

ХОДЯЧИЙ Владислав

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
vladhod22@gmail.com

НИКІТІН Олександр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
vargin@ukr.net

СЕНСОРИ ПОТОКІВ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

В таких галузях промисловості, як харчова, аграрна, фармацевтична, металургійна, хімічна, гірнична тощо, необхідним є визначення масових і об'ємних витрат та кількості сипкого матеріалу, наприклад, зерна, крупи, борошна, а також специфічних складових хімічних та фармакологічних матеріалів, цементу та багатьох інших. Засоби вимірювання витрат і кількості сипких матеріалів є необхідними і обов'язковими складовими в системах автоматизації сучасних виробничих процесів вказаних галузей промисловості. Без використання засобів вимірювання витрат сипких матеріалів не можливо налагодити випуск продукції потрібної якості і конкурентної спроможності. Ось чому питання, пов'язані з розробкою, експериментальним дослідженням та використанням вказаних витратомірів є досить актуальними і науково спроможним.

В статті розглянуті основні види сенсорів, які можуть бути використанні в якості засобів вимірювання витрат сипких матеріалів, а саме крупи та зерна. Був проведений огляд і аналіз останніх публікацій як вітчизняних, так і англійських науково-технічних видань. На даний час розглянуті типи сенсорів мають практичне застосування. Розглянуті схеми сенсорів можуть входити до складу сучасних витратомірів, принципи дії яких базуються на різних принципах і фізичних законах.

Результати проведеного огляду і аналізу сенсорів потоків сипких матеріалів планується в подальшому використати для створення комп'ютерно-інтегрованої системи ідентифікації параметрів потоків сипких матеріалів, яка дасть змогу більш варіативно використовувати автоматизовані системи керування технологічними процесами, в яких робочим тілом є крупи та зерно.

Ключові слова: сенсори, витратоміри, сипкий матеріал, крупи, зерно.

KHODIACHIY Vladislav, NIKITIN Olexander

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SENSORS OF FLOWS OF BULK MATERIALS

In such branches of industry as agriculture, pharmaceutical, metallurgical, chemical, mining, and a number of others, it is necessary to determine the mass consumption and amount of loose material, grain, cereals, flour, specific components of chemical and pharmacological materials of cement, and the mass of others. Ways of measuring the consumption and amount of loose materials are a necessary component in the automation systems of modern production processes of the specified industries. Without the use of devices for measuring the consumption of loose materials, it is impossible to improve the production of products of the required quality and competitiveness. That is why issues related to the development, experimental research and use of these flowmeters are quite relevant.

Production automation is one of the leading areas of scientific and technological progress. With the change or improvement of production technologies, the introduction of new types of equipment, the automation of production processes requires the development of specific methods and device of measurement. Most of the latest methods of measuring the consumption of bulk material allow you to automate the production process, which in turn makes it possible to reduce the cost of the product. The article considered the main types of sensors that can be used as part of ways of measuring the consumption of loose materials, such as cereals and grains. An analysis of the latest publications was made, both in domestic and in English-language publications. The considered sensors can be part of modern flow meters, the principles of which are based on various measurement methods.

According to the fundamental of operation, flowmeters are divided into continuous and discrete, as well as mass and volumetric. The most common flowmeters are those that record flow using strain gauges. As accuracy and compact size allow you to use them in different conditions and with different loose materials. In the article, a lot of attention was paid to impact flowmeters. Based on the analysis of the fundamental of operation of flowmeters, the direction of development of flowmeters with the use of modern technologies to level the influence of flow characteristics on measurement errors will be promising. The results of the conducted review and analysis of flow sensors of loose materials are planned to be used in the future to create a computer-integrated system for identification of flow parameters of loose materials, which will make it possible to use automated control systems of technological processes more variably.

Key words: grain flow, consumption of bulk materials, flow meter.

Постановка проблеми

В різних галузях промисловості мають справу з сипкими матеріалами. Перелік сипких матеріалів досить великий. До числа сипких матеріалів входять зерно, крупи, вугілля, руда, цукор, сіль, цемент тощо. Ці матеріали відрізняються значною кількістю параметрів і використовуються в різних технологічних процесах в суттєво різній кількості. Однією з основних форм знаходження сипких матеріалів в виробничому обладнанні є його потік, а однією з основних характеристик потоку сипкого матеріалу є витрата.

