УДК 621.311

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В РОТАЦИОННОМ ВЯЗКОЗИМЕТРЕ ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

© Алексей Владимирович Ванягин¹, Борис Александрович Гордеев²,
Владимир Иванович Ерофеев², Сергей Николаевич Охулков²

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия
e678xk@mail.ru

²Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия
gord349@mail.ru, erof.vi@yandex.ru, oxulkovs@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен новый подход к измерению вязкости неньютоновских магнитореологических жидкостей (МРЖ), основанный на измерении торсионных моментов на валу ротационного вискозиметра при погружении внутреннего воспринимающего цилиндра в исследуемую среду. Данный метод измерения динамической вязкости МРЖ позволяет производить исследования рабочей жидкости с изменяющейся вязкостью. При использовании МРЖ необходимо проводить предварительную калибровку ее вязкости в зависимости от магнитной индукции управляющего магнитного поля. Изложен принцип действия ротационного вискозиметра, его конструктивное выполнение, особенности работы. Оцениваются погрешности измерения вязкости.

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость (МРЖ), ротационный вискозиметр, динамическая вязкость, торсионный момент, генератор качающейся частоты, частота биений, триггер Шмитта, частотная модуляция.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 г.г. по теме № 0035-2014-0402, № госрегистрации 01201458047 и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-48-520010-p_a).

MEASUREMENT OF VISCOSITY OF A NON-NEWTONIAN LIQUID IN A ROTARY VISCOSIMETER WITH A FREQUENCY METHOD

© A.V. Vanyagin¹, B.A. Gordeev², V.I. Erofeev², S.N. Okhulkov²

¹Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia
e678xk@mail.ru

²Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia
gord349@mail.ru, erof.vi@yandex.ru, oxulkovs@mail.ru

Abstract. The article considers a new approach to measuring the viscosity of non-Newtonian magnetorheological fluids (MRE), based on measuring the torsion moments on the shaft of a rotational viscometer when the inner receiving cylinder is immersed in the medium under study. This method of measuring the dynamic viscosity of GRM allows the study of working fluid with varying viscosity. When using MRE, it is necessary to pre-calibrate its viscosity depending on the magnetic induction of the control magnetic field. The principle of operation of a rotational viscometer, its constructive implementation, features of work are stated. The errors of viscosity measurement are estimated.

Keywords: magnetorheological fluid (GRM), rotational viscometer, dynamic viscosity, torsion moment, oscillating frequency generator, beat frequency, Schmitt trigger, frequency modulation.

Acknowledgements. The work was carried out within the Russian state task for conducting fundamental scientific research for 2013-2020 on the topic No. 0035-2014-0402, state registration number 01201458047 and the work was supported by RFBR (project 18-48-520010).

1. Введение. Измерение динамической вязкости исследуемой массы МРЖ традиционно производится при помощи ротационного вискозиметра [1-5]. В институте проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) разработаны частотный метод измерения вязкости МРЖ и ротационный вискозиметр для определения вязкости в интервале 2-100 Па·с [3].

Принцип работы ротационного вискозиметра основан на зависимости вращающего момента, приложенного к внутреннему воспринимающему цилиндру, погруженному в исследуемую массу, от вязкости этой массы.

Крутящий момент, приложенный к внутреннему воспринимающему цилиндру, определяется соотношением

$$M_k = FR, \quad (1)$$

где M_k – крутящий момент на роторе; F – сила, приложенная к воспринимающему цилиндру; R – радиус внутреннего воспринимающего цилиндра [1-5].

Сила, приложенная к внутреннему воспринимающему цилиндру, определяется законом Ньютона [1-3,19]

$$F = \eta \frac{(\Omega_{\text{вр}} S)}{l}, \quad (2)$$

где $\Omega_{\text{вр}} = 2\pi F_{\text{вр}}$ – угловая скорость вращения и S – рабочая площадь воспринимающего цилиндра соответственно; l – зазор между стаканом и внутренним воспринимающим цилиндром; η – вязкость.

