

**ФАЗОЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК В РОТАЦІЙНОМУ ВІСКОЗИМЕТРІ**

В роботі розроблено математичну модель, яка описує процес вимірювання реологічних характеристик (РХ) ротаційним віскозиметром (РВ), що дає можливість їх визначення через значення повного фазового зсуву (ПФЗ), виміряне фазочастотним перетворювачем, та значення частоти обертання сприймаючого елемента, задане оператором. На основі математичної моделі створений алгоритм процесу вимірювання РХ розробленим РВ, що дає можливість розробити новий клас РВ і підвищити точність вимірювання РХ речовин, в яких відсутній ефект релаксації і післядії.

Ключові слова: динамічна в'язкість, кут фазового зсуву, повний фазовий зсув, ротаційний віскозиметр, реологічна характеристика, фазовий цикл, фазочастотний перетворювач.

V.S. PETRUSHAK, O.M. VODYANIY
Khmelnitsky National University

**PHASE-FREQUENCY METHODS OF MEASURING RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS IN ROTARY
VISCOMETER**

In the article the mathematical model that describes the process of measuring the rheological characteristics rotary viscometer, which enables them to determine because of the full phase shift measured phase-frequency converter and the frequency of rotation perceiving the element set by the operator. Based on a mathematical model created algorithm of measuring rheological characteristics designed rotary viscometer that makes it possible to develop a new class of rotary viscometers and improve measurement accuracy rheological characteristics of materials in which there is no effect and after-effect relaxation.

Keywords: angle of phase shift, complete phase shift, dynamic viscosity, rotary viscometer, rheological characteristic, phase cycle, phase-frequency converter.

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. 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) – φ 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 [1] теорії фазочастотних вимірювань і перетворень дозволяє створити універсальні прилади з високою точністю, розширеним динамічним діапазоном та високим ступенем автоматизації.

Експериментальна частина

В основу ротаційного віскозиметра з фазочастотним перетворенням інформативного параметру [2] покладено вимірювання повного фазового зсуву за інтервал часу рівний часу розгортки кута закручування торсіону відносно корпусу і перетворенні вимірюваного фазового зсуву у відповідне значення реологічної характеристики рідини. Структурна модель такого ротаційного віскозиметра зображена на рис. 1.

Складається такий ротаційний віскозиметр з механічного перетворювача, який забезпечує перетворення реологічної характеристики у кут закручення торсіону з первинного перетворювача, що забезпечує перетворення значення кута закручення торсіону у електричний сигнал прямокутної форми; з фазочастотного перетворювача, який здійснює перетворення значення кута закручення торсіону у значення повного фазового зсуву; фіксатора часу вимірювання, що встановлює час вимірювання реологічної характеристики перетворювача "ПФЗ - РХ", який здійснює перетворення значення повного фазового зсуву у значення реологічної характеристики і відображення його на екрані монітору. Крім того до складу механічного перетворювача входить посудина з дослідною речовиною, сприймаючий елемент, торсіон, двигун.

Під дією в'язкісного опору дослідної речовини обертові рухи сприймаючого елемента зменшуються. Виникаючий крутний момент закручує торсіон, причому величина вимірюваної реологічної

характеристики пропорційна ступеню закручування торсіону або, що теж саме, зсуву фази між сигналами з сенсорів 1 і 2.