Тому питання, пов'язані з розробкою та вдосконаленням елементної бази засобів визначення витрат сипких матеріалів, були і залишаються актуальними, особливо з огляду на створення сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами переробки і використання сипких матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальний аналіз публікацій по сипким матеріалам показує, що можна виділити два напрямку робіт: один з яких пов'язаний з дослідженням хімічних, фізичних, вологих та інших властивостей сипкого матеріалу, а другий напрям пов'язаний з визначенням параметрів потоків сипких матеріалів, а саме

швидкості потоку, об'ємної чи масової витрати сипкого матеріалу при різній направленості потоків і з врахуванням конструктивних особливостей технологічного обладнання.

В першому випадку багато уваги в цих темах приділяли вологості сипкого матеріалу. Зокрема можливо виділити таких авторів дослідження, як Бенедицький В.Б., Коренівська О.Л., Морозов Д.С., розглянули питання вологості зерна при його обробці і транспортуванні [1]. Також можна виділити роботи автора Анисимова Л.В., який розглядав розподілення вологи сипкого матеріалу в процесах зволоження і осушення [2]. Також авторами статті яку ви зараз читаете була опублікована робота по визначенню густини сипкого матеріалу у гравітаційному потоці [3].

Серед робіт напрямку витратометрія можна виділити інноваційний метод визначення витрат сипкого матеріалу за допомогою використання нейронної мережі, представлена авторами В. С. Афонин, Д. Е. Кривококов [4]. Дослідження можна розділити на дві підгрупи, в одній розглядають вертикальний рух сипкого матеріалу, а в інших горизонтальний рух сипкого матеріалу. Диктерук М.Г., Кравчук В.Т. і Заслужений А.С розглядають в своїх роботах закономірність руху сипкого матеріалу в вертикальному потоці при витоку його з бункерів [5]. В горизонтальному русі сипкого матеріалу можна виділити роботи авторів Криль С.І., Чальцев М.Н. [6], і роботу авторів у медичній сфері Гуляев В.Г., Гуляев И.В. [7].

Серед іноземних авторів, які займалися дослідженням потоків сипких матеріалів можна виділити роботи на тему ударного витратомірів Schrock M.D., Oard D.L., Taylor R.K., Eisele E.L., Zhang N., Suhardjito, Pringle J.L. [8], і роботу по темі вимірювання витрати потоку зерна рентгенологічними методами Selcuk A., Feyzi I., Joseph N.G., Thomas S.C. [9]. Fei Zeng, Qing Wu, Xiuming Chu, Zhangsi Yue в своїй роботі [10] дослідили можливість вимірювати потік сипкого матеріалу за допомогою лазерного сканування на конвеєрній стрічці, що дало змогу зменшити похибку і збільшити швидкість вимірювання чим в других методах. В іншій статті [11] автори Н. Navid, R. K. Taylor, A. Yazgi, N. Wang, Y. Shi, P. Weckler, за допомогою лазерного сканування визначали швидкість потоку сипкого матеріалу, і вони дійшли висновка що за допомогою датчика який вони використовували є можливість вимірювати швидкість потоку зерна не більше 5 кг/с з похибкою 2,6%.

Також авторами цієї статті були проведені свої дослідження і експерименти по темі вимірювання витрати сипкого матеріалу на прикладі перлової крупи при витоку її з бункера (сілоса) з використанням тензорезисторного перетворювача, результати цих досліджень представлені в роботах [12–14].

Виклад основного матеріалу

Автоматизація виробництва є одним з провідних напрямків науково-технічного прогресу. Зі зміною чи вдосконаленням технологій виробництва, впровадженням нових типів обладнання, автоматизація виробничих процесів потребує розробки сучасних методів та засобів вимірювань.

З метою ефективного керування технологічним процесом, використовують поняття масових витрат [15]. Масовою витратою Q є кількість речовини, що проходить через поперечний переріз потоку за одиницю часу:

$$Q = \int pvdS, \quad (1)$$

де Q – масова витрата, кг/с; ρ – густина матеріалу (кг/м³); V – швидкість потоку у перерізі, м/с; S – площа потоку у перерізі, м².

Серед засобів контролю масових витрат зерна та круп на млинах, зерносушарках та круп'яних підприємствах використовують автоматичні порційні ваги, стрічкові ваги, вагові дозатори та витратоміри. Проте для забезпечення оперативного керування на підприємствах доцільнішим є застосування автоматичних витратомірів. З перелічених засобів контролю, саме витратомір в повному ступені відповідає таким вимогам оперативного контролю, як:

- безперервна фіксація параметрів витрат Q і кількості сипучого матеріалу;
- охоплення основних визначальних точок, що характеризують процес;
- точність вимірювання та швидкість реагування;
- висока продуктивність.

