

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний університет “Львівська політехніка”**

**Романюк Олександр Миколайович**



УДК 532.137

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ  
КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ**

05.11.13 – прилади та методи контролю і визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська політехніка".

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Пістун Євген Павлович,**  
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська політехніка".

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Древецький Володимир Володимирович,**  
завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне).

доктор технічних наук, професор  
**Райтер Петро Миколайович,**  
завідувач кафедри енергетичного менеджменту та технічної діагностики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Захист відбудеться «18» грудня 2020 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 в Національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 51 Х-го навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «\_\_\_» листопада 2020 року.

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.04,  
кандидат технічних наук, доцент*



Ю.З. Вашкурак

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку промисловості України целюлозно-паперова промисловість є однією із перспективних галузей промислового виробництва, що забезпечує стабільний розвиток економіки. Сьогодні в Україні у паперовій галузі працює близько 40 підприємств, які виготовили у 2013 році більше 1,1 млн. тон картонно-паперової продукції. Лідерами вітчизняної паперової галузі є ВАТ «Київський КПК», ВАТ «Корюківська ФТП», ПАТ «Кохавинська ПФ».

Сучасне виробництво паперу та картону є високотехнологічним і наукоємним процесом. За капіталоемністю та енергоємністю паперова галузь займає третє місце після металургії та хімічної промисловості. За прогнозом, у 2020 році обсяг виробництва картонно-паперової продукції зросте до рівня 2,0 – 2,2 млн тон, що вимагатиме капіталовкладень близько 20 млрд. гривень.

Основною сировиною для вітчизняних підприємств галузі сьогодні є макулатура. Рівень регенерації вторинного волокна в Україні становить 49-50 %, тоді як у багатьох європейських країнах цей показник дорівнює 65- 70 %.

Технологічні процеси переробки макулатурної маси можна реалізовувати як на великих і потужних технологічних лініях, так і в відносно невеликих масштабах. Це теж буде достатньо економічно ефективним, оскільки знижуються затрати на перевезення сировини і готової продукції та зменшується техногенне навантаження на довкілля. Важливим технологічним параметром в згаданих технологічних процесах, без якого неможливе створення системи керування цими процесами, є концентрація паперової пульпи. Цей параметр вимірюють за в'язкістю паперової пульпи, і це один з небагатьох прикладів вимірювання концентрації середовища за в'язкістю.

Метрологічні і експлуатаційні параметри приладів, які розробляються для вимірювання концентрації паперової пульпи, можна покращити шляхом модифікації процесу вимірювання з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

Вдосконалення методів вимірювання концентрації і побудованих на їх основі систем керування технологічним процесом виробництва паперу є актуальним і економічно доцільним, оскільки сприятиме зменшенню енергозатратності папероробної промисловості.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій» Національного університету «Львівська політехніка» і носить науково-прикладний характер. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «Прилади та методи контролю та визначення складу речовин».

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є покращення метрологічних та експлуатаційних параметрів приладів для вимірювання концентрації паперової пульпи шляхом модифікації процесу вимірювання її в'язкості з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

Для реалізації цієї мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. провести аналіз конструкцій та функціонування концентратомірів паперової маси, та вивчити можливості покращення їх метрологічних властивостей;
2. розробити порядок проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою ротаційних та лопаткових концентратомірів;
3. розробити алгоритми опрацювання отриманої інформації, які суттєво зменшують вплив швидкості течії паперової пульпи у трубопроводі на результат вимірювання її концентрації;
4. провести експериментальні дослідження вдосконалених концентратомірів паперової пульпи;
5. здійснити математичне моделювання впливу неінформативних параметрів та експериментально перевірити найважливіші висновки з цього моделювання;
6. розробити вимірювальну схему ротаційного та лопаткового концентратомірів;
7. провести її математичне моделювання та експериментальне дослідження.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційними та лопатковими концентратомірами паперової пульпи в технологічному процесі виробництва паперу.

**Предметом дослідження** є методи та засоби підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи, інваріантної щодо впливу зміни умов вимірювання, за допомогою ротаційного та лопаткового концентратомірів у паперовій промисловості.

**Методи дослідження** базуються на використанні теорії вимірювань; теорії реологічної поведінки неньютонівських рідин, теорії ймовірностей та математичної статистики; методів обробки сигналів; математичного та комп'ютерного моделювання, методів алгоритмізації та програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Вперше запропонована методологія забезпечення інваріантності механічних концентратомірів паперової пульпи до наявних неінформативних параметрів шляхом управління рухом чутливих елементів механічних концентратомірів, що забезпечує підвищення точності вимірювання.

2. Вперше запропоновано керувати рухом чутливого елемента лопаткового концентратоміра паперової пульпи за сигналом від генератора імпульсів трикутної форми, що забезпечує постійну швидкість зсуву при вимірюванні і підвищує точність вимірювання концентрації паперової пульпи за вимірним моментом сили в'язкісного тертя.

3. Вперше запропоновано метод компенсації впливу неінформативних параметрів на вимірне ротаційним концентратоміром значення концентрації паперової пульпи шляхом знакоперемінного обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювання моменту в'язкісного тертя, що зменшує вплив несиметричного розподілу швидкості течії пульпи на результат вимірювання.

4. Отримав подальший розвиток метод компенсації впливу ущільнення валу з чутливим елементом на результат вимірювання концентрації в ротаційних концентратомірах, для чого запропоновано застосовувати магнітоелектричний

компенсатор моменту в'язкісного тертя, що підвищує точність вимірювання на початку діапазону вимірювання.

5. Запропоновані нові схеми побудови ротаційних та лопаткових концентратомірів паперової пульпи з кращими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Запропоновано та реалізовано новий порядок проведення вимірювання концентрації паперової маси за допомогою ротаційного концентратоміра із здійсненням вимірювань по черзі на двох різних частотах обертання чутливого елемента із наближенням до них зі сторони нижчих та вищих частот обертання, та повторенням вимірювань при зміні напрямку обертання ротора.

2. Розроблено алгоритм опрацювання результатів вимірювань, який зменшує вплив моментів сил тертя в ущільненнях та у підшипниках вимірювальної осі ротаційного концентратоміра на отримане значення концентрації паперової маси.

3. Запропоновано та реалізовано новий порядок проведення вимірювання концентрації паперової маси за допомогою лопаткового концентратоміра з активною лопаткою із здійсненням вимірювань моменту сили зсуву при постійному програмно встановлюваному значенні швидкості зсуву.

4. Розроблено алгоритм визначення концентрації паперової маси за допомогою лопаткового концентратоміра, який зменшує вплив швидкості течії паперової маси на результат вимірювання її концентрації.

5. Реалізація запропонованих вдосконалень концентратомірів досліджуваних механічних методів дозволяє підвищити точність вимірювання концентрації паперової маси без внесення змін у механічну частину таких концентратомірів.

6. Розроблено нові електронні блоки обробки інформації в концентратомірах та програми для обробки інформації за допомогою програмованих логічних контролерів Siemens Simatic S7.

Розроблені ротаційні концентратоміри паперової маси передані на впровадження при вимірюваннях концентрації паперової маси в процесі виробництва паперової продукції на ПАТ Кохавинська ПФ. Застосування нових концентратомірів дозволить покращити ефективність процесу виробництва картонно-паперової продукції за рахунок підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри «Автоматизація і комп'ютерно інтегровані технології» (АВКТ) при викладанні курсу «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади, частина 2».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертації отримані автором особисто, на основі власних ідей і розробок, а окремі досягнуті у співавторстві з науковим керівником та працівниками за місцем роботи. У публікаціях, в яких викладено результати досліджень і які написані у співавторстві, дисертанту належать: обґрунтування застосування лопаткового концентратоміра для вимірювання концентрації паперової пульпи [1, 2]; обґрунтування застосування ротаційного концентратоміра для вимірювання концентрації паперової пульпи [3, 4, 5, 6, 7]; розробка алгоритмічного методу підвищення точності лопаткових

концентратомірів [2, 10, 11, 12, 13, 14, 15]; розробка способу проведення вимірювання концентрації паперової пульпи за допомогою ротаційного віскозиметра [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

**Апробація результатів дисертації.** Дисертаційна робота обговорювалась на наукових семінарах кафедри “Автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій” Національного університету “Львівська політехніка”. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на дванадцяти конференціях:

5-а науково-практична конференція студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2015); 5-th International Academic Conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2015” (EPECS-2015), (Lviv, 2015); II Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2015); XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2016); III Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне, та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2016); 6-th International Academic Conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2016” (EPECS-2016), (Lviv, 2016); IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології 2017 (АКІТ–2017)» (Київ, 2017); XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2017), IV міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017)» (Вінниця, 2017). 7-th International Academic Conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2017” (EPECS-2017) (Lviv, 2017), 8-ма науково-технічна конференція "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання". (Івано-Франківськ, 2017), IV Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2017).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 18 наукових працях: 5 статей у виданнях, одне з яких входить до наукометричної бази Index Copernicus та чотири у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 12 публікацій у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, та у патенті України на винахід №119899.

Робота виконувалась в Національному університеті «Львівська політехніка» з 2014 р. до 2018 р.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел інформації. Дисертація викладена на 157 сторінках. Крім того, робота проілюстрована 46 рисунками, містить 9 таблиць, список використаних джерел із 105 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** дано загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково-технічної проблеми вимірювання концентрації паперової маси у процесах виробництва паперової продукції. Обґрунтовано актуальність теми, на підставі чого сформульовані мета та основні задачі дослідження. Висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

**В першому розділі** розглянуто технологічні процеси виробництва паперової продукції. Показано, що для забезпечення безпечної та безперебійної роботи технологічного обладнання необхідно здійснювати контроль концентрації паперової маси. Відхилення величини концентрації паперової маси від оптимальної знижує якість продукції та підвищує її собівартість.

