

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ПОШУКУ МАКСИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

*Вказано на переваги застосування методу вимірювання повного фазового зсуву (ПФЗ) для вимірювання динамічної в'язкості (ДВ) ротаційним віскозиметром (РВ). Запропоновано математичну модель для опису процесу знаходження максимуму повного фазового зсуву за допомогою засобу пошуку екстремальних значень для РВ. Розроблено алгоритм роботи засобу пошуку екстремальних значень в ротаційному віскозиметрі, у відповідності до якого процес пошуку максимального значення повного фазового зсуву зводиться до постійного його вимірювання і порівняння з попереднім. На основі математичної моделі та алгоритму розроблено засіб пошуку екстремальних значень ПФЗ для РВ, що базується на принципі пошуку максимального значення ПФЗ шляхом порівняння виміряного значення ПФЗ з попереднім значенням і дозволяє з точністю до  $T_0$  встановлювати час вимірювання ДВ розробленим РВ.*

**Ключові слова:** динамічна в'язкість, повний фазовий зсув, ротаційний віскозиметр, екстрематор.

V.S. PETRUSHAK

Khmelnitskyi National University

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MEANS OF SEARCHING MAXIMUM VALUES FOR MEASURING EQUIPMENT

**Abstract.** Most of the manufacturers of modern rotary viscometers are foreign firms, such as HAAKE and Brookfield. In most of them the improvement of the characteristics is achieved by reducing the parasitic parameters: friction in the mechanical system, not the linearity of the torsion characteristic, electromagnetic motions in the electrical circuit; and an increase in parameters such as: sensor reduction factor, number of electrical circuits. In most cases, this will increase the cost of rotational viscometers, apply them only to a single group of substances and use qualified service personnel. The use of the latest phase-shift methods and principles of full-phase shift measurement in rotary viscometers makes it possible to create versatile devices with extended dynamic range, high accuracy and high degree of automation. The development of a means of increasing the accuracy in a rotational viscometer based on the phase frequency method is due to the need for accurate registration of torques, which makes it possible to study various characteristics of the substance without distorting the measurement results. The problem of measuring the rheological characteristics of a substance is relevant in a wide range of measurement problems, so the search for new methods, the analysis of their errors and the development of means of improving accuracy in rotational viscometers based on the phase frequency method, is promising and has scientific significance and practical value. The advantages of using the full phase shift method for dynamic viscosity measurement with a rotary viscometer are indicated. A mathematical model is proposed to describe the process of finding the maximum of the total phase shift by means of the extreme value finder for rotary viscometer. The algorithm of operation of the tool of search of extreme values in the rotary viscometer is developed, in accordance with which the process of finding the maximum value of the full phase shift is reduced to its constant measurement and comparison with the previous one. On the basis of mathematical model and algorithm a tool for finding extreme full phase shift values for rotary viscometer is developed, based on the principle of finding the maximum full phase shift value by comparing the measured full phase shift value with the previous value and allows to set the measurement time of the developed rotary viscometer with accuracy up to  $T_0$ .

**Keywords:** dynamic viscosity, full phase shift, rotary viscometer, extremator.

### Вступ

Вимірювання реологічних характеристик пов'язане з такими галузями виробництва, як нафтова, металургійна, медична та хімічна промисловості. За результатами дослідження реологічних характеристик рідини можна зробити певні висновки щодо її складу і поведінки за певних умов. Зокрема можна зробити аналіз крові, спинномозкової рідини, що дало б уявлення про однорідність, склад рідини і навіть зробити певні висновки про стан здоров'я людини.

У лакофарбовій промисловості вимірювання реологічних характеристик речовин надає можливість визначення їх стану: густого або рідкого. Текучість має важливе значення під час нанесення лакофарбового матеріалу на виріб. Саме від цього параметру залежить якість покриття та кількість витраченого матеріалу.

Найефективнішим серед методів вимірювання реологічних характеристик являється капілярний метод, коли вимірюють час протікання певного об'єму рідини через трубку визначеного діаметра. Даний метод ефективний для багатьох типів речовин з низькою в'язкістю. Під час дослідження речовин з високою в'язкістю, таких як фарба, капілярний метод є неефективним, оскільки час протікання рідини досить великий і спостерігаються різноманітні паразитні явища, також він не дозволяє вимірювати динамічні реологічні характеристики. В таких випадках доцільним є застосування ротаційного методу з торсіометричним перетворювачем, що базується на визначенні кута закручування торсіона, який прямо пропорційний реологічним характеристикам речовини [1].