Для перетворення параметрів потоку сипкого матеріалу в вихідний електричний чи пневматичний відгук використовують різні сенсори. Сенсор – це не первинний вимірювальний перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання.

Витратоміри сипких матеріалів в своїй більшості є сукупністю сенсора, ліній зв'язку, підсилювачів, перетворювачів і електронного (електричного чи пневматичного) вимірювального приладу. Інформаційно-вимірювальні канали визначення витрат сипких матеріалів автоматизованих систем керування технологічними процесами закінчуються поданням вихідного електричного (пневматичного) сигналу в систему керування технологічним процесом і на вторинні реєструючі прилади. І в першому і другому випадку, основні експлуатаційні та метрологічні показники вимірювального пристрою і каналу в першу чергу будуть визначатися якістю первинного перетворювача, а саме сенсора.

В технічній літературі, в більшості випадків, витратомірами, з нашої точки зору, помилково називають саме первинні вимірювальні перетворювачі, а саме – сенсори. Для з'ясування окремих положень і має послугувати ця стаття.

Наразі існує безліч методів та конструкцій приладів для контролю витрат сипких матеріалів, однак основними незмінними елементами сучасного витратоміра є: датчик, який перетворює вплив вимірюваного матеріалу на електричний сигнал, інформаційно-вимірювальний канал та вторинний реєструючий прилад.

За принципом дії витратоміри поділяються на безперервної дії та дискретної, а також на масові та об'ємні. Умови технологічного процесу задовольняють витратоміри безперервної дії. За принципом дії сенсора витратоміри безперервної дії класифікуються наступним чином (табл. 1):

Таблиця 1

| Витратоміри сипкого матеріалу безперервної дії | |
|---|--|
| Масові | Об'ємні |
| Стрічкові Ударні та віброударні Доцентрові Крильчасті та гвинтові На основі порційних ваг | Гвинтові Лопатеві Базуються на вимірюванні геометричних та електричних параметрів потоку |

Стрічкові витратоміри з сенсорами витрат стрічкового типу поділяють на такі групи:

- прилади, датчики яких інсталиуються в існуючі транспортери;
- прилади, в яких датчики оснащені самостійними короткими транспортерами.

До першої групи приладів відносять конвеєрні (стрічкові) ваги. Кількість сипкого матеріалу, що знаходиться на стрічці транспортера, є функцією сили тиску цієї стрічки на ролик (рис.1). Масова витрата розраховується як добуток швидкості стрічки та її навантаження, при чому швидкість сипкого матеріалу дорівнює швидкості стрічки, а рухом частинок в шарах можна знехтувати. Основними недоліками, що впливають на похибку вимірювання в таких вагах є натяг стрічки та її жорсткість.

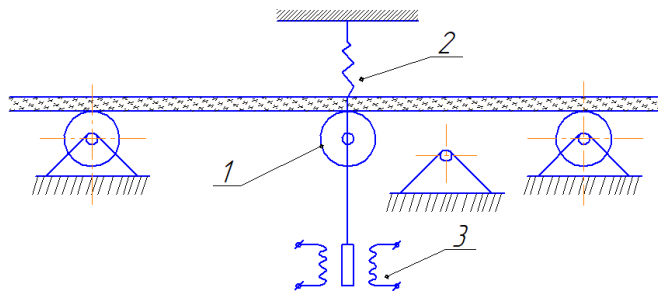


Рис. 1. Схема стрічкового сенсора витрати:

1 – ролик; 2 – врівноважуюча пружина; 3 – вимірювальний елемент: диференційно трансформаторний перетворювач

В другій групі приладів витратомір у вигляді короткого транспортера розташовується на платформі важільних ваг (рис. 2). Сумарний тиск сипкого матеріалу на транспортер при цьому залежить від геометричних та кінематичних параметрів стрічкового транспортера, а також від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу. Щоб спростити цю залежність, швидкість подачі сипкого матеріалу зрівнюють зі швидкістю його руху, а діаметр кінцевого барабану визначають таким чином, щоб при досягненні його вертикального діаметру, потік сипкого матеріалу відривався від стрічки. Щоб зменшити вплив пружних властивостей сипкого матеріалу, щільність потоку при подачі на транспортер має бути вищою. Похибка вимірювання залежить від розташування живильника та складає близько 3% [16].