На основі аналізу літературних даних встановлено, що у промислових масштабах використовують механічні концентратоміри (ротаційного та лопаткового типів з вимірюванням в'язкості паперової маси), оптичні концентратоміри (із вимірюванням інтенсивності світла, яке проходить через паперову масу, або відбивається нею, а також із контролем зміни поляризації пучка світла при проходженні через потік паперової маси), та мікрохвильові концентратоміри (які вимірюють час проходження мікрохвилями відомої відстані між передаючою та приймальною антенами). Два останні згадані типи концентратомірів працюють переважно із достатньо вузькими пучками випромінювання, аналізуючи концентрацію паперової маси в обмеженій частині потоку паперової маси.

Показано, що найбільш придатним для вимірювання концентрації паперової пульпи з домішками забарвлюючих речовин, електропровідних солей та твердих дрібнодисперсних абразивних частинок є механічний метод, різновиди якого – ротаційний та лопатковий – потребують вдосконалення з метою покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик, уніфікації градувальних характеристик та зменшення чутливості до зміни неінформативних параметрів.

Основним напрямом досліджень є покращення метрологічних та експлуатаційних параметрів приладів для вимірювання концентрації паперової маси шляхом модифікації процесу вимірювання її в'язкості з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

**Другий розділ** присвячено дослідженню ротаційного концентратоміра паперової пульпи і розробці вдосконаленого алгоритму проведення вимірювань, який забезпечить підвищену інваріантність результатів вимірювання до неоднорідності розподілу швидкості течії паперової пульпи у околі чутливого елемента концентратоміра, до моментів сил тертя в ущільненнях та підшипниках осі концентратоміра.

**Показано**, що за допомогою ротаційного концентратоміра з двома паралельними дисками можливе сумісне вимірювання коефіцієнта консистенції  $K$  та індексу поведінки течії  $n$  у рівнянні Оствальда де Веле, та видимої в'язкості  $\mu$  паперової пульпи, котра відноситься до неньютонівських рідин (псевдопластична рідина зі значенням індексу поведінки течії у межах  $0,7 < n < 1$ ).

Для цього слід провести вимірювання моментів сил зсуву  $M_1$  та  $M_2$ , які діють на чутливий диск при двох різних кутових швидкостях обертання пропелера  $\Omega_1$  та  $\Omega_2$ , та використати для опрацювання результатів вимірювань формулу (1) (Steffe J.F. (1996) *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Second edition. Freeman Press, East Lansing, MI, USA 418p. <https://sites.google.com/site/jfsteffe/freeman-press> ):

$$\frac{M(3+n)}{2\pi R^3} = K \left( \frac{\Omega R}{h} \right)^n = K(\dot{\gamma}_R)^n \quad (1)$$

Тут  $\Omega = 2\pi f$  – кутова швидкість обертання пропелера,  $f$  – частота його обертання,  $n$  – індекс поведінки течії,  $K$  – коефіцієнт консистенції, та  $\dot{\gamma}_R$  – швидкість зсуву рідини на краю диска (на відстані  $R$  від геометричної осі обертання), та  $h$  – відстань між площинами дисків.

Отримуємо систему рівнянь (2) та (3):

$$\frac{M_1(3+n)}{2\pi R^3} = K \left( \frac{\Omega_1 R}{h} \right)^n \quad (2)$$

$$\frac{M_2(3+n)}{2\pi R^3} = K \left( \frac{\Omega_2 R}{h} \right)^n \quad (3)$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримуємо значення індексу поведінки течії  $n$ , коефіцієнта консистенції  $K$ , та видимої в'язкості неньютонівської рідини  $\mu$ :

$$n = \frac{\ln(M_1/M_2)}{\ln(\Omega_1/\Omega_2)}, \quad K = M_1 \cdot \frac{(3+n)}{2\pi R^3} \cdot \left( \frac{h}{\Omega_1 R} \right)^n, \quad \mu = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1}.$$

**Показано** можливість усунути вплив моментів сил тертя в ущільненні та у підшипниках осі чутливого елемента концентратоміра, змінюючи частоту обертання пропелера у процесі вимірювань так, щоб періодично наближатися до частоти обертання диска  $f_{\text{вим.}}$ , на якій проводяться вимірювання, зі сторони нижчих та потім зі сторони вищих частот.

Позначимо діючі моменти сил:  $M_{\uparrow}^{\text{В'ЯЗК.}}$  та  $M_{\downarrow}^{\text{В'ЯЗК.}}$  – момент сил в'язкого тертя, що діє на чутливий диск завдяки обертанню паперової маси при наближенні частоти обертання пропелера до частоти вимірювань з області нижчих та вищих частот відповідно,  $M_S$  – момент сили тертя в ущільненні осі,  $M_B$  – момент сили тертя у підшипниках осі,  $M_V$  – момент сили тертя, що діє на сенсор через несиметричний розподіл швидкості течії рідини всередині трубопроводу,  $M_{T\uparrow}$  та  $M_{T\downarrow}$  – момент сили, з яким діє на вісь вимірювальний перетворювач моменту сили при наближенні частоти обертання пропелера до частоти вимірювань з області нижчих та вищих частот.

Прийmemo, що чутливий елемент обертається за напрямом обертання годинникової стрілки (додатний напрям, нижній індекс +). Прикладений до нього момент сили вважаємо додатним (+), якщо він викликає обертання чутливого елемента за напрямом руху годинникової стрілки, та від'ємним (–), якщо намагається обертати чутливий елемент у протилежному напрямі. Приймемо також, що момент сили  $M_V$ , який діє на чутливий елемент, повертає чутливий елемент у додатному



напрямі. У цьому випадку можна записати основне рівняння динаміки обертального руху, якщо частота зростає до обраної ( $\uparrow$ ):

$$(\uparrow) \quad M_{\uparrow+}^{\text{ВЯЗК.}} - M_S - M_B + M_V - M_{T\uparrow+} = J\varepsilon. \quad (4)$$

Якщо частота зменшується до обраної ( $\downarrow$ ), чутливий елемент повертається проти руху годинникової стрілки, і моменти сил тертя в ущільненні його осі  $M_S$ , та в її підшипниках  $M_B$  будуть заважати такому повертанню, тобто, змінять знак мінус на плюс; знак моменту сили,  $M_V$  не змінить свого знаку, бо напрям течії паперової пульпи не змінився:

$$(\downarrow) \quad + M_{\downarrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B + M_V - M_{T\downarrow+} = J\varepsilon. \quad (5)$$

Коли частота обертання пропелера стабілізується, і стане рівною обраній для вимірювань частоті обертання  $f = f_{\text{вим.}}$ , кутове прискорення сенсора стає рівним нулю  $\varepsilon = 0$ . Підставивши його значення у (4) та (5), отримуємо рівняння

$$(\uparrow) \quad + M_{\uparrow+}^{\text{ВЯЗК.}} - M_S - M_B + M_V = M_{T\uparrow+} \quad (6)$$

та

$$(\downarrow) \quad + M_{\downarrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B + M_V = M_{T\downarrow+} \quad (7)$$

Звідси середнє значення моменту сили, виміряне перетворювачем моменту сили

$$M_{T.\text{сеп.}+} = \frac{M_{T\uparrow+} + M_{T\downarrow+}}{2} = \frac{M_{\uparrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + M_{\downarrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + 2M_V}{2}. \quad (8)$$

Отже, запропонований спосіб проведення вимірювань, із подальшим усередненням результатів вимірювання моменту сили  $M_T$ , усуває вплив моментів сил тертя в ущільненні  $M_S$  та у підшипниках  $M_B$  осі чутливого елемента концентратоміра на результат вимірювання в'язкості та концентрації паперової маси.

**Показано** можливість усунути вплив асиметрії розподілу швидкості течії паперової пульпи поблизу чутливого елемента концентратоміра на виміряне значення параметрів паперової пульпи шляхом проведення вимірювань при почерговій зміні напрямку обертання пропелера концентратоміра.