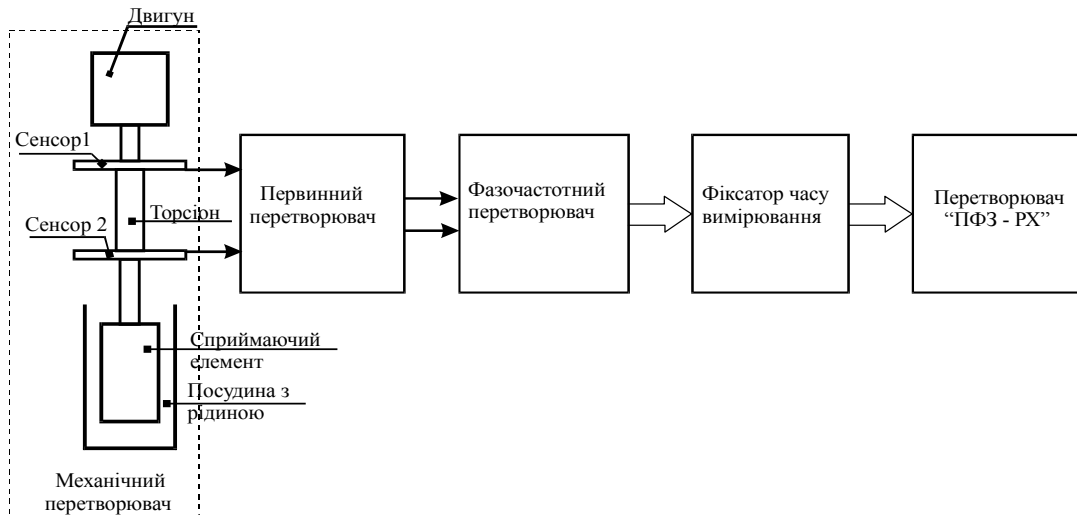


Рис. 1. Структурна модель ротаційного віскозиметра з фазочастотним перетворенням інформативного параметра

Величина зсуву фази між сигналами з сенсорів 1 та 2 визначається за допомогою фазового перетворювача. На виході фазового перетворювача маємо цифрову послідовність Y_i . За допомогою фіксатора часу вимірювання визначається максимальне значення фазового зсуву і встановлюється точний час вимірювання реологічної характеристики. Після чого відповідне значення фазового зсуву перетворюється у відповідне значення реологічної характеристики. Таким чином за час вимірювання, рівний часу розгортки торсіону, проводиться операція визначення фазового зсуву.

В даному випадку до математичної моделі такого ротаційного віскозиметра увійде математична модель, що описує двигун, математична модель, що описує торсіометричний перетворювач, математична модель, що описує процес вимірювання ПФЗ, математична модель, що описує процес обертання сприймаючого елемента і математична модель рідини, яка безпосередньо враховує її властивості. Якщо брати до уваги те, що в даному РВ використовується двигун постійного струму незалежного збудження, то його можна описати наступною системою диференціальних рівнянь [3]:

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L_{я}} \cdot u_d(t) - \frac{c}{L_{я}} \cdot \omega(t) - \frac{R_{я}}{L_{я}} \cdot i_d(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{c}{J} \cdot i(t) - \frac{1}{J} \cdot M_c, \end{cases} \quad (1)$$

де $i_d(t)$ – миттєве значення струму якорю;

$L_{я}$ – індуктивність якірного кола;

$u_d(t)$ – миттєве значення випрямленої напруги;

c – постійна двигуна;

$R_{я}$ – активний опір якірного кола;

$\omega(t)$ – миттєве значення швидкості обертання ротору двигуна;

M_c – момент двигуна.

Математична модель, що описує торсіометричний перетворювач може бути представлена як протидійний момент, зумовлений пружними властивостями торсіону:

$$M_T = -C[\varphi_M(t) - \varphi_{СП}(t)], \quad (2)$$

де C – пружність матеріалу з якого виготовлений торсіон;

$\varphi_M(t)$ – функція, що описує кут повороту двигуна, тобто верхнього кінця торсіону;

$\varphi_{СП}(t)$ – функція, що описує кут повороту сприймаючого елемента, тобто нижнього кінця торсіону.

Математична модель, що описує процес обертання сприймаючого елемента може бути задана співвідношенням:

$$M_{СП} = \frac{d^2\varphi_{СП}(t)}{dt^2} J, \quad (3)$$

де J – момент інерції сприймаючого елемента.

Математична модель рідини, яка безпосередньо враховує її властивості може бути представлена законом Ньютона для течії в'язкого середовища, якщо досліджується ньютонівська рідина.

Що стосується процесу вимірювання ПФЗ, то необхідно детально розглянути процес вимірювання РХ за допомогою РВ. У випадку, коли рідина в зазорі відсутня сприймаючий елемент обертається

синхронно з валом двигуна і кут закручення торсіону рівний нулю, а кутова швидкість оберту валу двигуна рівна $\omega_1(t)$ на інтервалі $(0; t_1)$, а на інтервалі $(t_1; \infty)$ кутова швидкість обертання валу двигуна буде постійною і рівною ω_0 .

Як правило, значення t_1 залежить від того, як швидко встановлюється кутова швидкість оберту валу двигуна і матиме різне значення t_1 для різних значень ω_0 , як це показано на рис. 2. Кутова швидкість оберту валу двигуна задається оператором під час вимірювання.