Подставляя соотношение (2) в формулу (1), получим

$$M_k = \eta \frac{(\Omega_{\text{вр}} SR)}{l}. \quad (3)$$

Если угловая скорость вращения воспринимающего цилиндра $\Omega_{\text{вр}} = 2\pi F_{\text{вр}}$ и размеры его постоянны, то крутящий момент M_k равен тормозному моменту от действия вязкостного сопротивления МРЖ. Такой тормозной момент пропорционален вязкости МРЖ η :

$$M_T = k_p \Omega_{вр} \eta. \quad (3,a)$$

где $k_p = SR/l$ – коэффициент, зависящий от размеров стакана и ротора.

Таким образом, зная значение крутящего момента на воспринимающем цилиндре, можно определить динамическую вязкость исследуемой массы МРЖ. Измерение динамической вязкости исследуемой массы МРЖ основано на измерении малых крутящих моментов торсионного вала ротационного вискозиметра – актуальная задача при разработке МРТ гидроопор [3,4,6-10].

2. Определение крутящего момента. Для определения крутящего момента на воспринимающем цилиндре необходимо создавать противодействующий торсионный момент на чувствительном элементе ротационного вискозиметра. Касательные напряжения, возникающие в исследуемой массе МРЖ, передают противодействующий крутящий момент на вал ротора 2, а затем через скручивающийся торсионный вал на вал электродвигателя (рис. 1) [1-3,5].

Рис. 1. Функциональная схема ротационного вискозиметра с пружинным торсионом [1]: 1 – электродвигатель; 2 – измерительный ротор; 3 – пружинный торсион; 4, 5 – измерительные диски; 6, 7 – оптопары; 8, 9 – преобразователи импульсов; 10 – частотный измеритель крутящего момента – схема измерения вязкости; 11 – испытуемая жидкость; 12 – измерительный стакан

Измерение вязкости МРЖ происходит за счет определения угла закручивания пружинного торсиона (рис. 1). Для определения угла закручивания пружинного торсиона 3 на его концах находятся диски с прорезями 4, 5 и датчики угла поворота 6, 7.

Рассмотренная функциональная схема ротационного вискозиметра включает пружинный торсион, соединяющий вал электродвигателя и вал ротора [1-3]. К пружинному торсиону

предъявляют жёсткие требования по обеспечению требуемых упругости и крутильной жёсткости, что является недостатком ротационного вискозиметра типа Куэтта и др.

Новый метод измерения малых крутящих моментов по деформации кручения торсиона ротационного вискозиметра основан на частотном методе измерения крутящего момента вращающихся валов [3,4,11,12]. В этом случае пружинный торсион заменяется упругим торсионом круглого сечения.

Структурная схема ротационного вискозиметра с электромагнитной системой для создания магнитного поля в измерительном стакане и датчиком крутящего момента с торсионом круглого сечения приведена на (рис. 2).

Рис. 2. Основные узлы ротационного вискозиметра:

1 – основание; 2 – стойка вискозиметра; 3 – кронштейн измерительной головки; 4 – кронштейн термометра; 5 – измерительная головка; 6 – стойка приборная; 7 – карданный подвес; 8 – измерительный ротор; 9 – измерительный стакан с МРЖ; 10 – термометр; 11 – измеритель температуры; 12 – синхронный электродвигатель; 13 – блок питания синхронного электродвигателя; 14 – фотоэлектрический преобразователь; 15 – упругий торсион; 16 – измерительные диски; 17 – оптопары; 18 – частотный измеритель крутящего момента; 19 – двухполюсные симметричные возбуждающие электромагниты; 21 – диамагнитная латунная втулка; 20 – цилиндрический кольцевой зазор с МРЖ [3]

В измерительной головке 5 расположены: измеритель температуры 11, синхронный электродвигатель 12, блок питания синхронного электродвигателя 13, частотный измеритель крутящего момента - схема измерения вязкости 18.

Синхронный электродвигатель 12 обеспечивает вращение с постоянной скоростью. Далее скорость вращения электродвигателя подвергается редуцированию в редукторе, что необходимо для увеличения мощности на валу электродвигателя. Ведущий вал электродвигателя 12 и вал ротора 8 соединены торсионным валом 15 ротационного вискозиметра (рис. 2).

В фотоэлектрическом преобразователе 14 на концах торсионного вала 15 закреплены измерительные диски с прорезями 16, с которых при помощи оптопар 17 снимается частота вращения торсионного вала 15 и передаётся по двум измерительным коаксиальным кабелям в измерительную головку 5 ротационного вискозиметра [12].