Запишемо рівняння балансу моментів сил (6) та (7) при обертанні пропелера у напрямі, протилежному до напрямку руху годинникової стрілки (нижній індекс  $-$ ). Тоді знаки усіх моментів сил, окрім  $M_V$  зміняться на протилежні. Знак  $M_V$  залишається попереднім, оскільки напрям течії пульпи у трубопроводі не змінився:

$$(\uparrow) \quad - M_{\uparrow-}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B + M_V = - M_{T\uparrow-} \quad (9)$$

та

$$(\downarrow) \quad - M_{\downarrow-}^{\text{ВЯЗК.}} - M_S - M_B + M_V = - M_{T\downarrow-} \quad (10)$$

Звідси середнє значення моменту сили, виміряне перетворювачем моменту сили

$$M_{T.\text{сеп.}-} = \frac{M_{T\uparrow-} + M_{T\downarrow-}}{2} = \frac{M_{\uparrow-}^{\text{ВЯЗК.}} + M_{\downarrow-}^{\text{ВЯЗК.}} - 2M_V}{2}. \quad (11)$$

Знайдемо середнє значення моментів сили закручування торсіону чутливого елемента при наближенні частоти обертання пропелера до робочої знизу  $M_{T\uparrow}$  та зверху  $M_{T\downarrow}$  при обертанні пропелера за напрямом руху годинникової стрілки (+) та у протилежному напрямі (-):

$$M_{T.сер.} = \frac{M_{T\uparrow+} + M_{T\downarrow+} + M_{T\uparrow-} + M_{T\downarrow-}}{4}. \quad (12)$$

Звідси 
$$M_{T.сер.} = \frac{1}{2}M_{T.сер.+} + \frac{1}{2}M_{T.сер.-} \quad (13)$$

Підставивши у (13) вирази для  $M_{T.сер.+}$  (8), та  $M_{T.сер.-}$  (11), отримуємо

$$M_{T.сер.} = \frac{M_{\uparrow+}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow+}^{ВЯЗК.} + M_{\uparrow-}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow-}^{ВЯЗК.}}{4}. \quad (14)$$

Отже, при усередненні абсолютних значень моментів сили, які діють на чутливий елемент концентратоміра при наближенні частоти обертання пропелера до попередньо обраної для проведення вимірювань частоти обертання з області нижчих ( $\uparrow$ ) та вищих ( $\downarrow$ ) частот при обертанні пропелера по черзі за годинниковою стрілкою ( $+$ ), та проти годинникової стрілки ( $-$ ), напрямах відбувається компенсація моментів сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента  $M_S$ , підшипниках осі  $M_B$ , та моменту сили, який діє на чутливий елемент концентратоміра внаслідок несиметричного розподілу швидкості течії у околі чутливого елемента концентратоміра  $M_V$ .

Для використання виявлених закономірностей у ротаційних концентратомірах запропоновані варіанти циклу зміни частоти обертання пропелера ротаційного концентратоміра при вимірюванні концентрації паперової пульпи (рис. 1).

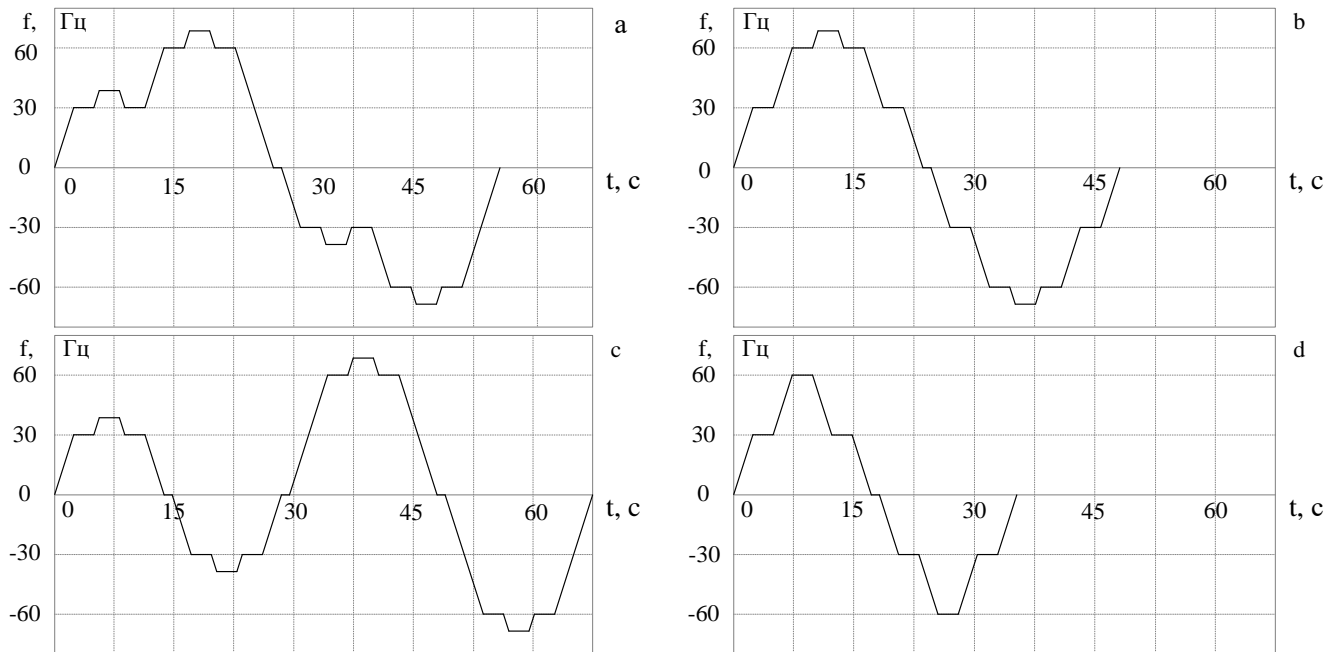


Рис. 1. Запропоновані цикли зміни частоти обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи з часом. По осі ординат відображена частота обертання чутливого елемента  $f$  (1/с). Частота зі знаком мінус вжита для позначення напряму обертання чутливого елемента в протилежний бік ( $-$ ).

Горизонтальні ділянки графіків, що відповідають частотам обертання 30 Гц або 60 Гц, використовуються для проведення вимірювань концентрації паперової пульпи після наближення частоти обертання пропелера до цих частот із сторони нижчих, або

зі сторони вищих частот. Похилим ділянкам відповідають перехідні режими від одної наперед встановленої робочої частоти до іншої. Для реалізації зміни з часом частоти обертання чутливого елемента концентратоміра двигун концентратоміра живиться від частотного перетворювача.

**Досліджено** модель ротаційного концентратоміра з одним чутливим елементом у формі диска радіусом  $R$ , який обертається у потоці паперової пульпи. Сили в'язкого тертя у цьому випадку діють на обидві плоскі поверхні диска, ефективна товщина шару паперової пульпи, у якому відбувається в'язке тертя, позначена  $h$ .

При моделюванні ротаційних концентратомірів застосовуємо моделі (1, 2, 3) та отримані з них:

$$n = \frac{\ln(M_1/M_2)}{\ln(\Omega_1/\Omega_2)} \quad K = M_1 \cdot \frac{(3+n)}{4\pi R^3} \cdot \left(\frac{h}{\Omega_1 R}\right)^n,$$

а також моделі динаміки обертального руху чутливого елемента.

При дослідженні роботи ротаційних концентратомірів з одним диском встановлено, що змінюючи у процесі вимірювань напрям обертання чутливого елемента однодискового ротаційного концентратоміра на протилежний, та проводячи усереднення результатів вимірювання при обертанні чутливого елемента у прямому та зворотному напрямках, буде скомпенсований момент сили  $M_V$ . При цьому усереднене значення моменту сили, яке вимірює вимірювальний перетворювач

$$M_{T.сер.} = M_{сер.}^{в'язк.} + M_S + M_B.$$

Отже, усунути алгоритмічним способом паразитні моменти сил в ущільненні осі  $M_S$ , та у підшипниках осі чутливого елемента  $M_B$  не вдається, їх треба мінімізувати.

Мінімізувати вплив моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента  $M_S$  на результати вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційним концентратоміром можна такими способами:

1. Застосувати чутливий елемент достатньо великих розмірів, щоб момент сили в'язкого тертя  $M^{в'язк.}$  був набагато більшим, ніж момент сил тертя в ущільненні  $M_S$ .

2. Виміряти експериментально залежність  $M_S$  від режиму обертання чутливого елемента та вводити відповідну поправку при обчисленні концентрації пульпи.

3. Застосувати ущільнення, яке буде одночасно виконувати роль пружного елемента, за кутом закручування якого вимірювати діючий на чутливий елемент момент сили в'язкого тертя  $M$ .

4. Застосувати конструкцію вимірювального вузла, у котрій ущільнення забезпечує герметичне нерухоме з'єднання чутливого елемента із системою приводу через пружну тонкостінну трубку, кут закручування якої несе інформацію про момент сили в'язкого тертя, що діє на чутливий елемент.

5. Застосувати автоматичну слідкуючу систему, котра буде обертати вісь чутливого елемента, яка проходить по осі допоміжного трубчастого валу, та з'єднана з ним пружним ущільненням, з сталою кутовою швидкістю, з якою обертається допоміжний трубчастий вал. Ущільнення валу чутливого елемента при цьому буде весь час в незакрученому стані, а споживана потужність сервоприводу чутливого елемента буде пропорційна до моменту в'язкого тертя  $M^{в'язк.}$ .

6. Застосувати магнітоелектричний, або електромагнітний компенсатор моменту сили в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент, завдяки якому при роботі компенсатора еластичне ущільнення чутливої осі перебуває у недеформованому стані, і, не створює додаткового моменту сил  $M_S$ .

**Третій розділ** присвячено дослідженню лопаткового концентратоміра паперової пульпи і розробці вдосконаленого процесу вимірювання та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювань, які забезпечують підвищену інваріантність результатів вимірювання концентрації паперової пульпи до зміни швидкості течії паперової пульпи в околі лопатки концентратоміра та забезпечують роботу чутливого елемента концентратоміра при постійній швидкості зсуву паперової пульпи. Підтримання постійної швидкості зсуву паперової пульпи дозволяє уніфікувати калібрувальні та компенсаційні залежності для лопаткових концентратомірів.

В запропонованій нами модифікованій конструкції концентратоміра паперової пульпи (рис. 2) рухома лопатка здійснює коливання з постійною швидкістю в обидва боки відносно середнього положення. Як інформаційний параметр використано силу струму через навитку магнітоелектричного перетворювача при русі лопатки концентратоміра в усталеному режимі за течією та назустріч напрямковій течії.