За інтервал часу $(0; t_1)$, коли в зазорі відсутня рідина фазовий зсув буде рівний нулю і відповідно значення реологічної характеристики також буде рівне нулю. У випадку наявності рідини в зазорі починається обертання валу з сенсором 1 (рис. 1) на верхньому кінці торсіону, сигнал з сенсора 2 на нижньому кінці торсіону, жорстко прикріпленого до сприймаючого елемента, завдяки в'язкісному тертю, починає відставати по фазі від сигналу з сенсора 1. В цей момент починається наростання фази і збільшення значення кута закручування торсіону відносно корпусу, це буде продовжуватись до того часу t_2 (рис. 2), поки кутова швидкість обертання сприймаючого елемента не стане рівною ω_0 . Кутова швидкість обертання сенсора 1 на інтервалі часу $(0; t_1)$ буде рівна $\omega_1(t)$, а на інтервалі часу $(t_1; \infty)$ буде постійною і рівною ω_0 . Кутова швидкість обертання сенсора 2 на інтервалі часу $(0; t_2)$ буде рівна $\omega_2(t)$, а на інтервалі часу $(t_2; \infty)$ буде постійною і рівною ω_0 , як це показано на рис. 3.

В цей момент починається наростання фази і збільшення кута закручування торсіону відносно корпусу, це буде продовжуватись до того часу t_2 (рис. 3),

поки кутова швидкість обертання сприймаючого елемента не стане рівною ω_0 . Кутова швидкість обертання сенсора 1 на інтервалі часу $(0; t_1)$ буде рівна $\omega_1(t)$, а на інтервалі часу $(t_1; \infty)$ буде постійною і рівною ω_0 . Кутова швидкість обертання сенсора 2 на інтервалі часу $(0; t_2)$ буде рівна $\omega_2(t)$, а на інтервалі часу $(t_2; \infty)$ буде постійною і рівною ω_0 як це показано на рис. 3.

Оскільки інформативним параметром, який необхідний для подальших перетворень є частота сигналу, то можна зауважити, що вона пропорційна кутовій швидкості обертання валу двигуна і визначається за формулою:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot n}, \quad (4)$$

де n – коефіцієнт, що враховує конструкційні особливості сенсора.

Необхідно також зауважити, що всі дослідження реологічних характеристик відбуваються за умови, що швидкість обертання валу двигуна постійна, тобто $\omega = \omega_0 = const$. Відповідно будемо розглядати всі наступні процеси з моменту часу t_2 , коли швидкість обертання валу двигуна і сприймаючого елемента постійна. Оскільки під час установленого режиму частота сигналу на обох входах ФП буде постійною, також слід зауважити, що сигнал буде мати вигляд меандру, то мінімальний час, за який може бути визначена миттєва фаза складатиме T_0 . Знайдемо фазу сигналу з сенсора 1 на інтервалі $(t_2; t_2 + T_0)$. Як видно з рис. 3 частота сигналу на інтервалі $(t_2; t_2 + T_0)$ рівна $\omega_1(t)$, тому фаза сигналу з сенсора 1 на інтервалі $(t_2; t_2 + T_0)$ буде визначатись за формулою:

$$\Psi_1(t) = \int_{t_2}^{t_2+T_0} \omega_1(t) dt. \quad (5)$$

Також з рис. 3. можна побачити, що частота сигналу з сенсора 2 на інтервалі $(t_2; t_2 + T_0)$ рівна $\omega_2(t)$, але оскільки в момент t_2 торсіон вже буде закручений, то фаза сигналу з сенсора 2 на інтервалі $(t_2; t_2 + T_0)$ буде визначатись за співвідношенням:

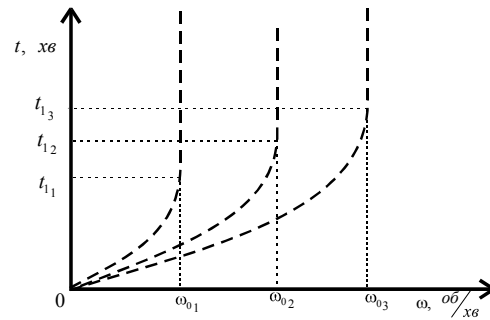


Рис. 2. Залежність часу t_1 від заданих значень кутової швидкості оберту валу двигуна ω_0

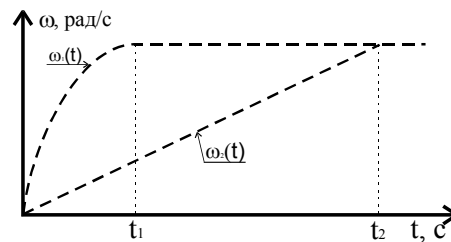


Рис. 3. Залежність кутової швидкості обертання від часу $\omega_1(t)$ – сенсора 1, $\omega_2(t)$ – сенсора 2 відповідно

$$\Psi_2(t) = \int_{t_2}^{t_2+T_0} \omega_2(t) dt - \Delta\Psi, \quad (6)$$

де $\Delta\Psi = const$ – зсув фази на інтервалі $(0; t_2)$.