Измерение динамической вязкости исследуемой массы МРЖ в магнитном поле основано на измерении малых крутящих моментов торсионного вала 15 ротационного вискозиметра (рис. 2) [3,11,12], и на создании ортогональных постоянных и переменных магнитных полей, действующих на МРЖ. Исследуемая масса МРЖ находится в цилиндрическом зазоре 21 в 0,25 мм между цилиндрической диамагнитной латунной втулкой 20 и ротором 8 [4, 6-9].

Для создания ортогональных постоянных и переменных магнитных полей, действующих на исследуемую массу МРЖ, находящуюся в цилиндрическом зазоре 21 в 0,25 мм между цилиндрической втулкой 20 и ротором 8 применёна концентрическая электромагнитная система двухполюсных симметричных возбуждающих электромагнитов (ВЭ) 19, ВЭ1, ВЭ2, ВЭ3, ВЭ4 (рис. 2).

Под действием вязкостного сопротивления исследуемой массы МРЖ на роторе 8 создается тормозной крутящий момент, под действием которого происходит скручивание торсионного вала 15 ротационного вискозиметра.

Для измерения противодействующего крутящего момента $M_{кр}$ торсионного вала вискозиметра 15 по деформации кручения используют торсионные динамометры [3,11,12,16], фиксирующие угол $\Delta\varphi$ закручивания вала – угол относительного поворота двух сечений вала, находящихся на расстоянии H одно от другого. Этот угол определяется выражением [3,11,12]

$$\Delta\varphi = \frac{H}{GJ_p} M_{кр}, \quad (4)$$

где G – модуль сдвига материала вала; J_p – полярный момент сечения вала

Для сплошного круглого вала диаметром d формула (4) имеет вид [16]:

$$\Delta\varphi = \frac{32H}{\pi d^4 G} M_{кр}. \quad (5)$$

Следовательно, в пределах упругих деформаций угол закручивания торсионного вала пропорционален приложенному к валу крутящему моменту. Принято, что наибольший угол закручивания торсионного вала ограничивается допустимым касательным напряжением τ в его поверхностном слое [16]:

$$\tau = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3}. \quad (6)$$

С учётом формулы (6) угол закручивания торсионного вала равен:

$$\Delta\varphi = 2H\tau/Gd). \quad (7)$$

Учитывая, что угол закручивания торсионного вала составляет

$$\Delta\varphi = \Omega_{\text{вр}} t_3, \quad (8)$$

где $\Omega_{\text{вр}}$ – угловая скорость торсионного вала вискозиметра; t_3 – время задержки двух сечений торсионного вала, расположенных на расстоянии H одно от другого. Тогда получим выражение (7) в виде:

$$\Omega_{\text{вр}} t_3 = 2\tau H / (Gd), \text{ откуда } t_3 = 2\tau H / (\Omega_{\text{вр}} Gd). \quad (9)$$

При замене в ротационном вискозиметре пружинного торсиона на упругий торсион круглого сплошного сечения (торсионный вал) требуется провести оценку его минимальных деформаций сдвига и минимального времени его закрутки t_3 .

3. Оценка максимальных деформаций сдвига упругого стального торсиона ротационного вискозиметра. Для оценки минимальных деформаций сдвига торсионного вала ротационного вискозиметра и минимального времени его закрутки t_3 необходимо считать, что вал синхронного электродвигателя вращается с некоторой неуравновешенностью. При этом возникает моментная неуравновешенность вращающегося упругого торсиона вала и ротора вискозиметра обусловленная изменением неравномерностью угловой скорости вращения вала электродвигателя [14,15].

Аналитические расчеты крутящих моментов вращающегося торсионного вала вискозиметра при его моментной неуравновешенности невозможны, и поэтому при их определении используют численные методы.

При неравномерности скорости вращения вала электродвигателя с некоторой угловой частотой $\Omega_{\text{вр}}$ в торсионном вале вискозиметра распространяются волны кручения, как показано на (рис.3) [14,15].

Рис. 3. Распространение волны кручения по длине круглого торсиона вискозиметра разбитого на элементы длины h [14,15]

Распространяются волны кручения в торсионном вале вискозиметра вследствие неравномерности скорости вращения вала электродвигателя с частотой крутильных колебаний $\Omega_{\text{кр}}$. При этом на торцах торсионного вала действуют крутящие моменты M_x^+ и M_x^- , в результате чего величины закручивания элементов торсионного вала не остаются постоянными и равными φ_x , а изменяются с линейной скоростью $v_{\text{л}} = \Omega_{\text{кр}} \cdot r$ [14,15].

