УДК621.3.087.47

О.В. Вовна (д-р техн. наук, проф.), В.В. Держевецький
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет», м. Покровськ
кафедра електронної техніки
E-mail: oleksandr.vovna@donntu.edu.ua; vitaliyver@ukr.net

РОЗРОБКА СПРОЩЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗВАЖУВАННЯ ВАНТАЖУ ОПОСЕРЕДКОВАНИМ МЕТОДОМ У ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті проведено теоретичні дослідження з розробки комп'ютеризованої системи зважування вантажу. Проаналізовано технічні вимоги та засоби безпеки підйомно-транспортних механізмів. Проведено аналіз способів і засобів вимірювання ваги вантажу опосередкованим методом у виробничих умовах промислових підприємств з точки зору підвищення показників надійності підйомно-транспортних механізмів. Доведено, що в багатьох випадках застосування зважування є недоцільним використання тензометричних датчиків з економічної точки зору. На підставі проведеного аналізу наявних методів та засобів вимірювання ваги було обрано в якості оптимального опосередкований метод, який дозволяє визначення масу вантажу за споживною потужністю асинхронного двигуна. Проаналізовано кінематику механізму підйому. Розроблено спрощену модель у MatlabSimcape. Визначено пріоритетні напрямки подальших досліджень комп'ютеризованої системи зважування вантажів для умов промислових підприємств, які полягають в розробці повноцінної моделі, обґрунтуванні отриманих показників зважування з урахуванням дестабілізуючих показників, таких як наприклад температура навколишнього середовища та температура мастила в механізмі.

Ключові слова: тензометричні датчики, зважування, обмежувач вантажопідйомності, підйомно-транспортний механізм, прямий метод, опосередкований метод, інформаційно-вимірювальна система.

DOI: 10.31474/2075-4272-2019-1-32-95-102

Загальна постановка проблеми. Стратегічним напрямом розвитку промисловості України є оцінка стану промислового комплексу країни, виявлення основних тенденцій і проблем розвитку промисловості, визначення на цій основі найбільш раціональних ключових напрямків для координації оперативних планів підприємств у переході на інноваційно-інвестиційну модель розвитку, створення умов для підвищення конкурентоспроможності продукції [1]. Промислове підприємство, яке ставить собі за мету не просто вижити в конкурентній боротьбі, а помітно випередити суперників по ринку, прагне постійно підвищувати якість продукції та ефективність виробництва. Для успішного вирішення цих важливих завдань необхідно вдосконалювати систему управління якістю та впроваджувати найсучасніші засоби автоматизації [2]. Якщо робити ставку на високий рівень технічної оснащеності виробництва, підприємство отримує можливість успішно функціонувати та розвиватися навіть при погіршенні ринкових умов (подорожчання сировини та енергоносіїв, загостренні конкуренції, посиленні галузевих нормативних вимог тощо). Очевидно, що управління виробництвом неможливо без використання узгодженої системи вимірювань для кількісної оцінки технологічних процесів. Тому особливе місце серед засобів промислової автоматизації займають датчики та первинні перетворювачі -

«органи чуття» АСУ ТП. Не менш важливою складовою сучасної системи автоматизації стають засоби інтеграції цих пристроїв і методів, які дозволяють використовувати їх з найбільшою ефективністю. Результати попередніх досліджень у галузі машинобудування доводять, що використання тензометричних датчиків для зважування вантажів, які вбудовуються у металеву конструкцію вантажопідіймальних кранів негативним чином впливає на живучість механізмів. Тензометричні датчики схильні до механічних, атмосферних, динамічних і ударних впливів (часто є причиною виходу їх з ладу), а також використання тензометричних датчиків недоцільно з економічної точки зору.

Досягнення сформульованої мети передбачає виконання таких завдань:

- аналіз і стан вимірювальних систем зважування маси вантажу підйомно-транспортними механізмами;
- аналіз методів зважування маси вантажу підйомно-транспортними механізмами в промисловості;
- аналіз засобів зважування маси вантажу підйомно-транспортними механізмами в промисловості;
- обґрунтування вибору методу зважування вантажу задля дослідження метрологічних характеристик вимірювальної системи;
- аналіз характеристик наявних методів, методик та засобів щодо побудови комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи зважування вантажів;
- розробка рекомендацій щодо пріоритетних напрямків подальших досліджень процесу комплексного вимірювання фізичних параметрів маси вантажу підйомно-транспортними механізмами.