Оскільки відомо, що під час вимірювання РХ кут закручення торсіону прямо пропорційний фазовому зсуву між частотами сигналів на вході ФП, то можна зауважити, що:

$$\Delta\Psi = \varphi_M(t) - \varphi_{СП}(t). \quad (7)$$

Знаючи як визначається фаза сигналу з сенсора 1 (5) та фаза сигналу з сенсора 2 (6), можна визначити фазовий зсув між частотами сигналів з сенсора 2 і сенсора 1 відповідно:

$$\Delta\Psi(t) = \Psi_2(t) - \Psi_1(t). \quad (8)$$

Підставивши значення фази сигналу (6) з сенсора 2 та значення фази сигналу (5) з сенсора 1 в (8), знайдемо зміну фазового зсуву між частотами сигналів з сенсора 2 та сенсора 1 на інтервалі часу $(t_2; t_2 + T_0)$:

$$\Delta\Psi(t) \Big|_{t_2}^{t_2+T_0} = \int_{t_2}^{t_2+T_0} [\omega_2(t) - \omega_1(t)] dt + \Delta\Psi. \quad (9)$$

Далі слід зауважити, що рівняння (9) справедливе для всіх моделей рідин, під час дослідження яких частота сигналу з сенсора 2 завжди збільшується до значення ω_0 за довільним законом і далі лишається постійною. До таких рідин відносяться всі ньютонівські рідини і рідини, в яких відсутній ефект релаксації та післядії. В даній дисертації буде розглянуто тільки процес моделювання фазочастотного методу для ньютонівської рідини, тобто коли миттєва частота сигналу сенсора 2 змінюється за лінійним законом. Що ж стосується стабільності частоти обертання валу двигуна в установленому режимі, то вона забезпечується за допомогою махової маси, яка знаходиться безпосередньо на валу двигуна. Також можна зауважити, що частота коливань, які будуть надходити на вхід першого каналу ФП буде постійна.

Відповідно математична модель, що описує процес вимірювання РХ фазочастотним методом в РВ задається системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L_\pi} \cdot u_d(t) - \frac{c}{L_\pi} \cdot \omega(t) - \frac{R_\pi}{L_\pi} \cdot i_d(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{c}{J} \cdot i_d(t) - \frac{1}{J} \cdot M_c, \\ M_T = -c[\varphi_M(t) - \varphi_{СП}(t)], \\ M_{СП} = \frac{d^2\varphi_{СП}}{dt^2} J, \\ \Delta\Psi(t) \Big|_{t_2}^{t_2+T_0} = \int_{t_2}^{t_2+T_0} [\omega_2(t) - \omega_1(t)] dt + \Delta\Psi, \\ \eta = \frac{M_T}{\omega} R, \\ M_{СП} = \sum_{i=1}^n M_i. \end{array} \right. \quad (10)$$

Знайдемо розв'язок системи рівнянь (10) за умови встановленого процесу, тобто коли всі перехідні процеси закінчились і виконується умова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1(t) = \omega_2(t) = \omega_0, \\ i_d(t) = I_H, \\ u_d(t) = U_H. \end{array} \right. \quad (11)$$