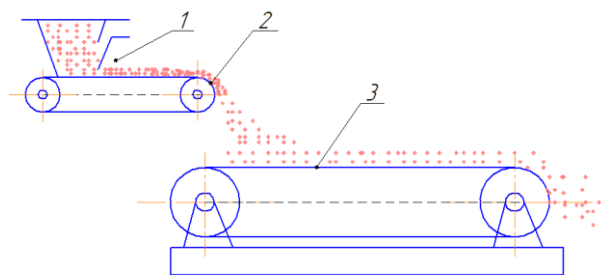


Рис. 2. Схема сенсора витрат з коротким транспортером:

Ударний витратомір. Потік, сформований трубою чи жолобом, спрямований під певним кутом на жорстку пластину (лоток), що вимірює силу удару цього потоку. Масова витрата при цьому прямо пропорційна силі реакції пластини. Відхилення пластини фіксує тензодатчик, що відправляє сигнал до вторинного приладу, де визначається витрата. Прилад також визначає сумарні витрати у часі, що надає дані про масу пройденого сипкого матеріалу, тобто, функцію ваг безперервної дії.

Використання цього типу витратомірів є доцільним у випадку сталості фізико-механічних властивостей сипких матеріалів. Тобто, швидкість та кут падіння потоку сипкого матеріалу мають бути стабільними. За таких умов похибка вимірювання складає 4%.

Вдосконалений тип ударного витратоміра базується на принципі поворотного спускного жолобу (рис. 3). Спочатку потік сипкого матеріалу зрівнюється за допомогою напрямного жолобу, а після спрямовується на поворотний жолоб. Там він набуває доцентрового прискорення і реакція жолоба на цей вплив передається на ваговий датчик. При цьому похибка знижується до 1-2%.

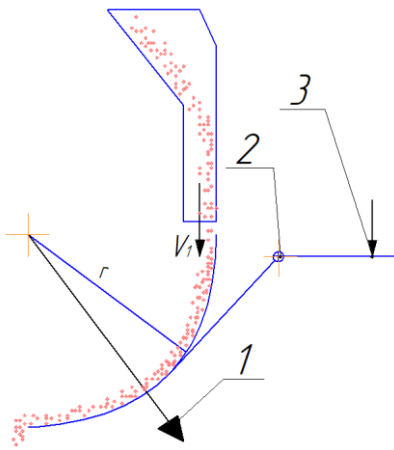


Рис. 3. Схема лоткового витратоміра: 1 – результуючий фактор; 2 – шарнір; 3 – протидіюча сила

насипну її щільність. Також, як з C-Lever виробник заявляє похибку вимірювань на рівні 0,5% [18].

Перевагами цих витратомірів є компактні розміри та висока точність. До недоліків слід віднести вплив удару на точність та можливе скупчення пилу на лотках витратоміру. Осідання пилу призводить до зміщення початкової точки відліку на шкалі вимірювання, тому витратоміри потребують періодичного чищення виміральної системи та калібрування.

З сучасних витратомірів ударного типу можна виділити витратоміри фірми C-LEVER (рис. 4а) і Hense FlowSlide (рис.4б). Принцип роботи C-LEVER заснований на ексклюзивній та запатентованій процедурі вимірювання. Це забезпечує дуже точне вимірювання масової витрати сипких матеріалів з компенсацією тертя. Навіть при різних властивостях сипучих матеріалів досягається точність вимірювання до 99,5% (мінімальна продуктивність 50 кг/год, мінімальна щільність матеріалу 0,3 т/м³) [17]. Витратомір Hense Flow Slide дає змогу вимірювати витрату потоку 150 - 300 м³ на не зважаючи на розмірі зерна та