Результати досліджень. На підставі проведеного аналізу і стану вимірювальних систем зважування маси вантажу підйомно-транспортними механізмами виявлено, що найбільш поширений тип датчиків сили (ваги), що застосовуються сьогодні в промисловості - тензометричні датчики, які володіють високою точністю і швидкодією. В основі тензометрії лежить властивість тонкоплівкових резисторів змінювати свій опір навіть при мінімальній деформації. Резистори, з'єднані за схемою моста і змонтовані в металевому корпусі датчика, перетворюють пропорційний масі механічний вплив у відповідну зміну напруги, що подається (див. рис. 1).

Рисунок 1 – Принцип роботи тензометричного датчику

Таким чином, первинний електричний сигнал з чотирьох провідного датчику має розмірність мВ/В. Такий вид аналогового сигналу вимагає додаткового перетворення в

стандартну форму, придатну для передачі в систему збору даних.

До класичної промислової ваговимірювальної системи (рис. 2) належать один або тричотири тензодатчики, змонтованих на спеціальних опорах, комутаційна коробка для підсумовування сигналів і вимірювальний перетворювач. Перетворювач може бути як аналоговим, на виході якого формується сигнал типу 4...20 мА або 1...10 В, так і цифровим, з вихідним інтерфейсом RS-485 і передачею по протоколу промислової польової шини Modbus. Сформований стандартний аналоговий або цифровий сигнал надходить на вхід модуля збору даних і передається на програмований логічний контролер (ПЛК).

Рисунок 2 – Типова структурна схема промислової ваговимірювальної системи

Відповідно до алгоритму роботи АСУ ТП, на підставі отриманих даних про вагу, ПЛК може автоматично подавати сигнали виконавчим пристроям. Крім того, зібрані дані про вагу передаються на рівень операторського контролю, де можуть служити основним або допоміжним параметром для прийняття оператором того чи іншого рішення з управління технологічним процесом.

Для отримання перевірених результатів зважування потрібна безперервна високошвидкісна обробка і фільтрація, яка надходить з датчиків сигналу, що, з одного боку, ускладнює впровадження ваговимірювальної системи внаслідок трудомісткого програмування ПЛК, а з іншого боку, в процесі експлуатації системи може створювати значне навантаження на контролер, сповільнюючи або порушуючи його роботу з управління сегментом АСУТП в цілому [3].

За способом отримання інформації про дані розрізняють прямі і опосередковані методи. Більшість пристроїв кранових ваг засновані на використанні силосимірювальних датчиків, вагових модулів, платформ, тобто на прямих методах вимірювання. Недоліки, які притаманні прямим методам вимірювання ваги: зниження чутливості при різких змінах температури; схильність датчиків до механічних, атмосферних, динамічних і ударних впливів (часто є причиною виходу їх з ладу); вартість тензометричних датчиків. Методи опосередкованого вимірювання маси вантажу позбавлені таких недоліків.

Способи вимірювання маси вантажу, піднятого краном, засновані на вимірі сили, що діє на елементи конструкції крана [4]. Залежно від точки прикладання сили можна виділити кілька найпоширеніших схем зважування: зважування на гаку, на траверсі, зважування вантажної візки, вимірювання натягу канату, зважування на блоці (рис. 3).

Засобом зважування притаманні такі недоліки: складність виконання ваг високої механічної міцності, що обмежує їх застосування в підйомних кранах великої вантажопідйомності; вплив температури вантажу, що зважується безпосередньо на ваговий механізм і електронну частину ваг; можливі механічні пошкодження при проведенні операції

зважування; необхідність спеціальних пристроїв змотувати кабелі лінії зв'язку ваговимірювального механізму; на точність ваговимірювання впливає кратність поліспасти (чим більше кратність поліспасти, тим більше вплив різних сил на точність ваговимірювання).

Рисунок 3 – Засоби зважування

У результаті проведених досліджень було виявлено, що в опосередкованих методах, вага вантажу визначається на підставі енергетичних показників електроприводу механізму підйому. Принцип вимірювання ваги вантажу, як сили, що діє на канатну систему від маси вантажу, полягає у визначенні його наперед знятої залежності одного або декількох інформаційних параметрів від ваги вантажу, що піднімається [5]. Також виявлено, що найбільш інформативними параметрами асинхронного двигуна (АД) для вимірювання ваги вантажу є (рис. 4): частота обертання валу АД; струм статора; споживана потужність; розрахункове значення моменту двигуна. Доведено, що найкращим інформативним параметром АД є споживана потужність двигуна P . Залежність споживаної потужності від маси вантажу, що піднімається $P = f(G)$ є лінійною [2].