З системи рівнянь, що описує роботу двигуна знайдемо, що:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_c = cI_H, \\ \omega_H = \frac{U_H - R_\pi I_H}{c}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Складемо рівняння моментів відповідно до законів електромеханіки:

$$\frac{d^2\varphi_{СП}(t)}{dt^2} J + c\Delta\Psi = M_c. \quad (13)$$

Прийнявши до уваги, що вимірювання миттєвої фази проходить на інтервалі $(t_2; t_2 + T_0)$, на якому $\Delta\Psi = const$, для рідини, в якій відсутній ефект релаксації або якийсь інший ефект післядії, і $M_c = const$, а $\omega_{СП}(t) = \frac{d\varphi_{СП}(t)}{dt} = \omega_0$, знайдемо розв'язок рівняння для встановленого режиму:

$$C\Delta\Psi = M_c \cdot \quad (14)$$

Тобто у встановленому режимі $M_c = M_T$ підставивши значення M_c у вираз для визначення ДВ, матимемо:

$$\eta = RC \frac{\Delta\Psi}{\omega_0} \quad (15)$$

Відповідно з виразу (15) можна побачити, що як і для будь-якої РХ існує пряма залежність ДВ від фазового зсуву і частоти обертання сприймаючого елементу. Для схеми вимірювання, запропонованої на рис. 1, мінімальний інтервал вимірювання знаходиться в межах від t_2 до $t_2 + T_0$. Цей інтервал має бути жорстко прив'язаний до початку цього вимірювання. Зсув інтервалу вимірювання відносно початку в від'ємну сторону $t_2 - t$ приводить до значних похибок, а у додатну сторону $t_2 + t$ – до збільшення часу вимірювання, що говорить про необхідність точної прив'язки і зменшення часу вимірювання.

Виконання умови точної прив'язки до початкового моменту вимірювання t_2 можливе за умови коректного алгоритму вимірювання РХ, такий алгоритм представлений на рис. 4.

Процес вимірювання реологічних характеристик РВ, як вже було сказано, розпочинається з моменту, коли швидкість обертання сприймаючого елементу рівна нулю і закінчується, коли сприймаючий елемент обертається з певною швидкістю, і кут, на який закрутився торсіон, набув максимального значення і не змінюється. Крім того перехід з однієї швидкості обертання сприймаючого елементу може відбуватися як з початкового моменту, коли швидкість обертання сприймаючого елементу рівна нулю, так і з моменту, коли сприймаючий елемент набув певної, сталої швидкості обертання шляхом збільшення або зменшення швидкості обертання до певного, сталого її значення.

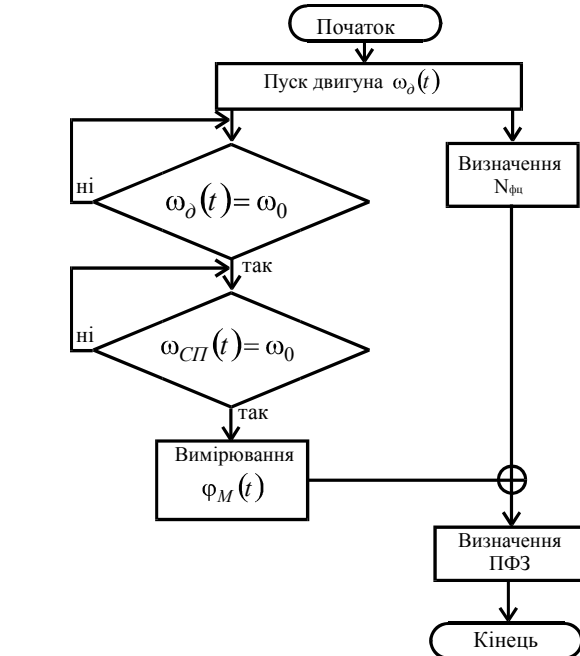


Рис. 4. Алгоритм процесу вимірювання РХ розробленим РВ

Створена математична модель, яка описує процес підвищення точності вимірювання реологічних характеристик ротаційним віскозиметром, що дає можливість їх визначення через значення ПФЗ, виміряне фазочастотним перетворювачем, та значення частоти обертання сприймаючого елементу, задане оператором.

На основі математичної моделі створений алгоритм процесу вимірювання РХ розробленим РВ, що дає можливість розробити новий клас РВ і підвищити точність вимірювання РХ речовин, в яких відсутній ефект релаксації і післядії.

Література

1. Крутоголов В. Д. Ротационные вискозиметры / Крутоголов В. Д., Куланов М. В. – М. : Машиностроение, 1984. – 112 с.
2. Петрушак В.С. Фазочастотне представлення вимірювань в'язкості ротаційним віскозиметром з торсіометричним перетворювачем / В.С. Петрушак // ВОТТП. – 2000. – № 4. – С. 87–90.
3. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисева и А.В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

Рецензія/Peer review : 10.10.2016 р.

Надрукована/Printed : 29.10.2016 р.

Рецензент: д.т.н., професор Підченко С.К.