Застосування фазочастотного методу у різноманітних галузях науки та техніки досить широке. Це зумовлено високими метрологічними характеристиками і інформаційною ємністю таких параметрів, як кут фазового зсуву (КФЗ) –  $\varphi$  та частота сигналу –  $f$ . Завдяки цьому частотні та фазові вимірювання завжди використовувались в наукових дослідженнях різних галузей науки і техніки, де первинний інформаційний параметр намагаються перетворити на частоту або фазу електричного сигналу, які забезпечують найвищий рівень точності вимірювань у порівнянні з амплітудними методами.

Використання в ротаційних віскозиметрах (РВ) теорії фазочастотних вимірювань і перетворень

дозволяє створити універсальні прилади з високою точністю, розширеним динамічним діапазоном та високим ступенем автоматизації [2].

### Постановка завдання

Під час контролю реологічних характеристик за допомогою ротаційного віскозиметра користуються таким відомим способом, як використання торсіонів з низькою жорсткістю, оскільки при цьому легко визначати найменші зміни реологічних характеристик. Разом з тим характеристики (крім залежності екстремальних і встановлених значень напружень зсуву від швидкості деформації), отримані за методом  $\omega = \text{const}$ , на ротаційних віскозиметрах з м'якими торсіонами мають тільки якісне значення і в деяких випадках здатні повністю спотворити результати вимірювань. Використання ж торсіонів з високою жорсткістю потребує дуже точних схем реєстрації крутних моментів.

Серед виробників сучасних ротаційних віскозиметрів здебільшого закордонні фірми, це такі відомі фірми, як HAAKE та Brookfield. В більшості з них покращення характеристик досягається шляхом зменшення паразитних параметрів (тертя в механічній системі, не лінійності характеристики торсіону, електромагнітних наведень в електричній схемі) та збільшення параметрів: коефіцієнт редукції сенсорів, кількості розрядів електричної схеми. В більшості випадків це призводить до збільшення собівартості ротаційних віскозиметрів, застосування їх тільки для окремої групи речовин і використання кваліфікованого обслуговуючого персоналу. Застосування в ротаційних віскозиметрах новітніх фазочастотних методів та принципів вимірювання повного фазового зсуву дозволяє створити універсальні прилади із розширеним динамічним діапазоном, високою точністю та високим ступенем автоматизації. Розробка засобу підвищення точності в ротаційному віскозиметрі на базі фазочастотного методу зумовлена необхідністю точної реєстрації крутних моментів, що дає можливість дослідження різноманітних характеристик речовини без спотворення результатів вимірювань. Проблема вимірювання реологічних характеристик речовини є актуальною в широкому колі вимірювальних задач, тому пошук нових методів, аналіз їх похибок та розробка засобів підвищення точності в ротаційних віскозиметрах на базі фазочастотного методу, є перспективною і має наукову значимість і практичну цінність.

### Результати дослідження

Для РВ, що розробляється [3], необхідно, щоб цифровий фазометр миттєвих значень (ЦФМЗ) запускався, коли надійде сигнал дозволу з частотного компаратора, а процес визначення реологічних характеристик (РХ) закінчувався, коли буде знайдене значення миттєвого фазового зсуву. Найпростішим пристроєм, що може виконувати такі функції, є засіб пошуку екстремальних значень. Принцип роботи засобу пошуку екстремальних значень полягає в пошуку максимального значення повного фазового зсуву. Це необхідно для точної установки часу вимірювання та підвищення швидкодії ротаційних віскозиметрів.

Алгоритм роботи засобу пошуку екстремальних значень в перетворювачі амплітуди періодичного сигналу в код методом послідовного наближення представлений на рис. 1. Процес пошуку максимального значення повного фазового зсуву зводиться до постійного його вимірювання і порівняння з попереднім. Причому вимірювання повного фазового зсуву відбувається до моменту закручування торсіона на певний кут  $\alpha$ . Цей момент і буде максимумом повного фазового зсуву, який буде зафіксовано засобом пошуку екстремальних значень.