Рисунок 4 – Опосередковані методи вимірювання

Імітаційне моделювання в порівнянні з аналітичним надає можливість вирішення більш складних завдань. Simscape надає оточення для моделювання і симуляції фізичних систем, що містять компоненти з різних інженерних сфер діяльності: механічних, електричних, гідравлічних та інших. За допомогою фундаментальних блоків можна створити моделі фізичних компонентів - таких, як: електродвигун, гідравлічні клапани, храпові механізми, тощо. Оскільки компоненти Simscape використовують фізичні з'єднання, моделі відповідають структурі системи, яка розробляється. Імітаційне моделювання є найбільш ефективний метод дослідження систем, а часто і практично єдиний доступний метод отримання інформації про поведінку системи, особливо на етапі її проектування [6, 7].

Вирішення задачі визначення ваги вантажопідйомним обладнання включає, серед іншого, вирішення динаміки руху механічної системи з урахуванням взаємозв'язку між

приводом системи і вибраними кінематичними змінними. На рис.5 представлена спрощена модель вантажопідійомного механізму, в програмному середовищі MATLAB SIMSCAPE.

Рисунок 5 - Спрощена модель механізму підйому в середовищі MATLAB SIMSCAPE

Для складання рівняння динамічного руху механізму підйому використано метод редукції вагових і силових змінних. Щоб забезпечити динамічну рівновагу вихідної і наведеної системи, повинні бути виконані умови [8]:

$$\begin{aligned} E_k &= E_{kred} \\ A &= A_{red} \\ P &= P_{red} \end{aligned} \quad (1)$$

де: E_k , E_{kred} - кінетичні енергії в початковій і наведеної системах; A , A_{red} - множення активних сил в початковій і наведеній системі; P , P_{red} - сили діючих сил і моментів у початковій і наведеній системі. Рух оригінальної системи зводиться до руху мотора. Загальна кінетична енергія механічної системи - це сума кінетичних енергій окремих її членів, в залежності від руху, яке вони виконують. Кінетична енергія механічної системи визначається:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} I_{MOT} \cdot \omega_{MOT}^2 + \frac{1}{2} I_{H1} \cdot \omega_{MOT}^2 + \frac{1}{2} I_{SP} \cdot \omega_{MOT}^2 + \\ E_k &= \frac{1}{2} I_{MOT} \cdot \omega_{MOT}^2 + \frac{1}{2} I_{H1} \cdot \omega_{MOT}^2 + \frac{1}{2} I_{SP} \cdot \omega_{MOT}^2 + \\ E_k &= \frac{1}{2} I_{MOT} \cdot \omega_{MOT}^2 + \frac{1}{2} I_{H1} \cdot \omega_{MOT}^2 + \frac{1}{2} I_{SP} \cdot \omega_{MOT}^2 + \\ &+ \frac{1}{2} I_{H5} \cdot \omega_1^2 + \frac{1}{2} I_{OK3} \cdot \omega_1^2 + \frac{1}{2} I_{OK4} \cdot \omega_2^2 + \\ &+ \frac{1}{2} I_{H6} \cdot \omega_2^2 + \frac{1}{2} I_{H7} \cdot \omega_2^2 + \frac{1}{2} I_{BUB} \cdot \omega_2^2 + \\ &+ \frac{1}{2} I_{KL} \cdot \omega_2^2 + \frac{1}{2} m_{PRZ} \cdot v_{PRZ}^2 + \frac{1}{2} m_{KAB} \cdot v_{KAB}^2 + \\ &+ \frac{1}{2} I_{KL} \cdot \omega_2^2 + \frac{1}{2} m_{PRZ} \cdot v_{PRZ}^2 + \frac{1}{2} m_{KAB} \cdot v_{KAB}^2 + \end{aligned} \quad (2)$$

