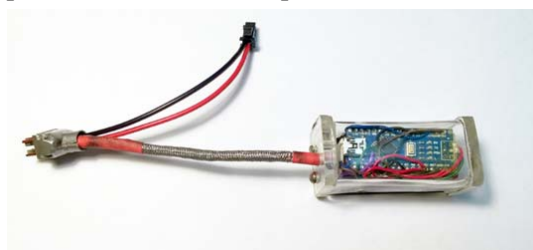


Рис. 1. Загальний вид мікроконтролера на базі модулів Arduino

Для отримання цифрових даних використаний 24-бітний АЦП, зібраний на мікросхемі НХ711. Ця мікросхема містить підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення і сігма-дельта АЦП. Вона була спеціально розроблена для застосування із тензодатчиками. У складі мікросхеми є також регулятор напруги для живлення тензодатчиків і два диференціальні канали для підключення одно-

часно двох датчиків (як альтернативу другий канал можна використовувати для контролю напруги батареї живлення).

Використаний у розробленому пристрої модуль Bluetooth HC-06 представляє собою функціонально завершений пристрій, який можна встановити на одній платі із мікроконтролером. Модуль Bluetooth дозволяє підключати модулі Arduino до телефонів, PDA, планшетів, смартфонів, ноутбуків і будь-яких інших пристроїв, які мають Bluetooth, що працює в режимі master. Він дозволяє передавати дані на контролер через стандартний інтерфейс RS-232. Радіус дії до 10 м, при прямій видимості - до 30 м. Протокол зв'язку Bluetooth Specification v2.0+EDR, хост інтерфейс UART. Під час зв'язку споживається струм 30-40 мА, в режимі очікування – 8 мА.

У якості керуючого процесора використаний мікроконтролер ATmega328 на основі Arduino IDE.

Для тарування (градування) пристрою необхідно штучно створити заздалегідь відомі значення деформації, а на виході фіксувати реакцію системи. Тарування дозволяє визначити чутливість тензометричної системи до вимірюваної величини та виконати перевірки роботи системи у всьому діапазоні її зміни, зокрема перевірити лінійність вимірювальної системи. Таке механічне тарування проводиться експериментальними методами та досить трудомістке. Забезпечення автоматичного тарування пристрою не є достатньо складним завданням і його реалізація передбачена у процесі модернізації приладу.

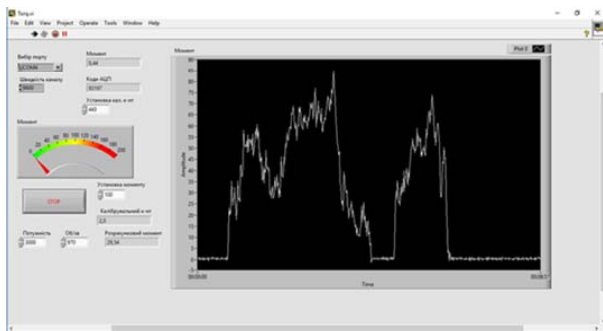


Рис. 2. Загальний вигляд віртуального приладу для відображення сигналу

Для подальшої роботи з кодами АЦП була використана система LabVIEW – середовища розробки та платформи для виконання програм, що базується на графічній мові програмування «G» фірми National Instruments [18].

Гнучке та універсальне програмне забезпечення LabVIEW дозволяє інтегруватись з іншими математичними та текстовими процесорами, такими як MATLAB, Mathcad, Excel та ін. За допомогою готових програмних блок-діаграм розроблено просту програму, яка повторює роботу програми Termit та може фіксувати значення АЦП, отримані по каналу Bluetooth [19].

Для усунення високочастотних випадкових шумів у сигналі інформації використані алгоритми згладжування (smoothing), реалізовані в системі MathCad. Деякі уявлення про роботу системи дають наведені на рис. 3-6 ілюстрації. Як видно з рис. 3, сигнал дуже зашумлений, що не дозволяє чітко його оцінити.

Обробка цього сигналу за допомогою математичного фільтра медіальної фільтрації (medsmooth) (рис. 4) дозволяє чітко виділити корисний сигнал на фоні шумів, які викликані биттям ротора та власними шумами АЦП і які чітко проявляються на малих величинах корисного сигналу.

У ході експериментів використовувався асинхронний двигун з фазним ротором МТФ-111-6У2. Для полегшення пуску в коло ротора вводилися опори, а після пуску було подано постійний струм на обмотку ротора для імітації роботи синхронного двигуна.