Математично процес знаходження максимуму повного фазового зсуву за допомогою засобу пошуку екстремальних значень для РВ можна представити виразом:

$$\Delta\Psi(t) = \text{MAX} \left\{ \Delta\Psi_0 + \sum_{i=0}^k \Delta\Psi_i(t) + \xi_j(\Delta\Psi_j) \right\}, \quad (1)$$

де  $\Delta\Psi_0$  – початковий фазовий зсув;

$\sum_{i=0}^k \Delta\Psi_i(t)$  – сума фазових зсувів на  $i$ -х часових проміжках;

$\xi_j(\Delta\Psi_j)$  – похибка визначення фазового зсуву на  $j$ -му інтервалі часу,  $j = \overline{0, 1, 2 \dots k}$ .

Відповідно цей вираз і буде математичною моделлю, що описує принцип роботи засобу пошуку екстремальних значень в РВ. Також можна зауважити, що такий екстрематор працюватиме з меншим часом визначення фазового зсуву ніж будь-який інший засіб пошуку середніх значень. Мінімальний час пошуку екстремального значення, за умови повної ідентичності сенсорів і максимальної стабільності частоти складатиме  $2T_0$ .

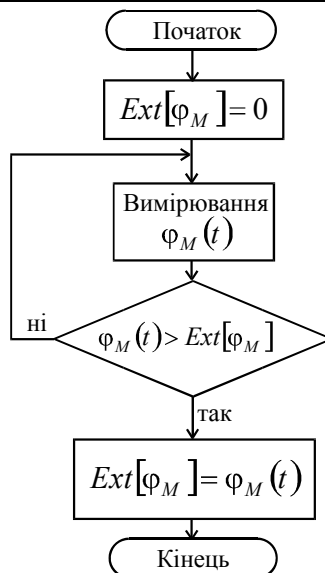


Рис. 1. Алгоритм роботи засобу пошуку екстремальних значень в ротаційному віскозиметрі

На рис. 2 представлена структурна схема засобу пошуку екстремальних значень для ротаційного віскозиметра, яка працює за алгоритмом, представленим на рис. 1, а процес пошуку максимального значення повного фазового зсуву можна описати виразом (1).

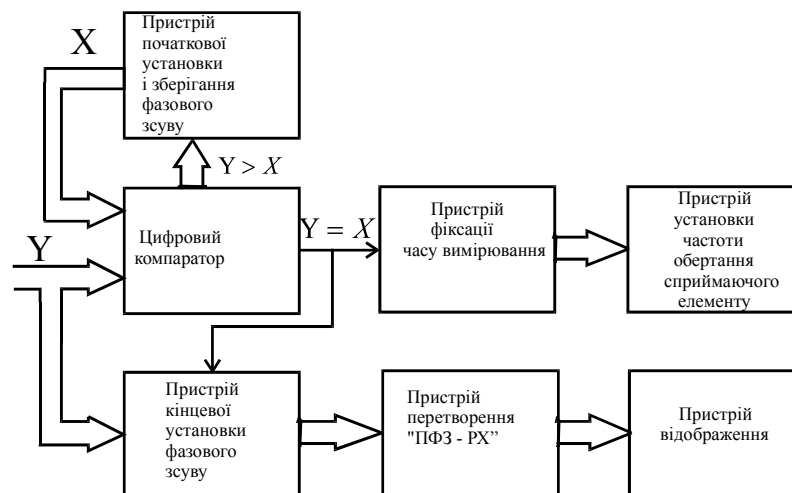


Рис. 2. Структурна схема засобу пошуку екстремальних значень для ротаційного віскозиметра

Робота екстрематора (рис. 2) відбувається за наступною схемою:

Цифровий сигнал з виходу фазочастотного перетворювача надходить на вхід цифрового компаратора.

З пристрою початкової установки і зберігання фазового зсуву надходить початкове значення фазового зсуву рівне нулю у вигляді цифрового коду  $X$ .

Цифровий компаратор порівнює дві послідовності  $X$  і  $U$ .

У випадку, якщо послідовність  $X$  дорівнює послідовності  $Y$  одночасно надходить сигнал на пристрій фіксації часу вимірювання і пристрій кінцевої установки фазового зсуву.

З пристрою фіксації часу вимірювання надходить сигнал на пристрій установки частоти обертання, що в свою чергу зупиняє рух сприймаючого елемента.

З пристрою кінцевої установки цифрова послідовність  $Y$  надходить на пристрій перетворення "ПФЗ - РХ", де значення повного фазового зсуву перетворюється в значення реологічної характеристики.