Якщо кінетична енергія виражається у функції кутової швидкості двигуна ($\omega_{\text{МОТ}}$), після кількісного визначення мас окремих елементів системи та їх моментів інерції (елементів, які виконують обертальний рух), то кінетична енергія вихідної системи є:

$$E_k = 0,711488 \omega_{\text{МОТ}}^2 \quad (3)$$

Декілька з пріоритетних напрямків подальших досліджень є розробка та дослідження математичної моделі вимірювання ваги вантажу опосередкованим методом з урахуванням впливу основних дестабілізуючих факторів, які впливають на метрологічні характеристики вимірювальної системи; обґрунтування розробки способів і засобів компенсації дестабілізуючих факторів, які домінують, на результати комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи зважування вантажів опосередкованим методом у виробничих умовах промислових підприємств; обґрунтування структури та алгоритму роботи комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи зважування вантажів опосередкованим методом у виробничих умовах промислових підприємств.

Висновки.

У статті проаналізовано та досліджено стан вимірювальних систем зважування маси вантажу підйомно-транспортними механізмами; методи зважування маси вантажу; засоби зважування маси вантажу в промисловості. Виявлені недоліки, які притаманні прямим методам вимірювання ваги, а саме зниження чутливості при різких змінах температури; схильність датчиків до механічних, атмосферних, динамічних і ударних; вартість тензометричних датчиків. Встановлено, що найкращим інформативним при використанні опосередкованого методу є споживана потужність асинхронного двигуна Р. Розроблено спрощену модель механізму підйому в середовищі *matlabsimscape*. Визначено основні пріоритетні напрямки подальших досліджень процесу комплексного вимірювання фізичних параметрів маси вантажу підйомно-транспортними механізмами опосередкованим методом.

Перелік використаної літератури

1. Держевецький, В.В. Дослідження методів вимірювання ваги в промисловості підйомно-транспортними механізмами / В.В. Держевецький. - Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2019.
2. Держевецький, В.В. Разработка компьютеризированной системы измерения массы груза косвенным методом с использованием среды Matlab / В.В. Держевецький. – Сборник научных трудов. По материалам конференции «Время вызовов и возможностей: проблемы, решения, перспективы» Рига, Латвия. БМА, 2019. – С. 459-462.
3. Бабушкина, Л. Управление производственными процессами на основе весоизмерений / Л. Бабушкина. - Контрольно-измерительные системы, 2017. – С. 76-80.
4. Орлов, Ю.А. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъёма / Ю.А. Орлов, Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов, Д.П. Столяров. - Известия Томского политехнического университета, 2008. – Т. 312, № 4. – С. 119–124
5. De la Rosa, J.J. Modeling and Simulation of a Container Gantry Crane Cabin's Operation with Simulink / J. J. G. De la Rosa, J.A. Carmona Torres, A. Illana, Carlos G. Puntonet, J.M G'orriz. –TheInternationalConferenceon “Computeras a Tool” Warsaw, September 9-12. pp.2015-2018.
6. MatlabSimscape - URL: <https://matlab.ru/products/simscape>
7. Filas, J., Possibility of Using Simulink in the Dynamics of Lifting Equipment / J. Filas, P. Čarnoký. - American Journal of Mechanical Engineering, 2013, Vol. 1, No. 7. P. 394-397
8. Olaya, J. Analysis of 3 RPS Robotic Platform Motion in SimScape and MATLAB GUI Environment / J.Olaya, N. Pintor, O. Aviles, J. Chaparro. - International Journal of Applied