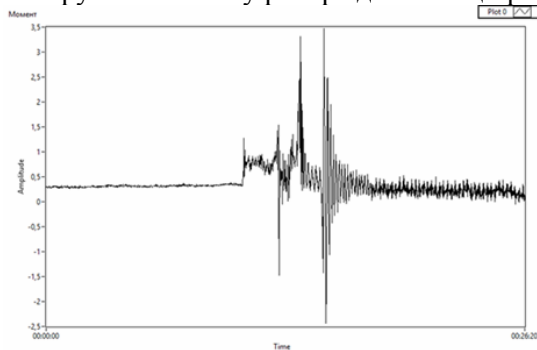


Рис. 3. Візуалізація пуску асинхронного двигуна

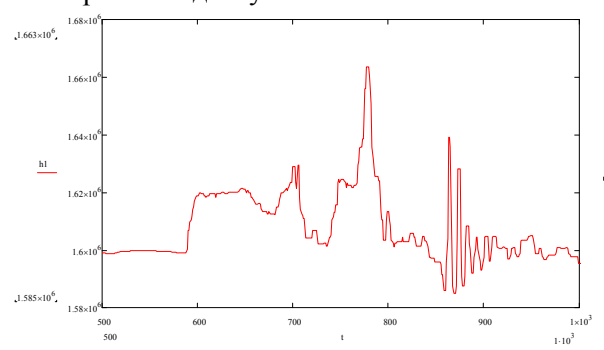


Рис. 4. Опрацьований за допомогою медіальної фільтрації сигнал пуску асинхронного двигуна у середовищі LabVIEW

Так було проведено моделювання роботи синхронного двигуна при усталеному режимі та його перевантаження з подальшим випадом із синхронізму. При перевищенні моментом на валу двигуна критичного рівня машина працює нестабільно, що можна побачити на (рис. 5). На рис. 6 цей же процес відображено при цифровій фільтрації вихідного сигналу датчика.

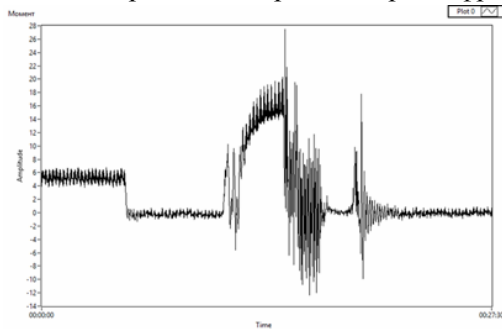


Рис. 5. Візуалізація перевантаження синхронної машини з подальшим випадом із синхронізму

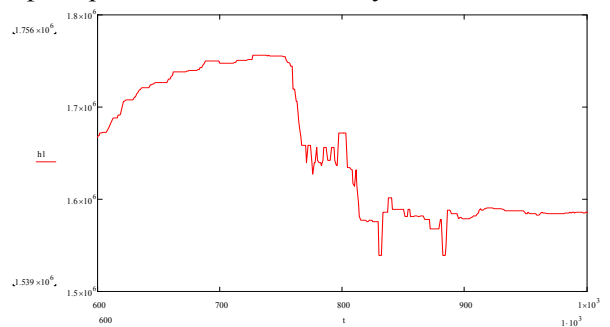


Рис. 6. Візуалізація перевантаження синхронної машини з подальшим випадом із синхронізму після обробки математичним фільтром (medsmooth)

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розроблена система безпосереднього безконтактного вимірювання моменту в умовах працюючого двигуна має великий спектр практичного використання – від виконання лабораторних робіт і проведення наукових досліджень до впровадження на підприємствах різних галузей для контролю ККД, потужності на валу двигуна, відповідності двигуна навантаженню, сертифікації та діагностики тощо.

Сучасні досягнення в галузі електроніки і мікропроцесорної техніки дозволяють створювати системи виміру моменту та інших характеристик двигунів, вартість яких може бути значно меншою, ніж присутніх на сучасному ринку аналогів.

Практична реалізація системи прямого вимірювання моменту показала, що тензорезистори як чутливі до пружних деформацій елементи, залишаються одними із найбільш дешевих, точних та надійних компонентів в системах автоматичного вимірювання зусиль та моментів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення технічних характеристик пристрою, зокрема на спрощення та автоматизацію системи тарування, впровадження технологій віддаленого доступу, забезпечення більш якісної цифрової фільтрації, розробку документації та широку апробацію в різних напрямках практичного використання.

Список літератури

1. Фролов Л. Б. Измерение крутящего момента / Л. Б. Фролов // – М.: Энергия, 1967. – 120 с.
2. Лейтман М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей / М.Б. Лейтман // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 152 с.
3. Умурзакова А. Д. Алгоритм и способ измерения крутящего момента двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова, Ю.Н. Дементьев // XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». – С. 355-356.
4. Москаленко В.В. Измерение динамических моментов в электроприводах переменного тока / В.В. Москаленко, Л.С. Масандилов // – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
5. Потапов Л.А. Измерение вращающихся моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Л.А. Потапов, Ф.М. Юферов // – М.: Энергия, 1976. – 121 с.
6. Батищев Ю.А. Измерение крутящего момента двигателя транспортных машин для построения математической модели загрязнения приземного слоя атмосферы / Ю.А. Батищев, В.В. Калашников // 2010.
7. Дементьев Ю.Н. Устройство для измерения крутящего момента трехфазного асинхронного электродвигателя / Ю.Н. Дементьев, А.Д. Умурзакова // Патент на полезную модель РФ № 131874, 27.08.2013.
8. Умурзакова А.Д. Способ измерения крутящегося момента асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова, В.Ю. Мельников // Инновационный патент РФ № 20031, 14.02.2009. бюл. № 2.
9. <http://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/izmerenie-mehchanicheskogo-momenta-na-valu-elektricheskoy-mashiny.html>
10. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия электрических машин. – ГОСТ 25941-83.
11. В. Криммель. Развитие и будущее технологии измерения крутящего момента. АЛЬФА-СЕНСОР © 2010
12. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда //– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
13. <http://www.datum-electronics.co.uk/products/torque-transducers-and-sensors/m425-rotary-torque-transducer/>
14. http://www.magtrol.ru/catalog/torque_detectors/torque_detectors_tm.html
15. <http://www.hbm.com/en/5626/multi-axis-sensor-mcs10/>

16. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчёт, технология и применение) / Под ред. В. Б. Акпамбетова // – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.
17. Lohr R. Transense Technology Update, May 2007. – www.transense.co.uk/downloads/articles.
18. Пейч Л.И. LabVIEW для новичков и специалистов / Л.И. Пейч, Д.А. Точилин, Б.П. Поллак // – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 268 с.
19. Федосов В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / В. П. Федосов, А. К Нестеренко // под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.17

УДК 622.53:681.518.52

С.Т. ТОЛМАЧОВ, д-р техн. наук, проф., О.В. ІЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАСОСНИХ УСТАНОВОК ГОЛОВНОГО ВОДОВІДЛИВУ ШАХТ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. Метою даної публікації є розробка методу оптимізації робочих режимів головних водовідливних установок гірничорудних шахт за критерієм мінімуму питомої вартості електроенергії.

Методи дослідження. Основна увага приділена можливості вибору таких робочих режимів насосних установок головного водовідливу, які відповідають характеристикам системи «насос – трубопровідна мережа», добовому графіку притоку води з нижніх горизонтів, технічним обмеженням (об'єм водозбірника, максимальна кількість насосних установок, які можуть працювати одночасно, горизонт головного водовідливу). Пошук оптимального варіанта роботи системи головного водовідливу реалізується шляхом погодинної дискретизації зони ефективної роботи насосних установок, формування масиву потенціально можливих робочих режимів та перебору комбінацій різних варіантів з урахуванням часових зон споживання електроенергії. Аналіз режимів роботи системи головного водовідливу розглядається на прикладі шахт «Гвардійська» і «Родіна».

Наукова новизна. Вирішення сформульованої проблеми ґрунтується на спеціально розробленому алгоритмі, реалізованому у вигляді комп'ютерної програми, яка автоматично формує добовий графік роботи головних водовідливних установок з урахуванням поточного об'єму води у водозбірнику, динаміки притоку води та пріоритетної роботи насосів по можливості у години мінімальної вартості електроенергії. Розрахунок добового графіка роботи насосних установок виконано з використанням системи візуального програмування LABVIEW.

Практична цінність. Використання результатів роботи дає можливість в умовах різних шахт сформувати добовий графік роботи системи головного водовідливу, які з урахуванням фактичних технічних параметрів та технологічних обмежень забезпечують мінімальну вартість електроенергії при роботі насосних установок, а також можливість оцінки потенціалу енергозбереження та визначення шляхів його реалізації.

Результати роботи. Основними результатами роботи є: метод оптимізації режимів роботи насосних установок головного водовідливу шахт за критерієм мінімуму питомої вартості електроенергії, алгоритм визначення погодинного графіка роботи насосів, комп'ютерна програма для реалізації даного алгоритму, практичні розрахунки щодо оптимізації роботи системи головного водовідливу.

Ключові слова. Водовідлив, насосні установки, енергоефективність, добовий графік роботи, оптимізація, вартість електроенергії.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Система водовідливу шахт займає важливе місце у технологічному процесі підземного видобутку корисних копалин. У схемі водовідливу глибоких гірничорудних шахт задіяно до 20 насосних установок (НУ) зі встановленою потужністю електрообладнання до 10 МВт. У загальному технологічному процесі видобутку руди водовідлив є одним з найбільш енергоємних процесів (до 25% у загальношахтному обсязі споживання електроенергії, який за рік становить в середньому 25-30 тис. МВт-год). Разом з тим НУ мають один з найбільших потенціалів енергозбереження – до 30-40% [1, 2]. Тому поряд з головною вимогою до них – забезпечення надійного обезводнення гірничих робіт, стоїть завдання виконання цієї функції при мінімальному споживанні і вартості електроенергії.

Проблема підвищення енергоефективності роботи систем водовідливу тісно пов'язана з комплексом практичних задач, зокрема, з експлуатаційною економічністю та надійністю НУ. В останні роки ця комплексна проблема набула виключної актуальності, оскільки за результатами експериментальних досліджень у виробничих умовах середній ресурс найбільш поширених у системах водовідливу НУ типу ЦНС не перевищує 1400-2000 годин, а ККД головного водовідливу складає всього 0,45-0,46 [3].