В разі, якщо послідовність  $Y$  більше послідовності  $X$ , то проходить зміна попереднього значення  $X$  на прийняте  $Y$  і збереження послідовності у вигляді  $X$ . Процес пошуку максимуму повторюється доти, доки цифрова послідовність  $Y$  не дорівнюватиме цифровій послідовності  $X$ . Після чого буде знайдено максимум повного фазового зсуву і перетворено в значення реологічної характеристики.

Принцип роботи засобу пошуку екстремальних значень дещо відрізняється від роботи фазового компаратора, описаного в [4]. Фазові компаратори призначені для порівняння двох фазових зсувів, а засіб пошуку екстремальних значень — для порівняння з попереднім і визначення максимального значення повного фазового зсуву. На рис. 3 зображено функціональну схему засобу пошуку екстремальних значень, яка складається з буферного регістра 1, схеми порівняння 2, формувача 3.

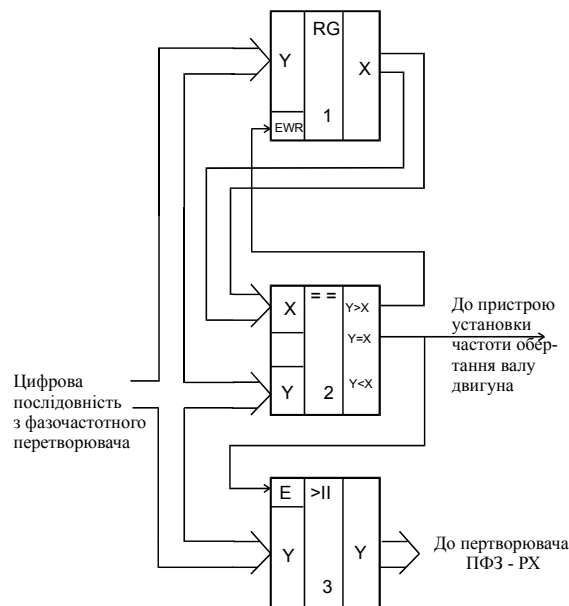


Рис. 3. Функціональна схема засобу пошуку екстремальних значень

На схему порівняння постійно надходить цифрова послідовність з фазового перетворювача. При наявності нуля на вході R на його виході будуть всі нулі. При наявності в'язкого тертя перше число, яке надійде, прийде на вхід схеми порівняння буде більше за нуль, тому на виході  $Y>X$  схеми порівняння стане високий рівень, який надійде на вхід дозволу запису буферного регістра і на його виході буде значення записаного числа. Ця послідовність операцій буде повторюватись доти, доки значення повного фазового зсуву, яке буде надходити на вхід схеми порівняння не дорівнюватиме попередньому значенню повного фазового зсуву, тобто:

$$Y_i = Y_{i-1}. \quad (2)$$

При виконанні умови (2) на виході  $Y=X$  буде сформовано сигнал логічної одиниці, який надійде на вхід дозволу передачі інформації формувача 3 і максимальне значення повного фазового зсуву з його виходу надійде на вхід перетворювача "ПФЗ - РХ". Також сигнал з виходу  $Y=X$  схеми порівняння надійде на пристрій установки частоти обертання валу двигуна, і процес вимірювання РХ на заданій частоті буде зупинено.

Процес знаходження максимального значення повного фазового зсуву за допомогою засобу пошуку екстремальних значень, представленого на рис. 3, характеризується часом затримки, який визначається за формулою:

$$t_3 = \sum_{i=1}^k t_{zi} + T_0, \quad (3)$$

де  $t_{zi}$  – час затримки на  $i$ -й операції пошуку максимального значення повного фазового зсуву.

Повний час вимірювання РХ за допомогою розробленого РВ на частоті обертання валу двигуна  $\omega_0$  буде визначатись за співвідношенням:

$$t_k = t_2 + \sum_{i=1}^k t_{zi} + T_0 \quad (4)$$

Для знаходження сумарного часу затримки на  $i$ -й операції, необхідно розглянути останній цикл знаходження максимального значення повного фазового зсуву, який буде складатись з наступних операцій:

Зчитування наступного значення  $Y_i$ .

Порівняння значення  $Y_{i-1}$  зі значенням  $Y_i$  за допомогою схеми порівняння.

Запис значення  $Y_i$  в буферний регістр.

Зчитування наступного значення  $Y_{i+1}$ .

Порівняння значення  $Y_i$  зі значенням  $Y_{i+1}$ .

Установка високого рівня на вході E формувача.

Передача даних  $Y_{i+1}$  з входу передавача на його вихід.