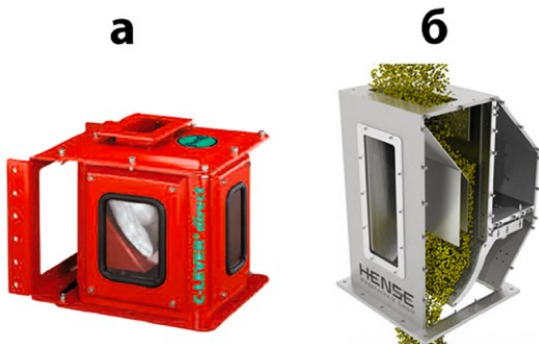


Рис. 4. Сучасні ударні витратоміри

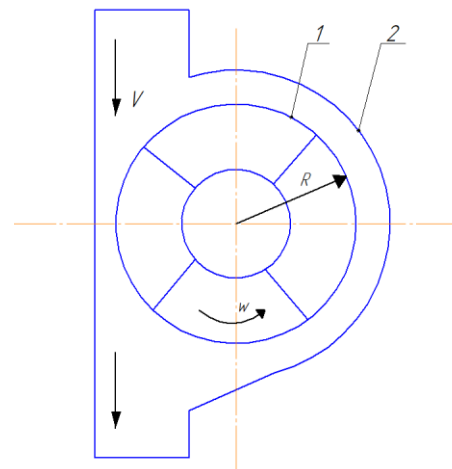


Рис. 5. Схема крильчастого сенсора: 1 – крильчатка; 2 – кожух

Віброударні витратоміри – це змінений вид лоткових витратомірів. Для подачі сипкого матеріалу такі витратоміри мають у своїй конструкції віброповерхню, яка регулює вплив коефіцієнтів тертя на швидкість руху потоку сипкого матеріалу. Оскільки існує залежність між основними параметрами потоку та динамічним коефіцієнтом тертя, використання віброповерхонь в якості датчиків витратомірів не є доцільним.

Крильчасті витратоміри (коріолісові, лопатеві). Потік сипкого матеріалу при потраплянні на лопаті витратоміра, змінює швидкість обертання крильчатки (рис. 5) [19].

Залежність кутової швидкості ω від витрати виражається як:

$$\omega = \frac{V}{R} - \frac{M_{тр}}{QR^2} \quad (2)$$

де V – швидкість потоку сипкого матеріалу, м/с; R – радіус крильчатки, м; $M_{тр}$ – момент сили тертя, $H \cdot m$; Q – масова витрата, кг/с.

З рівняння (1) видно, що залежність кутової швидкості від витрати є нелінійною.

Перевагами такого витратоміра є простота та надійність конструкції. Недоліки – нелінійність тарувальної характеристики та значний вплив повітряного потоку на швидкість подачі сипкого матеріалу.

Гвинтовий витратомір працює за принципом вимірювання швидкості, з якою потік сипкого матеріалу обертає гвинт у трубі. Переріз труби повністю заповнений сипким матеріалом, що виступає як гайка по відношенню до гвинта. Основним недоліком такого витратоміра є низька продуктивність та похибка 4%.

Витратоміри на основі порційних ваг. Автоматичні ваги регулюють кількість матеріалу в вантажному пристрої, накопичуючи задану порцію сипкого матеріалу. Після досягання необхідної ваги, потік матеріалу перекривається та порція пересипається в приймальний пристрій. При цьому безперервний потік перетворюється в дискретний.

На похибку вимірювання порційних ваг впливає швидкість та точність відсікання потоку матеріалу. Це можливо здійснити, якщо потік матеріалу буде подаватись тонким струменем, що призводить до збільшення тривалості циклу зважування та зменшення продуктивності ваг в цілому.

Витратоміри, які базуються на вимірюванні електричних параметрів потоку. В ємнісному (поляризаційному) витратомірі вимірювання базується на зміні діелектричної проникності між обкладками

конденсатора, які розташовуються ззовні труби з матеріалом. Проходячи по трубі сипкий матеріал створює токові імпульси, за величиною яких визначають кількість матеріалу. Перевагами такого витратоміру є вимірювання в реальному часі та компактність, однак прилад має низьку продуктивність та похибку 3-5%.

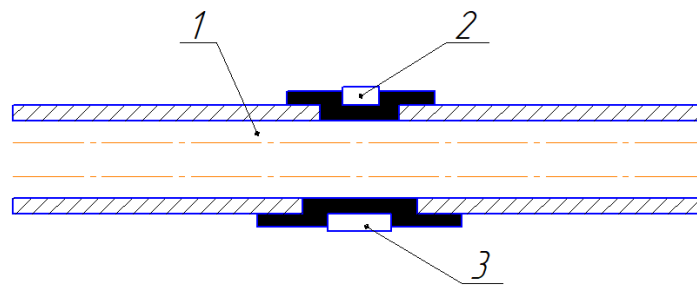


Рис. 6. Гамма-променевий сенсор:
1 – трубопровід; 2 – джерело випромінювання; 3 – приймач випромінювання

Також до цих типів витратомірів відноситься гамма-променевий витратомір (рис. 6). Він працює за принципом поглинання гамма-променів потоком сипкого матеріалу [20].

На протилежних сторонах пневмотруби встановлюють випромінювач та приймач випромінювання, який фіксує послаблення інтенсивності гамма-променів, що пройшли крізь потік матеріалу. На похибку такого витратоміра впливають вологість та густина матеріалу і вона складає 5%.