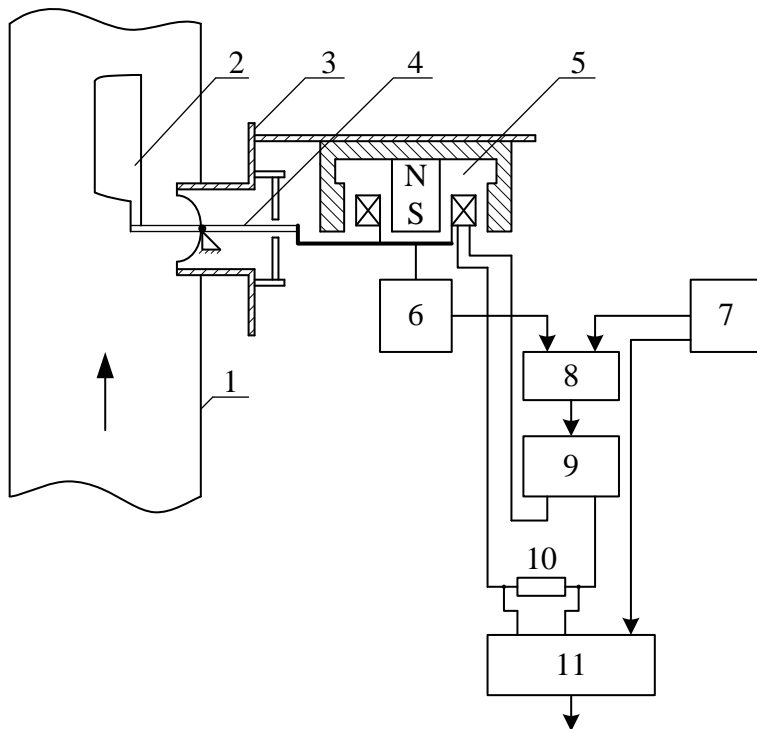


Рис.2. Принципова схема запропонованого концентратоміра паперової пульпи з активною лопаткою з компенсацією впливу швидкості течії.

В запропонованому концентратомірі закріплена на важелі 4 лопатка 2 здійснює коливання у площині рисунка відносно середнього положення вздовж осі трубопроводу 1 з постійною знакоперемінною швидкістю. Координата лопатки задається генератором імпульсів трикутної форми 7 та вимірюється перетворювачем переміщення 6. Слідкуюча пропорційна система, що складається з диференційного підсилювача 8 і підсилювача потужності 9, забезпечує максимальну наближеність часової залежності координати лопатки 2 до форми імпульсів генератора 7. Магнітоелектричний перетворювач, який складається з навитки і магнітної системи 5, забезпечує рух лопатки. Струм через навитку магніто-

електричного перетворювача визначають по спадку напруги на опорі 10. Цей струм пропорційний до величини моменту сили, потрібного для переміщення лопатки в рухомому потоці паперової пульпи з певною концентрацією. Роботу концентратоміра пояснюють графіки зміни напруг на виходах основних блоків концентратоміра і

графік зміни сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача в часі, приведені на рис. 3 для випадку руху лопатки у нерухомій пульпі (нульова швидкість течії пульпи).

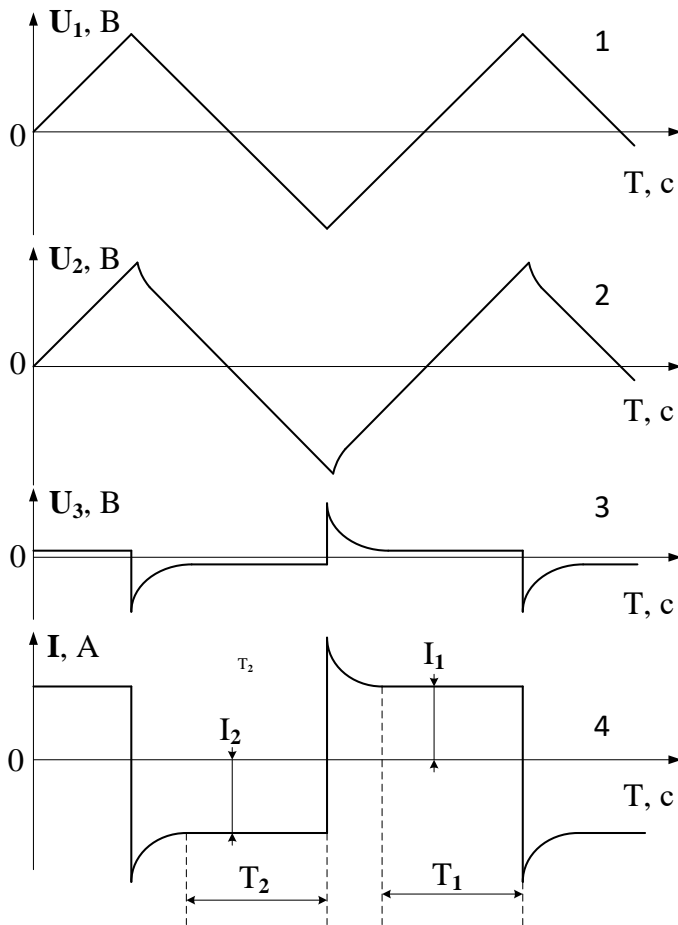


Рис. 3. Графіки зміни напруг та струму в часі після основних блоків запропонованого концентратоміра з компенсацією впливу швидкості потоку паперової пульпи. Графіки наведено для умови нульової швидкості течії пульпи. 1 – зміна напруги на виході генератора імпульсів трикутної форми; 2 – зміна напруги після перетворювача переміщення рухомої лопатки концентратоміра; 3 – зміна напруги після диференційного підсилювача; 4 – зміна сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача.

Імпульси правильної трикутної форми з виходу генератора 7 (графік 1) разом із напругою із приймального перетворювача вагеля 6 (графік 2) поступають на входи диференціального підсилювача 8. Отримана на його виході різниця вхідних напруг (графік 3), подається на підсилювач потужності 9, струм із виходу якого (графік 4), поступає на навитку магнітоелектричного перетворювача 5, забезпечуючи рух лопатки із постійною швидкістю по черзі у прямому та зворотному напрямках. Описана слідкуюча система підтримує після встановлення рівномірного режиму руху лопатки із постійною швидкістю аж до моменту зміни напрямку руху, заданого генератором трикутних імпульсів. Значення сил струму  $I_1$  та  $I_2$  несуть інформацію про концентрацію паперової пульпи. Значення сили струму вимірюють через певний час після зміни напрямку руху лопатки на протилежний, коли слідкуюча система забезпечить сталу швидкість переміщення лопатки в паперовій пульпі, і сила струму через навитку магнітоелектричного перетворювача стабілізується.

При течії паперової пульпи зміниться вигляд графіків 2, 3, 4 на рис. 3, тому, що у цьому випадку швидкість пульпи відносно лопатки відрізняється для руху лопатки за течією та проти течії. Графіки зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача концентратоміра у потоці паперової пульпи наведені на рис. 4.

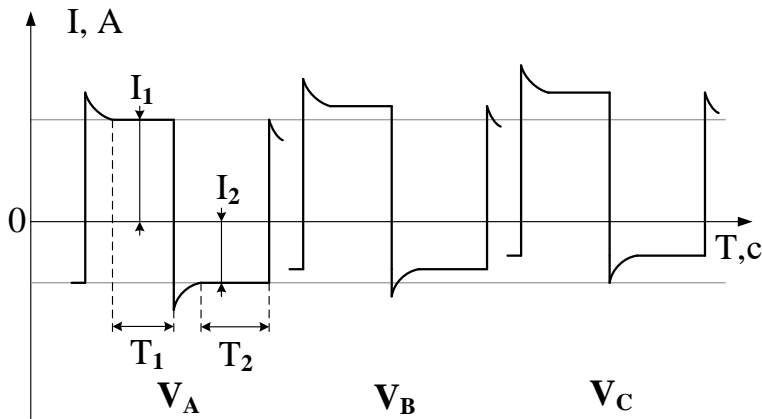


Рис. 4. Графіки зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача концентратоміра паперової пульпи при трьох різних значеннях швидкості руху паперової пульпи ( $V_A < V_B < V_C$ ) і постійному значенні концентрації паперової пульпи.

через навитку магнітоелектричного перетворювача при русі лопатки в усталеному режимі назустріч течії та за течією пульпи  $I = I_1 + I_2$ .

Зміни сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача при зміні концентрації паперової пульпи показані на рис. 5. Сили струму в усталених режимах при русі лопатки назустріч течії пульпи  $I_1$  та за напрямом течії  $I_2$  зростають із ростом концентрації паперової пульпи. Їх різниця росте при збільшенні швидкості руху паперової пульпи.

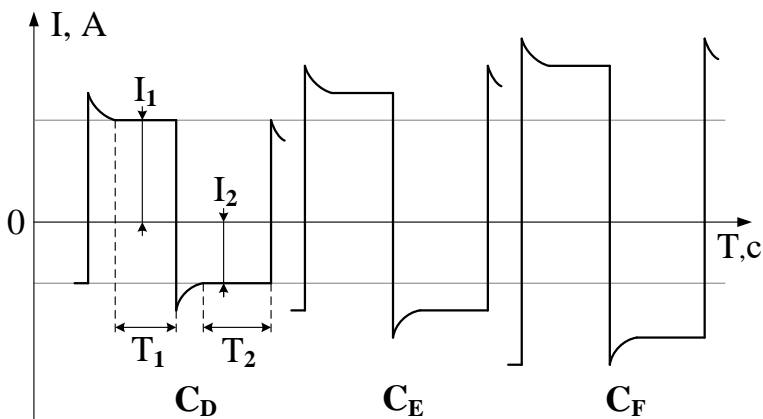


Рис. 5. Графіки зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача концентратоміра паперової пульпи при трьох різних значеннях концентрації паперової пульпи ( $C_D < C_E < C_F$ ) і постійному значенні швидкості руху паперової пульпи.