References

1. Derzhevetskii, V.V. (2019), *Doslidzhennia metodiv vymiriuvannia vahy v promyslovosti pidiomno - transportnyy mekhanizmy*[The previous method of vimiruvannya vagi in the industry by transport and transport mechanisms], Advanced information technology, add automation and electric drive.
2. Derzhevetskii, V.V. (2019) *Razrabotka komp'yuterizirovannoj sistemy` izmereniya massy` gruzha kosvenny`m metodom s ispol'zovaniem sredy` Matlab* [Development of a computerized system for measuring the mass of cargo by indirect method using the Matlab environment], "Time of Challenges and Opportunities: Problems, Solutions, Prospects" Riga, Latvia. BMA. - P. 459-462.
3. Babushkina, L. (2017) *Upravlenie proizvodstvenny`mi proccessami na osnove vesoizmerenij* [Management of production processes based on weight measurements] Control and measuring systems, pp.76-80.
4. Orlov, Yu.A., Dementiev, Yu.N., Odnokopylov, G.I., Orlov, D.Yu., Odnokopylov, I.G, Stolyarov, D.P. (2008) *Sistema zashhity` mostovogo krana na osnove monitoring parametrov e`lektroprivoda mekhanizma pod`yoma* [The protection system of an overhead crane based on monitoring the parameters of the electric drive of the lifting mechanism], Proceedings of Tomsk Polytechnic University, T. 312, No. 4, pp. 119–124.
5. DelaRosa, J.J., CarmonaTorres, J.A., Illana, A., Puntonet, Carlos G., G´orritz, J.M., "Modeling and Simulation of a Container Gantry Crane Cabin's Operation with Simulink", *The International Conference on "Computers as a Tool"*, Warsaw, pp.2015-2018.
6. Matlab Simscape URL: <https://matlab.ru/products/simscape>.
7. Filas, J., Čarnoký, P., (2013), "Possibility of Using Simulink in the Dynamics of Lifting Equipment", *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 7. pp. 394-397.
8. Olaya, J., Pintor, N., Aviles, O., Chaparro, J., (2017) "Analysis of 3 RPS Robotic Platform Motion in Sim Scape and MATLAB GUI Environment", *International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562*, Vol. 12, No 8, pp. 1460-1468

А.В. Вовна, В.В. Держевецкий

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Разработка упрощенной математической модели компьютеризированной системы взвешивания грузов косвенным методом в промышленности

В статье проведены теоретические исследования по разработке компьютеризированной системы взвешивания груза. Проанализированы технические требования и средства безопасности подъемно-транспортных механизмов. Проведен анализ способов и средств измерения веса груза косвенным методом в производственных условиях промышленных предприятий с точки зрения повышения показателей надежности подъемно-транспортных механизмов. Доказано, что во многих случаях применения взвешивания нецелесообразно использование тензометрических датчиков с экономической точки зрения. На основании проведенного анализа имеющихся методов и средств измерения веса было выбрано в качестве оптимального опосредованный метод, который позволяет определить массу груза по потребляемой мощности асинхронного двигателя. Проанализировано кинематику механизма подъема. Разработана упрощенная модель в Matlab Simscape. Определены приоритетные направления дальнейших исследований компьютеризированной системы взвешивания грузов для условий промышленных предприятий, которые заключаются в разработке полноценной модели, обосновании полученных показателей взвешивания с учетом дестабилизирующих показателей, таких как, например, температура окружающей среды и температура масла в механизме.

Ключевые слова: тензометрические датчики, взвешивания, ограничитель грузоподъемности, подъемно-транспортный механизм, прямой метод, опосредованный метод, информационно-измерительная система.

O.V. Vovna, V.V. Derzhevetskyi

State Higher Educational Establishment “Donetsk National Technical University”

Development of a simplified mathematical model of a computerized system for weighing cargo by an indirect method in industry

Theoretical research on the development of a computerized system for weighing cargo were conducted in the article. The technical requirements and safety features of hoisting-and-transport mechanisms were analyzed. The analysis of methods and means of measuring the weight of the cargo by an indirect method in the industrial environment of industrial enterprises in terms of increasing the reliability indicators of hoisting and transport mechanisms were conducted. It was proved that in many cases of application of weighing it was impractical to use strain gauge sensors from an economic point of view. Based on the analysis of the available methods and means of measuring weight, the indirect method was chosen as the optimal one, which allows determining the mass of the load by the power consumption of an induction motor. The kinematics of the lifting mechanism was analyzed. A simplified model has been developed in MatlabSimscape. Priority areas for further studies of a computerized cargo weighing system for industrial enterprises was identified, which include the development of a full-fledged model, the justification of the obtained weighing indicators taking into account destabilizing indicators, such as, for example, ambient temperature and oil temperature in the mechanism.

Key words: strain gauges, weighing, load limiter, lifting and transport mechanism, direct method, indirect method, information-measuring system.

Вовна Олександр Володимирович, Україна, закінчив Донецький національний технічний університет, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка, моделювання та дослідження комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем аерогазового контролю.

Держевецький Віталій Володимирович, Україна, закінчив Донбаську державну машинобудівну академію, аспірант кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85301, Україна). Інженер-конструктор ГРiКПО Новокраматорський машинобудівний завод.

Основний напрямок наукової діяльності – методи та засоби зважування вантажів вантажопідйомними кранами у промисловості