Трибоелектричний витратомір. Трибоелектричний ефект це поява електричних зарядів у матеріалі через тертя. Є типом контактної електризації, де деякі матеріали стають електрично зарядженими після того, як вони входять у фрикційний контакт з іншим матеріалом. Витратомір служить для вимірювання витрати сипких матеріалів до 100 кг/год на ділянках вільного падіння та в потоці пневмотранспорту. Їхня популярність пояснюється простим монтажем та введенням в експлуатацію, гарним поєднанням ціни та якості. Наприклад витратомір фірми PicoFlow ідеально підходить для промислового застосування, особливо на електростанціях або цементних заводах, де його можна використовувати для регулювання або контролю додаткового реагенту при обробці димових газів: впорскування активованого вуглецю, сорбенту або бурого вугілля. Але також похибка такого витратоміру є великою, що складає 5% [21].

Відцентрові витратоміри базуються на вимірюванні моменту сили дії потоку на лопаті крильчатки, які обертаються електродвигуном. Датчики цих витратомірів можна поділити на 2 типи: з вертикальною віссю обертання крильчатки та з горизонтальною віссю.

В першому випадку матеріал по трубі потрапляє на центральну частину крильчатки, що передає його назовні (рис. 7). Обертання крильчатки навколо вертикальної осі здійснює електродвигун, в якому статор допускає його обертання лише за вертикальною віссю. Поворот статора за дії моменту реактивних сил є пропорційним масовій витраті сипкого матеріалу.

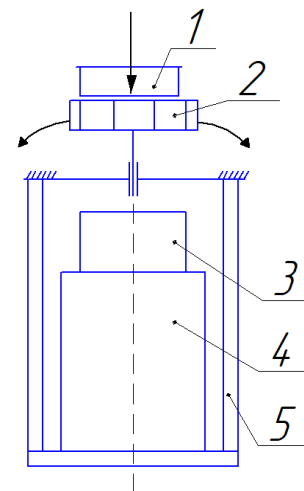


Рис. 7. Схема сенсора Коріоліса з вертикальною віссю обертання:
1 – трубопровід; 2 – крильчатка; 3 – редуктор; 4 – електродвигун; 5 – пружинні елементи

Конструкція витратоміра з горизонтальною віссю обертання крильчатки (рис. 8) передбачає фізичний маятник, утворений з електродвигуна та врівноваженого вантажу. Вісь маятника співпадає з віссю обертання крильчатки. Сипкий матеріал рухається по похилій трубі та потрапляє на крильчатку. Масова витрата при цьому пропорційна куту відхилення фізичного маятника під дією моменту реактивних сил.

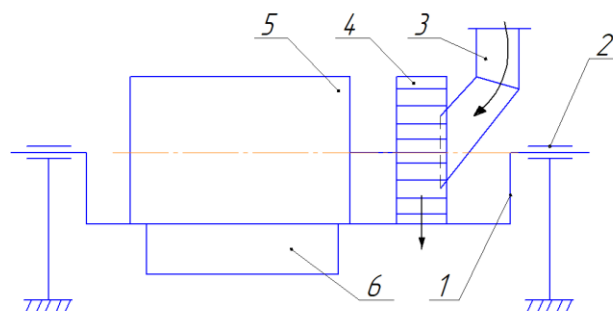


Рис. 8. Схема сенсора Коріоліса з горизонтальною віссю обертання:
1 – кронштейн; 2 – опори; 3 – трубопровід; 4 – крильчатка;
5 – електродвигун; 6 – врівноважуючий вантаж

Перевагою таких витратомірів є відсутність впливу коефіцієнтів тертя на похибку вимірювання через розташування лопатей за радіусом крильчатки. Похибка вимірювання складає 2%.

Висновки

Проведений огляд та аналіз сенсорів витратомірів сипких матеріалів показав:

- одним із перспективних напрямків створення автоматизованих виробничих процесів в харчовій і аграрній промисловості є використання сучасних витратомірів сипких матеріалів з ефективними сенсорами;
- практичну відсутність робіт по методам та засобам вимірювання витрат круп;
- відсутність теоретичних розробок окремих видів первинних перетворювачів – сенсорів параметрів потоків таких сипких матеріалів, як круп і зернові матеріали;
- відсутність результатів аналітичних та експериментальних досліджень первинних перетворювачів параметрів потоків круп і зернових матеріалів;
- одним з ефективних методів визначення параметрів потоків сипких матеріалів є метод, що базується на силовій взаємодії потоку сипкого матеріалу і пружних перетворювачів – сенсорів динамічного опору;
- доцільність і своєчасність постановки питання по створенню комп'ютерно-інтегрованої системи ідентифікації параметрів потоків сипких матеріалів.