Значення сил струму в усталених режимах при русі лопатки назустріч течії  $I_1$  та за напрямом течії  $I_2$  відрізняються, і ця різниця росте при збільшенні швидкості руху паперової пульпи. Але сума сил струмів  $I_1 + I_2$  залишається постійною і незалежною від швидкості потоку паперової пульпи. Тому для компенсації впливу швидкості течії паперової пульпи на значення концентрації при опрацюванні результатів вимірювань використовуємо суму сил струмів

Сума сил струмів  $I = I_1 + I_2$  зростає пропорційно до концентрації паперової пульпи, що використовується при побудові алгоритму опрацювання результатів вимірювань концентрації паперової пульпи. Розроблена також принципова схема лопаткового концентратоміра, у якому закріплена на осі лопатка виконує коливання у площині симетрії потоку пульпи, перпендикулярній до площини рисунка (рис. 6). Лопатка закріплена у потоці паперової пульпи на осі 4, до якої прикріплений важіль 13 з

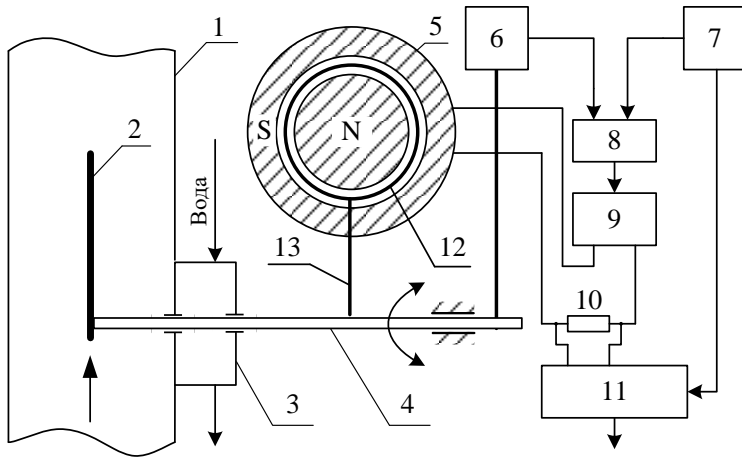


Рис. 6. Принципова схема запропонованого концентратоміра паперової маси з компенсацією впливу швидкості потоку з повертанням лопатки на невеликий кут за допомогою осі приводу.

1 – трубопровід; 2 – лопатка концентратоміра; 3 – “мокре” ущільнення осі; 4 – вісь; 5 – магнітна система магнітоелектричного перетворювача; 6 – приймальний перетворювач обертання осі; 7 – генератор імпульсів трикутної форми; 8 – диференційний підсилювач; 9 – підсилювач потужності; 10 – опір; 11 – мікроконтролерна система для обробки інформації і зв’язку з системою відображення та керування технологічним процесом; 12 – навитка магнітоелектричного перетворювача; 13 – важіль.

навиткою 12 магнітоелектричного перетворювача, який забезпечує повертання осі, та приймальний перетворювач обертання осі 6.

Будова електричної частини та спосіб опрацювання інформації в обидвох запропонованих лопаткових концентратомірах співпадають.

Показано, що коефіцієнт консистенції  $K$  для цього концентратоміра прямо пропорційний до сили струму  $I$  через навитку магнітоелектричного перетворювача при рівномірному русі лопатки з кутовою швидкістю  $\Omega$

$$K = \frac{3 + n}{2R^2H} \cdot \left(\frac{h}{\Omega R}\right)^n B \cdot l \cdot l_A \cdot I.$$

Тут  $B$  – індукція магнітного поля у області розташування навитки перетворювача,  $l$  – довжина проводу у навитці,  $l_A$  – плече сили Ампера, яка діє на навитку 12, рівне сумі довжини важеля 13 та радіусові витків навитки 12.

**Четвертий розділ** присвячено вдосконаленню та експериментальному дослідженню ротаційних концентратомірів паперової пульпи із компенсатором моменту сили в’язкого тертя, створенню компенсатора моменту сили в’язкого тертя із лінійною залежністю між створеним моментом сили та силою струму, що живить компенсатор, та підвищенню точності вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційним концентратоміром.

Прототипом запропонованого концентратоміра паперової пульпи є концентратомір МЕК-2300, побудований по компенсаційній схемі. Запропонований концентратомір відрізняється від прототипу використанням розробленого нами магнітоелектричного компенсатора моменту сили в’язкого тертя (замість електромагнітного), способом опрацювання сигналу від оптичного давача кута закручування торсійного елемента концентратоміра і пристроєм для його реалізації.

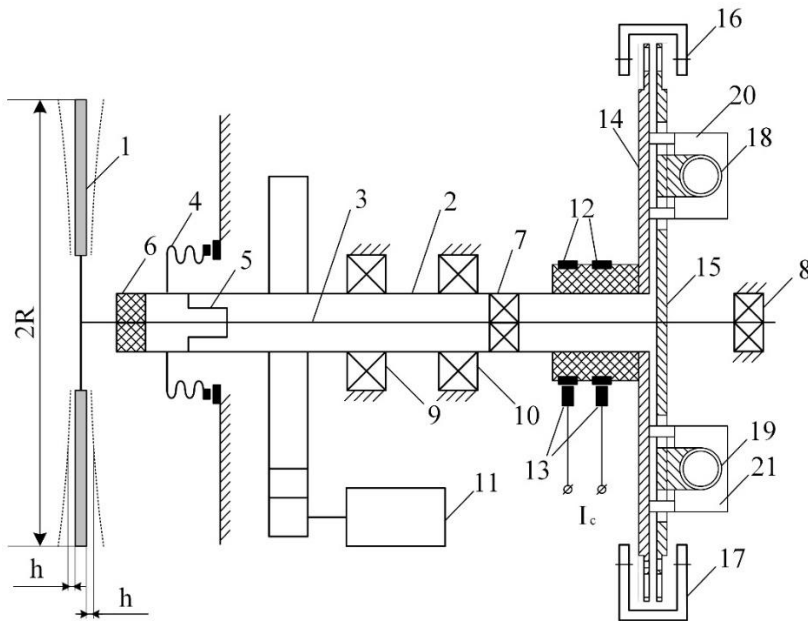


Рис. 7. Конструкція механічної частини ротаційного концентрометра паперової пульпи з магнітоелектричним компенсатором моменту в'язкісного тертя. 1 - чутливий елемент дископодібної форми; 2 - основний порожнистий вал приладу; 3 - вал чутливого елемента; 4 - ущільнення основного порожнистого вала з силфону і кільцевих вставок зі сплаву карбід вольфраму-кобальт; 5 - гнучке ущільнення з поздовжньо гофрованої тонкостінної трубки; 6 - захисне еластичне ущільнення; 7, 8 - підшипники вала чутливого елемента; 9, 10 - підшипники основного порожнистого вала; 11 - двигун з живленням від частотного перетворювача; 12 - струмопідвідні кільця; 13 - графітокомпозитні щітки; 14 - диск з прорізами на основному валу приладу; 15 - диск з прорізами на валу чутливого елемента; 16 - оптопара з відкритим оптичним каналом для вимірювання кутового зміщення дисків 14 і 15; 17 - оптопара з відкритим оптичним каналом для фіксації початку відліку; 18, 19 - навитки магнітоелектричного перетворювача, закріплені на диску 15; 20, 21 - магнітні системи, закріплені на диску 14.

Конструкція концентрометра наведена на рис. 7. Магнітоелектричний компенсатор (перетворювач) має наступну конструкцію. На валу 2 закріплений диск 14 з рівномірно розташованими по колу 72 прямокутними прорізами, на якому закріплені на стійках магнітні системи 20 і 21 перетворювача. На валу 3 закріплений диск 15 з ідентичним набором прямокутних прорізів. На диску 15 закріплені два алюмінієві каркаси з навитками 18 і 19. Струм до навиток 18 і 19 підводиться через струмопідвідні кільця 12 і щітки 13. Поворот диску 15 відносно диску 14 під дією прикладеного до чутливого елемента концентрометра моменту сили в'язкого тертя на деякий кут змінює тривалість світлових імпульсів, які проходять через вікна дисків 14 та 15 на фотодіод оптопари з відкритим оптичним каналом 16. Відхилення кута повороту чутливого елемента відносно основного вала від початкового значення компенсується магнітоелектричним компенсатором. При цьому сила струму через навитки компенсатора пропорційна до значення моменту в'язкісного тертя і пов'язана з концентрацією паперової пульпи градуовальною характеристикою концентрометра.

Оптопара 17 застосовується для синхронізації початку відліку імпульсів від оптопари 16.



Досліджено статичні характеристики електромагнітного компенсатора концентратоміра МЕК-2300 (рис. 8), та створеного нами магнітоелектричного компенсатора (рис. 9). Як видно з рис. 9, залежність створеного компенсатором моменту сили від сили струму в навитках  $M(I)$  для розробленого нами магнітоелектричного компенсатора дослідженому діапазоні сил струмів має лінійний характер.