Для 555 серії час апаратної затримки обробки інформації за всіма семи пунктами буде складати приблизно 1 мкс і майже не впливатиме на значення часу вимірювання РХ. Відповідно можна прийняти, що

$$\sum_{i=1}^k t_{zi} = 0. \quad (5)$$

Тоді час вимірювання РХ буде визначатись за формулою:

$$t_k = t_2 + T_0. \quad (6)$$

Тобто час вимірювання залежить від частоти обертання валу двигуна  $\omega_0$  і часу, протягом якого відбувається зміна повного фазового зсуву. Часові діаграми роботи екстрематора представлено на рис. 4.

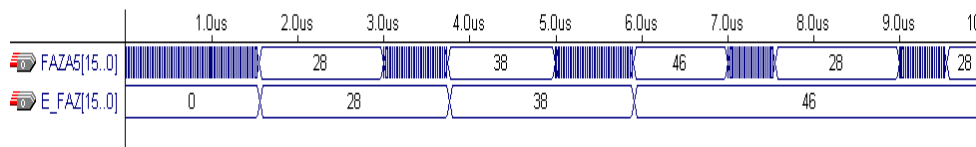


Рис. 4. Часові діаграми роботи екстрематора

З рис. 4 видно, що коли виміряне значення фазового зсуву більше встановленого значення фазового зсуву на виході екстрематора, то на його виході E\_FAZ[15..0] встановлюється виміряне значення фазового зсуву, якщо виміряне значення фазового зсуву менше встановленого значення фазового зсуву на виході екстрематора, то на його виході E\_FAZ[15..0] значення фазового зсуву не змінюється.

Застосування такого екстрематора у вимірвальній техніці дозволить зменшити об'єм цифрової схеми (кількість тригерів для програмованої інтегральної схеми) та покращити швидкість процесу обробки результатів.

### Висновки

Запропоновано математичну модель для опису процесу знаходження максимуму повного фазового зсуву за допомогою засобу пошуку екстремальних значень для РВ.

Розроблено алгоритм роботи засобу пошуку екстремальних значень в ротаційному віскозиметрі, у відповідності до якого процес пошуку максимального значення повного фазового зсуву зводиться до постійного його вимірювання і порівняння з попереднім.

На основі математичної моделі та алгоритму розроблено засіб пошуку екстремальних значень ПФЗ для РВ, що базується на принципі пошуку максимального значення ПФЗ шляхом порівняння виміряного значення ПФЗ з попереднім значенням і дозволяє з точністю до  $T_0$  встановлювати час вимірювання РХ розробленим РВ.

### Література

1. Петрушак В. С. Аналіз методів та засобів визначення та контролю динамічної в'язкості речовини / В. С. Петрушак, О. М. Петрушак // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 1. – С. 68–71.
2. Петрушак В. С. Фазочастотне представлення вимірювань в'язкості ротаційним віскозиметром з торсіометричним перетворювачем / В. С. Петрушак // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 4. – С. 87–90.
3. Петрушак В. С. Фазочастотний метод вимірювання реологічних характеристик в ротаційному віскозиметрі / В. С. Петрушак, О.М. Водяний // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 5. – С. 167–171.
4. Патент США 4322643, МКИ H03D 13/00. Digital phase comparator with improved sensitivity for small phase differences / Preslar D.R. – № 06/144053. – Заявл. 28.04.1980 ; опубл. 30.03.1982.

### References

1. Petrushak V. S. Analiz metodiv ta zasobiv vyznachennia ta kontroliu dynamichnoi v'iazkosti rechovyny / V.S. Petrushak, O.M. Petrushak // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2001. – № 1. – S. 68–71.
2. Petrushak V. S. Fazochastotne predstavlennia vymiriuvan v'iazkosti rotatsiinym viskozimetrom z torsiometrychnym peretvoriuvachem / V. S. Petrushak // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2000. – № 4. – S. 87–90.
3. Petrushak V. S. Fazochastotnyi metod vymiriuvannia reolohichnykh kharakterystyk v rotatsiinomu viskozimetri / V. S. Petrushak, O.M. Vodiani // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – № 5. – S. 167–171.
4. Patent SShA 4322643, MKY H03D 13/00. Digital phase comparator with improved sensitivity for small phase differences / Preslar D.R. – № 06/144053. – Zaiavl. 28.04.1980 ; opubl. 30.03.1982.

Рецензія/Peer review : 02.06.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. С.К. Підченко