Література

1. Бенедицький В. Б. Визначення вологості зерна за тиском вологого повітря / В. Б. Бенедицький, О. Л. Коренівська, Д. С. Морозов // Технічна інженерія. – 2021. – №87. – С. 98–103.
2. Анисимова Л. В. Распределение влаги в зерне крупяных культур при увлажнении и отволаживании / Л. В. Анисимова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2005. – № 1. – С. 60–62.
3. Ходячий, В. В. Визначення густини сипкого матеріалу в гравітаційному потоці / В. В. Ходячий, О. К. Нікітін // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 13-14 травня 2020 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 164–166.
4. Афонин В. С. Применение нейросетевых технологий для определения величины расхода сыпучего вещества / В. С. Афонин, Д. Е. Кривобоков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – № 57. – С. 47–50.
5. Диктерук М. Г. Исследование закономерностей движения сыпучих материалов в вертикальных емкостях (силосы/бункеры): мониторинг статического напряженного состояния и анализ истечения по второй форме в общей постановке / М. Г. Диктерук, В. Т. Кравчук, А. С. Заслуженный // Вісник ХНТУ. – 2018. – № 3. – С. 55–73.
6. Криль С. И. К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам / С. И. Криль, М. Н. Чальцев // Прикладна гідромеханіка. – 2010. – № 12. – С. 36–44.
7. Гуляев В. Г. Способ измерения количества пневмотранспортируемого сыпучего материала в фармацевтическом производстве, основанный на эффекте поккельса / В. Г. Гуляев, И. В. Гуляев // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2018. – № 3. – С. 52–56.
8. Schrock M. D. A diaphragm impact sensor for measuring combine grain flow / M. D. Schrock, D. L. Oard, R. K. Taylor // Applied Engineering in Agriculture. – 2014. – № 15. – С. 639–642.
9. Selcuk A. Grain flow measurements with X-ray techniques / A. Selcuk, I. Feyzi, N. G. Joseph, S. C. Thomas // Computers and Electronics in Agriculture. – 2000. – № 26. – С. 65–80.
10. Fei Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors / Z. Fei, W. Quing, C. Xiuming, Y. Zhangsi // Measurement. – 2015. – № 75. – С. 230–243.
11. Navid N. Detecting grain flow rate using a laser scanner / N. Navid, R. K. Taylor, A. Yazgi // Biological Systems Engineering: Papers and Publications. – 2015. – № 576. – С. 1185–1190.
12. Ходячий В. В. Експериментальне визначення параметрів взаємодії потоку сипких матеріалів і твердих тіл / В. В. Ходячий, О. К. Нікітін // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПФФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського; Центр учбової літератури, 2019. – С. 232–235.
13. Ходячий В. В. Определение давление в трубопроводе при движении потоков сыпучих материалов / В. В. Ходячий, О. К. Нікітін // XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 208–211.
14. Ходячий В. В. Зіставлення характеристик пружних перетворювачів / В. В. Ходячий, О. К. Нікітін // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 17–18 травня 2022 р., Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 98–100.

15. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
16. Луткин Н. И. Расходомеры для зерна и сыпучих материалов / Н. И. Луткин. – М. : Колос, 1969. – 184 с.
17. C-LEVER: Flow metering for powders and bulk materials [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rembe-kersting.de/en/products/messtechnik/flow-metering/c-lever/>.
18. FlowSlide / Hense [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://hense-waegetechnik.de/en/solid-flow-meters/flowslide-solid-flow-meter/>.
19. Карпин Е. Б. Автоматизация процессов взвешивания и дозирования / Б. Карпин, 1967. – 420 с.
20. Афонин В. С. Метод измерения расхода и его экспериментальная проверка / В. С. Афонин, О. И. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3. – С. 94–97.
21. Envea Global: PicoFlow [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.envea.global/ru/s/process-ru/flow-measurement-process-ru/picoflow/>