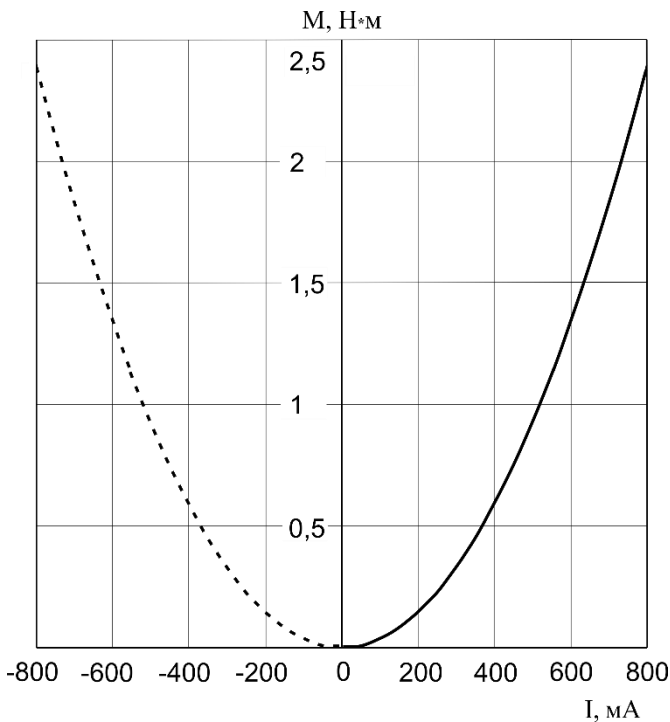


Рис. 8. Статична характеристика ротаційного концентратоміра МЕК-2300 з електромагнітним компенсаційним механізмом

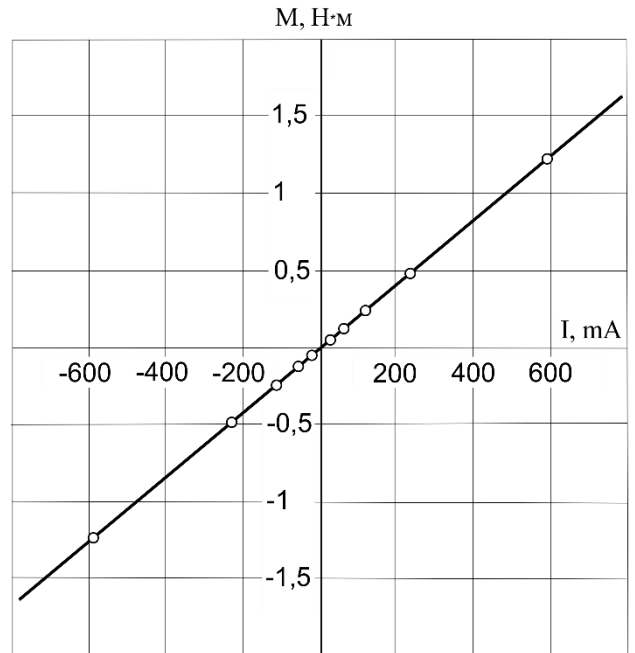


Рис. 9. Статична характеристика ротаційного концентратоміра з створеним магнітоелектричним компенсаційним механізмом

Розроблений магнітоелектричний перетворювач в порівнянні з електромагнітним перетворювачем промислового концентратоміра МЕК-2300 має наступні переваги: 1) лінійна залежність функції перетворення, 2) краща відтворюваність статичної характеристики, 3) простіша процедура налагодження механічної частини концентратоміра, 4) менша маса деталей на валу чутливого елемента. 5) статична характеристика магнітоелектричного перетворювача симетрична відносно початку координат, що дозволяє вимірювати момент сили в'язкого тертя при обертанні чутливого елемента у довільному напрямі, тоді як відомий електромагнітний перетворювач концентратоміра МЕК-2300 працює лише при обертанні чутливого елемента у одному напрямі.

Нами запропоновано спосіб опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута закручування чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи та створено і досліджено відповідний пристрій.

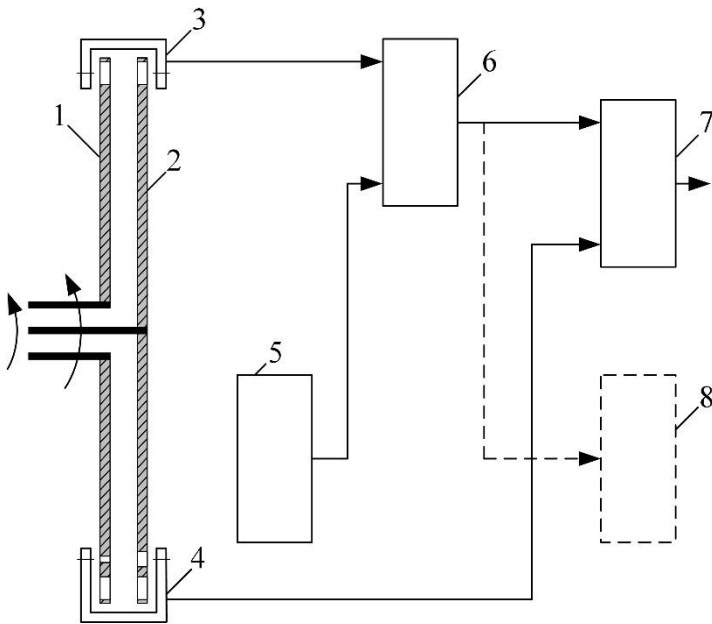


Рис. 10. Структурна схема пристрою для опрацювання сигналу від давача кута закручування чутливого елемента ротаційного концентроміра. 1 – диск з прорізами по колу, закріплений на основному порожнистому валу приладу; 2 – диск з прорізами по колу, закріплений на валу чутливого елемента; 3 – оптипара для вимірювання кута повороту диску 2 відносно диску 1; 4 – оптипара для фіксації початку відліку; 5 – кварцований генератор імпульсів з частотою 50 кГц; 6 – логічний елемент співпадіння; 7 – вільнопрограмований логічний контролер з швидкісними входами; 8 – вимірювач частоти обертання сенсора (частотомір).

2. Найменше середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки вимірювання концентрації паперової пульпи  $\sigma \approx 0,4\%$ , зведене до діапазону вимірювання концентроміра паперової пульпи, отримане при підрахунку кількості імпульсів в довільно вибраних послідовних 504 пачках імпульсів після логічного елемента 6, (7 обертів основного вала приладу) з прив'язкою початку підрахунку до імпульсу від допоміжної оптипари 4. Тривалість вимірювання при цьому близько 1 с, що підходить для систем неперервного контролю концентрації паперової пульпи.

Проведене калібрування концентроміра для паперової пульпи зі складом: гофрокартон (50 %), канцелярський папір (25 %) і газетний папір (25 %), призначеної для виготовлення санітарно-гігієнічного паперу. Градувальна характеристика концентроміра (рис. 11) побудована у координатах консистенція – сила струму

Пристрій функціонує наступним чином. При повертанні вала чутливого елемента відносно основного вала концентроміра диск 2 повертається відносно диска 1, змінюючи кут перекриття прорізів на цих дисках. Оптипара 3 за один оберт дисків 1 і 2 зафіксує 72 імпульси прямокутної форми, тривалість яких залежить від кута повороту диска 2 відносно диска 1, та частоти обертання сенсора. Для вимірювання тривалості світлових імпульсів, електричні імпульси з виходу оптипари 3 заповнюємо імпульсами з фіксованою частотою 50 кГц, і підраховуємо їх за допомогою вільнопрограмованого логічного контролера.

У результаті вивчення варіантів опрацювання сигналу встановлено:

1. Зміна моменту сил в'язкісного тертя у межах діапазону вимірювання без стабілізації частоти обертання вала концентроміра приводить до зміни числа обертів на 0,6 %. Тому забезпечення вищої точності вимірювання концентрації паперової пульпи вимагає стабілізувати частоту обертання ротора концентроміра.

через навитки магнітоелектричного концентратоміра та апроксимована за допомогою степеневої функції типу  $f(x) = ax^b + c$ . Результатом апроксимації є функція

$$f(x) = 3.955 \cdot x^{2.688} + 170.7 \quad (4)$$

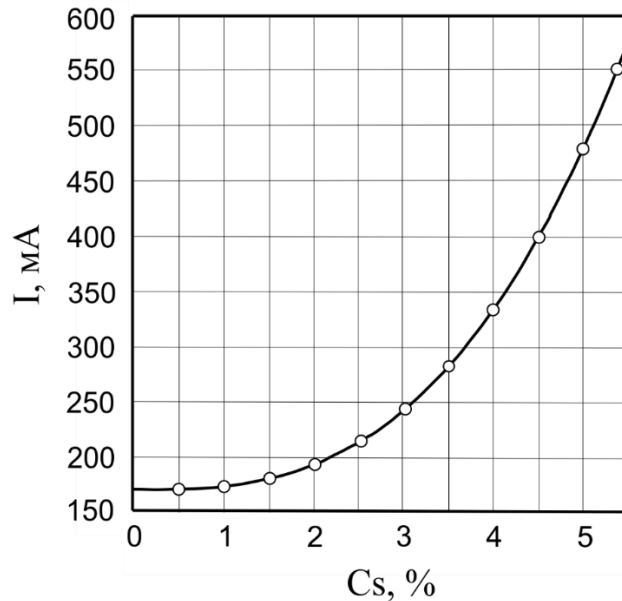


Рис. 11 Градувальна характеристика концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією у координатах концентрація паперової пульпи – сила струму через навитку магнітоелектричного компенсатора для паперової пульпи зі складом: суміш гофрокартону (50%), канцелярського паперу (25%) та газетного паперу (25%). Чутливий елемент ВТГ Тип В. Суцільною лінією показана розрахована степенева функція  $f(x)$ . Кружечками позначені експериментальні точки. Експерименти проведені при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\omega = 7,1\text{ об/с}$ .

Побудований графік підтверджує адекватність апроксимації отриманої градувальної характеристики.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень в дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу, яка полягає у розробці методів та засобів покращення метрологічних та експлуатаційних параметрів приладів для вимірювання концентрації паперової маси шляхом модифікації процесу вимірювання її в'язкості з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

При цьому одержано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану методів та технічних засобів вимірювання консистенції паперової пульпи обґрунтовано вибір механічного методу вимірювання концентрації паперової пульпи на основі вимірювання моменту сили зсуву, з яким діє на чутливий елемент концентратоміра досліджувана паперова пульпа, та шляхи вдосконалення механічного методу вимірювання концентрації паперової пульпи.

2. Вперше розроблено новий принцип вимірювання концентрації паперової пульпи, що полягає у вимірюванні ефективної в'язкості неньютонівської рідини за

двох швидкостей обертання і за двох режимів роботи (прямо / реверс) чутливого елемента ротаційного концентратоміра та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювання моменту в'язкісного тертя, що зменшує вплив швидкості потоку пульпи на результат вимірювання. Запропоновано нову схему побудови ротаційного концентратоміра паперової пульпи з кращими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

3. Розроблено та досліджено математичну модель ротаційного концентратоміра паперової пульпи та його складових, створено методику перерахунку відомих експериментальних даних для корекції функції перетворення розробленого концентратоміра, що зменшує затрати на періодичне градування приладів у виробничих умовах. Запропоновано алгоритм опрацювання результатів вимірювань, який дозволяє зменшити вплив моментів сил тертя в ущільненнях та у підшипниках вимірювальної осі концентратоміра на отримане значення концентрації паперової пульпи. Сформовані напрямки подальшого розвитку механічного методу для побудови ротаційних концентратомірів паперової пульпи, які передбачають модифікацію керування рухом чутливих елементів, що дозволить компенсувати вплив неінформативних параметрів та покращити їх метрологічні характеристики.

4. Запропоновано спосіб опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра та одержані аналітичні співвідношення для опрацювання цього сигналу. Запропонований спосіб опрацювання сигналу від оптичного давача забезпечує найменше відносне середньоквадратичне відхилення результатів цього вимірювання.

5. Запропоновано застосовувати магнітоелектричний метод компенсації моменту в'язкісного тертя в ротаційних концентратомірах паперової пульпи, який має кращу відтворюваність статичної характеристики, що дозволяє підвищити точність вимірювання на початку діапазону вимірювання і мінімізувати вплив ущільнення вала з чутливим елементом на результат вимірювання.

6. Вперше уніфіковано вигляд градувальних характеристик для ротаційних та лопаткових концентратомірів паперової пульпи за рахунок компенсаційного вимірювання моменту в'язкісного тертя паперової пульпи магнітоелектричними перетворювачами і дотримання однакових заданих швидкостей зсуву паперової пульпи, що дозволило уніфікувати алгоритми опрацювання інформації мікропроцесорними засобами.

7. Вперше запропоновано керувати рухом чутливого елемента лопаткового концентратоміра паперової пульпи за сигналом від генератора імпульсів трикутної форми, що дозволяє забезпечити задану швидкість зсуву паперової пульпи при вимірюванні і тим самим підвищити точність вимірювання моменту в'язкісного тертя.

8. Розроблено та досліджено математичну модель лопаткового концентратоміра паперової пульпи та створено методику перерахунку відомих експериментальних даних для корекції функції перетворення розробленого концентратоміра, що зменшує затрати на періодичне градування приладів у виробничих умовах. Запропоновано новий порядок проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою лопаткового концентратоміра з активною лопаткою із проведенням вимірювання

моменту сили зсуву при постійному програмно встановлюваному значенні швидкості зсуву та алгоритм визначення концентрації паперової пульпи на його основі, який зменшує вплив швидкості течії паперової пульпи на визначене значення її концентрації.

9. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій (АВКТ) НУ «Львівська політехніка» при викладанні курсу “Метрологія, технологічні вимірювання та прилади, частина 2”.

#### СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Oleksandr Romaniuk, Bohdan Kril', Oleksandr Kril'. Algorithmic Method of Precision Enhancement of the Paper Pulp Blade Consistometer // ENERGY ENGINEERING AND CONTROL SYSTEMS. 2016. Vol.2. № 1. P.25 – 31. *Здобувачем проаналізовано алгоритмічний метод підвищення точності концентратомірів паперової пульпи з активною лопаткою, у якому вимірюється сила струму через навитку магнітоелектричного перетворювача в усталеному режимі під час руху вимірювальної лопатки за течією та назустріч течії паперової пульпи.*
2. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Алгоритмічний метод підвищення точності лопаткових концентратомірів паперової маси // Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ. 2017. №1 (38), С.28-33. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. (входить до переліку наукових фахових видань України № 1-05/5 від 18.11.2009р.) *Здобувачем запропоновано метод підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи лопатковим концентратоміром, у якому вимірюють силу струму через навитку магнітоелектричного перетворювача при усталеному режимі руху лопатки за течією та назустріч течії пульпи.*
3. Romaniuk O.M., Kril V.A., Kril O.V., Krykh H.V. Rotational paper pulp viscometer with measurement at two shear speeds. // Scientific Bulletin of UNFU. 2017. Vol. 27. № 6. P. 172 – 177. (входить до наукометричної бази Index Copernicus) DOI: 10.15421/40270635 *Здобувачем запропоновано спосіб вимірювання ефективної в'язкості, коефіцієнта консистенції та індексу течії у законі Оствальда де Веле ньютонівських рідин за допомогою ротаційного концентратоміра, спосіб усунення впливу моментів сил тертя в ущільненнях та підшипниках на результати вимірювань.*
4. Романюк О. М., Крих Г.Б., Кріль Б. А., Кріль О. В. Удосконалення ротаційного віскозиметра для вимірювання концентрації паперової маси // Методи та прилади контролю якості. 2017. №2 (39). С.47-54. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України (№ 1-05/5 від 18.11.2009р., галузь науки, спеціальність – технічні) *Здобувачем запропоновано вимірювати момент сили, що діє на чутливий елемент при наближенні до двох наперед заданих частот обертання чутливого елемента зі сторони нижчих та вищих частот. Запропоновано алгоритми зміни частоти обертання, та спосіб їх реалізації за допомогою частотного перетворювача.*
5. Y. Pistun, B. Kril, O. Romaniuk, O. Kril. Investigation of sensor for measurement of rotation angle of sensitive element in rotational paper pulp consistometer // Energy Engineering and Control Systems. 2017. Vol.3. № 2. P.73–80. URL:

<https://doi.org/10.23939/jeeecs2017.02.073> *Здобувачем запропоновано конструкцію оптичного давача кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи компенсаційного типу та спосіб опрацювання отриманої інформації.*

6. Романюк О.М., Кріль Б.А. Розробка ротаційного віскозиметра для вимірювання концентрації паперової маси // 5-а науково-практична конференція студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (24–25 листопада 2015р. Івано-Франківськ). Збірник тез доповідей. Івано-Франківськ, 2015. С. 172–174. *Здобувачем запропонована структурна схема ротаційного концентратоміра з двома обертовими елементами – пропелером та імпелером, з вимірюванням моменту сили зсуву, що діє на імпелер при двох різних значеннях швидкості зсуву, та при обертанні пропелера у прямому та реверсному напрямках.*

7. Romaniuk O., Kril' B. Development of Analyzer for Paper Stock Concentration Measurement // Proceeding of 5-th International academic conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2015” (EPECS-2015). (November 26-28, 2015, Lviv). Lviv. 2015. P.168-169. *Здобувачем запропоновано спосіб підвищення точності вимірювань концентрації паперової пульпи ротаційним концентратоміром, та структурну схему розробленого концентратоміра.*

8. Романюк О.М., Кріль Б.А. Підвищення точності ротаційних віскозиметрів алгоритмічним шляхом // Матеріали II Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (25 листопада 2015р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2015 р. С.71–72. *Здобувачем запропоновано алгоритми зміни частоти обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра, які дозволяють усунути вплив гістерезису пружного елемента концентратоміра, та моментів сил тертя в ущільненнях чутливого елемента на вимірне значення концентрації пульпи.*

9. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Потоківі концентратоміри паперової маси з компенсацією впливу швидкості середовища // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (17–18 травня 2016 р., Київ). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. Київ, 2016. С.112. *Здобувачем запропоновано спосіб зменшення похибки вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційним концентратоміром вимірюючи момент сили в'язкого тертя для двох обраних частот обертання чутливого елемента, та з повторюючи вимірювання для прямого та реверсного напрямів обертання чутливого елемента.*

10. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В., Кокошко Р.В. Підвищення точності вимірювання лопаткових концентратомірів паперової пульпи алгоритмічним методом // Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне, та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (23 листопада 2016р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2016. С.80-81. *Здобувачем запропоновано використати сліdkуючу систему керування, котра забезпечує вимірювання концентрації при русі лопатки за течією, та назустріч течії пульпи.*