References

1. Benedytskyi V. B. Vyznachennia volohosti zerna za tyskom volohoho povitria / V. B. Benedytskyi, O. L. Korenivska, D. S. Morozov // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2021. – №87. – С. 98–103.
2. Anisimova L. V. Raspredelenie vlagi v zerne krupyanykh kultur pri uvlazhnenii i otvolazhvanii / L. V. Anisimova // *Izvestiya vuzov. Pishhevaya tehnologiya*. – 2005. – № 1. – С. 60–62.
3. Khodiachyi, V. V. Vyznachennia hustyny sypkoho materialu v hravitatsiinomu pototsi / V. V. Khodiachyi, O. K. Nikitin // *XIKh Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy»*, 13-14 travnia 2020 r., Kyiv, Ukraina : zbirnyk materialiv konferentsii. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – С. 164–166.
4. Afonin V. S. Primenenie nejrosetevykh tehnologiy dlya opredeleniya velichiny rashoda sypuchego veshstva / V. S. Afonin, D. E. Krivobokov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Priborostroenie*. – 2013. – № 57. – С. 47–50.
5. Dikteruk M. G. Issledovanie zakonomernostey dvizheniya sypuchykh materialov v vertikalnykh emkostyakh (silosy/bunkery): monitoring staticheskogo napryazhennogo sostoyaniya i analiz istecheniya po vtoroy forme v obshej postanovke / M. G. Dikteruk, V. T. Kravchuk, A. S. Zasluzhennyj // *Visnik HNTU*. – 2018. – № 3. – С. 55–73.
6. Kril S. I. K voprosu o metodikah rascheta osnovnykh parametrov pnevмотransporta sypuchykh materialov po gorizontálnym trubam / S. I. Kril, M. N. Chalcev // *Prikladna gidromehanika*. – 2010. – № 12. – С. 36–44.
7. Gulyaev V. G. Sposob izmereniya kolichestva pnevмотransportiruemogo sypuchego materiala v farmacevticheskom proizvodstve, osnovannyi na effekte pokkelsa / V. G. Gulyaev, I. V. Gulyaev // *Razrabotka i registraciya lekarstvennykh sredstv*. – 2018. – № 3. – С. 52–56.
8. Schrock M. D. A diaphragm impact sensor for measuring combine grain flow / M. D. Schrock, D. L. Oard, R. K. Taylor // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2014. – № 15. – С. 639–642.
9. Selcuk A. Grain flow measurements with X-ray techniques / A. Selcuk, I. Feyzi, N. G. Joseph, S. C. Thomas // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2000. – № 26. – С. 65–80.
10. Fei Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors / Z. Fei, W. Quing, C. Xiuming, Y. Zhangsi // *Measurement*. – 2015. – № 75. – С. 230–243.
11. Navid N. Detecting grain flow rate using a laser scanner / N. Navid, R. K. Taylor, A. Yazgi // *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. – 2015. – № 576. – С. 1185–1190.
12. Khodiachyi V. V. Eksperymentalne vyznachennia parametriv vzaiemodii potoku syppykh materialiv i tverdyykh til / V. V. Khodiachyi, O. K. Nikitin // *XV Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Efektyvnist inzhenernykh rishen u prykladobuduvanni»*, 10-11 hrudnia 2019 roku, m. Kyiv, Ukraina : zbirnyk prats konferentsii / KPI im. Ihoria Sikorskoho, PBF, FMM. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho; Tsentr uchbovoi literatury, 2019. – С. 232–235.
13. Khodiachyi V. V. Opredelenie davlenie v truboprovode pri dvizhenii potokov sypuchykh materialov / V. V. Khodiachyi, O. K. Nikitin // *KhIV Naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Pohliad u maibutnie prykladobuduvannia»*, 18-19 travnia 2021 r., m. Kyiv, Ukraina : zbirnyk prats konferentsii. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. – С. 208–211.
14. Khodiachyi V. V. Zistavleniia kharakterystyk pruzhnykh peretvoriuvachiv / V. V. Khodiachyi, O. K. Nikitin // *XKH Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy»*, 17–18 travnia 2022 r., Kyiv, Ukraina : zbirnyk materialiv konferentsii. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. – С. 98–100.
15. Makarov Yu. I. Apparaty dlya smesheniya sypuchykh materialov / Yu. I. Makarov. – М. : Mashinostroenie, 1973. – 216 с.
16. Lutkin N. I. Rashodomery dlya zerna i sypuchykh materialov / N. I. Lutkin. – М. : Kolos, 1969. – 184 с.
17. C-LEVER: Flow metering for powders and bulk materials [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://rembe-kersting.de/en/products/messtechnik/flow-metering/c-lever/>.
18. FlowSlide / Hense [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://hense-waegetechnik.de/en/solid-flow-meters/flowslide-solid-flow-meter/>.
19. Karpin E. B. Avtomatizatsiya processov vzheshivaniya i dozirovaniya / B. Karpin, 1967. – 420 с.
20. Afonin V. S. Metod izmereniya rashoda i ego eksperimentalnaya proverka / V. S. Afonin, O. I. Homutov // *Polzunovskij vestnik*. – 2011. – № 3. – С. 94–97.
21. Envea Global: PicoFlow [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.envea.global/ru/s/process-ru/flow-measurement-process-ru/picoflow/>