11. Oleksandr Romaniuk, Bohdan Kril' Danylo Kril', Roman Kokoshko. Algorithmic Method of Precision Enhancement of Paper Blade Consistometer // Proceedings of 6-th International Academic Conference "Electric Power Engineering & Control Systems 2016" (EPECS-2016). (November 24-26, 2016, Lviv). Lviv. 2016. P.205–206. *Здобувачем запропоновано блок-схему концентратоміра, який реалізує алгоритмічний метод підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи.*
12. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Лопатковий концентратомір паперової пульпи із зменшеним впливом швидкості на процес вимірювання // IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2017 (АКІТ – 2017)» (19-20 квітня 2017р., Київ). Матеріали конференції. НТУУ «КПІ». 2017. С.162–163. *Здобувачем описана конструкція та принцип дії вдосконаленого концентратоміра з активною лопаткою.*
13. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Зменшення впливу швидкості потоку паперової пульпи на процес вимірювання концентрації лопатковими концентратомірами // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (16–17 травня 2017 р., Київ). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПФФ. Київ, 2017. С.99 – 100. *Здобувачем запропонована схема та описано принцип дії лопаткового концентратоміра з активною лопаткою, яка повертається у потоці паперової пульпи на невеликий кут за допомогою осі,*
14. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Вдосконалення механічних концентратомірів паперової пульпи // IV міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)» (31 жовтня – 02 листопада 2017 р., Вінниця). Матеріали конференції. Вінниця, 2017. С.114–115. *Здобувачем запропоновано конструкції вдосконалених концентратомірів ротаційного та лопаткового типів, які дозволяють вимірювання при однакових значеннях швидкості зсуву, що дозволяє уніфікувати градувальні залежності для різних типів пульпи, та залежності для температурної компенсації.*
15. Romaniuk O., Kril' B., Kril' O. Improvement of the Mechanical Consistometers for Paper pulp // Proceedings of 7-th International Academic Conference "Electric Power Engineering & Control Systems 2017" (EPECS-2017). (November 23-25, 2017, Lviv). Lviv. 2017. P.186-187. *Здобувачем запропоновано конструкції вдосконалених концентратомірів з покращеними метрологічними характеристиками та зменшеним впливом швидкості течії пульпи, моментів сил тертя в ущільненнях та підшипниках чутливої осі на виміряне значення концентрації пульпи.*
16. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження ротаційного концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією // 8-ма науково-технічна конференція "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання". (14 – 16 листопада 2017р. Івано-Франківськ). ІФНТУНГ. Івано-Франківськ. 2017. С.173–175. *Здобувачем запропоновано конструкцію вдосконаленого концентратоміра паперової пульпи ротаційного типу з магнітоелектричним компенсатором.*
17. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра

паперової пульпи // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», (22 листопада 2017р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2017р. С.82–83. *Здобувачем запропоновано конструкцію та досліджено функціонування блоку опрацювання інформації давача кута повороту чутливого елемента концентратоміра.*

18. Пат. на винахід №119899 Україна, МПК G01 N 11/10, G01 N 15/06, G01 N 33/34, G05 D 24/02. Пристрій для вимірювання концентрації паперової маси/ Кріль Б.А., Кріль О.В., Романюк О.М.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». - №а201708172; заявл. 07.08.2017; опубліковано 27.08.2019, Бюл. № 16. - 4 с.: іл. *Здобувачем запропонований вдосконалений пристрій для вимірювання концентрації паперової маси.*

### АНОТАЦІЯ

**Романюк О.М. Вдосконалення механічних методів вимірювання концентрації паперової пульпи.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади та методи контролю і визначення складу речовин. – Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2020.

Дисертація присвячена питанням забезпечення інваріантності механічних концентратомірів паперової пульпи до наявних неінформативних параметрів шляхом управління рухом чутливих елементів механічних концентратомірів так, щоб усунути вплив неінформативних параметрів та покращити метрологічні характеристики концентратомірів, що дозволить підвищити точність вимірювання.

Запропоновано вимірювати момент сил зсуву, який діє на чутливий елемент ротаційного концентратоміра при його обертанні по черзі на двох попередньо заданих частотах, з повторенням вимірювань при зміні напрямку обертання чутливого елемента на зворотний, автоматизовану систему реєстрації та опрацювання результатів вимірювань та систему керування рухом чутливого елемента.

Запропоновано спосіб керування лопатковим концентратоміром із активною лопаткою та автоматизовану систему керування рухом лопатки, яка забезпечує сталу швидкість зсуву паперової пульпи. Це дозволяє використати калібрувальні графіки та поправки, які компенсують вплив зміни температури, тиску і типу паперової пульпи ідентичні до використовуваних при роботі ротаційних концентратомірів, та зменшити вплив швидкості течії паперової пульпи на визначене значення її концентрації. Запропоновано алгоритми опрацювання отриманих результатів, які забезпечують зменшення похибок при вимірюванні концентрації паперової пульпи.

*Ключові слова:* неньютонівські рідини, вимірювання в'язкості, коефіцієнт консистенції, індекс течії, ефективна в'язкість, вимірювання концентрації паперової пульпи, вимірювання в'язкості, ротаційний концентратомір, лопатковий концентратомір.

### АННОТАЦИЯ

**Романюк А.Н. Усовершенствование механических методов измерения концентрации бумажной массы.** – На правах рукописи.



Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2020г.

Диссертация посвящена вопросам обеспечения инвариантности механических концентратомеров бумажной пульпы к существующим неинформативным параметрам путем управления движением чувствительных элементов механических концентратомеров, чтобы устранить влияние неинформативных параметров и улучшить метрологические характеристики концентратомеров, что позволит повысить точность измерения.

Предложено измерять момент силы сдвига, действующий на чувствительный элемент ротационного измерителя концентрации при его вращении по очереди на двух предварительно заданных частотах вращения, с последующим повторением изменений при вращении чувствительного элемента в обратном направлении, автоматизированную систему управления вращением чувствительного элемента, и систему регистрации и обработки результатов измерений.

Предложены способ управления лопаточным измерителем концентрации с активной лопаткой и автоматизированная система управления движения лопатки, обеспечивающая движение лопатки в потоке бумажной массы с постоянной скоростью сдвига. Это позволяет использовать калибровочные графики и поправки, компенсирующие влияние изменений температуры, давления и типа бумажной массы идентичные используемым при работе ротационных измерителей концентрации, а также уменьшить влияние скорости течения бумажной массы на измеренное значение концентрации бумажной массы. Предложены способы организации процесса измерений и алгоритмы обработки полученных результатов, которые обеспечивают уменьшение погрешностей при определении концентрации бумажной массы.

*Ключевые слова:* неньютоновские жидкости, измерение вязкости, коэффициент консистенции, коэффициент густоты потока, показатель поведения жидкости, кажущаяся вязкость, измерение концентрации бумажной массы, ротационный измеритель концентрации бумажной массы, лопаточный измеритель концентрации бумажной массы.

## ABSTRACT

**Romaniuk O.M. The improvement of the mechanical method of the paper pulp consistency measurements.** – On rights of a manuscript.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in speciality 05.11.13 – “Devices and Methods of Control and Determination of Substance Composition” – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

The thesis is devoted to the problem of the enhancement of the paper pulp consistency measurements precision by rotational and active blade-type consistometers.

It has been proved that accuracy of the paper pulp consistency measurements in case of rotational consistometer can be increased by measuring of the share stress torque at two predetermined frequencies of the sensitive element rotation, and following repeating of the share stress torque measurements for alternative rotation direction. By averaging of the share stress torque values measured at one frequency of the sensitive element rotation in clockwise and anticlockwise directions, and following algorithmic processing of the obtained data it is

possible to eliminate the effect of the asymmetry of the paper pulp flow velocity distribution in the vicinity of consistometer rotating sensitive element.

Modern paper pulp rotational consistometers use compensation-measuring method, where the share stress torque is compensated by the torque, produced by electromagnetic transducer, controlled by electric current, or by specially designed electric motor.

We proposed to use the magnetoelectric transducer of the share stress torque instead of the electromagnetic transducer because it has a linear relationship between the current and the torque produced. Another important property of the developed magnetoelectric transducer consists in the fact that it can operate at any rotation direction of sensitive element, while available electromagnetic transducers can operate only for one rotation direction and do not support rotation in the opposite one.

As information parameter serves the strength of current in the magnetoelectric transducer winding in the moment, when the frequency of the sensitive element rotation come up to one of the two predetermined values  $f_1$  or  $f_2$  in turn from the side of the lower frequencies and from the side of the higher frequencies.

The standard optical mount for the torque compensation monitoring is connected with designed equipment for precision output signal processing providing higher precision and repeatability of the paper pulp consistency measurements. Signals are processed by programmable logic controller Siemens Simatic S7.

The method of the active blade control in the paper pulp consistometer, and the automatic control system for supplying blade motion in the paper pulp flow providing constant share rate are presented.

The application of the modified (improved) active blade consistometer allows to use the calibration and temperature, pressure, and paper pulp type corrections identical to those used for rotational consistometers, and to reduce the influence of the paper pulp flow velocity on the measured value of paper pulp consistency.

The analysis of the factors affecting on the formation of the stored error of the paper pulp consistency measurement by rotational and active blade consistometers is done. The measurement process arrangement and the algorithm of obtained data processing are proposed, providing the reducing of the error of the paper pulp consistency measurement.

*Keywords:* paper pulp, non-Newtonian liquids, paper pulp consistency measurements, rotational viscometer, rotational consistometer, active blade consistometer, flow consistency index, flow behavior index, apparent viscosity.