Поэтому время закрутки (сжатия) торсиона представляет отношение

$$T_3 = L / V = T_{сж} , \quad (10)$$

где L – длина торсиона; V – скорость распространения ультразвуковой волны по длине торсиона [14,15].

Время закрутки торсиона также можно определить по формуле

$$T_{сж} = n \cdot \tau = \frac{L}{h} \tau , \quad (11)$$

где τ – время закрутки (сжатия) каждого элемента торсиона длиной h .

Время закрутки торсиона не зависит от скорости v_l закрутки торсиона и, конечно, от выбранных длин элементов h и их времени закрутки τ .

Минимальные деформации во всех элементах торсиона получаются одинаковыми и равными [14,15]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{v_l \tau}{h} = v_l \sqrt{\frac{2\rho(1+\mu)}{E}} = \frac{v_l}{V} , \quad (11)$$

а напряжения:

$$\sigma = G\varepsilon_{\max} = \frac{Gv_l}{V} , \quad (12)$$

где v_l , E , G , ρ , μ – линейная скорость вращения торсиона, модули Гука и сдвига, плотность материала торсиона, коэффициент Пуансона [14,15].

Если, например, материал торсиона вискозиметра сталь и имеет характеристики: модуль сдвига $G = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, при длине элемента торсиона $h = 0,006$ м и его радиусе $r = 0,006$ м, то в соответствии с [14,15] время закрутки каждого его элемента равно

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho}{G}} = 0,006 \sqrt{\frac{7,8 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{10}}} \cong 1,8735 \cdot 10^{-6} \text{ с} . \quad (13)$$

Если элементы торсиона вискозиметра закручиваются со скоростью $v_l = \Omega_{кр} \cdot r = 3,768 \cdot 10^{-3}$ м/с, то из выражения (11) получаем деформации во всех элементах торсиона равными

$$\varepsilon_{\max} = \frac{v_l \tau}{h} = \frac{3,768 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8735 \cdot 10^{-6}}{0,006} = 1,17656 \cdot 10^{-6} .$$

Таким образом, деформации во всех элементах торсиона вискозиметра получаются очень малыми. Поэтому и каждая единица для элементов торсиона равна 1,17656 микрон.

Напряжения во всех элементах торсиона вискозиметра по (12) получаются равными [14,15]:

$$\sigma = G\varepsilon_{\max} = 8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2 \cdot 1,17656 \cdot 10^{-6} = 9,4125 \cdot 10^4 = 94,125 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2 .$$

Взаимный поворот сечений всех элементов торсиона относительно друг друга находим из выражений [14,15]:

$$\varepsilon_{\max} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{(\varphi_{x,i+1} - \varphi_{x,i})r}{h} ; \quad (14)$$

$$\Delta\varphi_{\max} = (\varphi_{x,i+1} - \varphi_{x,i}) = \frac{\varepsilon_{\max} h}{r}. \quad (15)$$

где $(\varphi_{x,i+1} - \varphi_{x,i})$ – угловые перемещения точек элемента торсиона.

Воспользуемся данными примера: $\varepsilon_{\max} = 1,17656 \cdot 10^{-6}$; $r = 0,006$ м; $h = 0,006$ м, тогда максимальный взаимный поворот сечений всех элементов торсиона относительно друг друга равен [14,15]:

$$\Delta\varphi_{\max} = (\varphi_{x,i+1} - \varphi_{x,i}) = \frac{\varepsilon_{\max} h}{r} = \frac{1,17656 \cdot 10^{-6} \cdot 0,006 \text{ м}}{0,006 \text{ м}} = 1,17656 \cdot 10^{-6} \text{ рад}.$$

Деформации во всех элементах торсиона вискозиметра соответствуют углам поворота сечений $\Delta\varphi_{\max} \cong 0,242683''$ – угловых секунд, и угол закрутки торсиона длиной $L = 23,666 \cdot 0,006 = 142$ мм составит

$$\Delta\varphi_{\text{с. max}} = 23,666 \cdot \frac{\varepsilon_{\max} h}{r} = 23,666 \cdot 1,17656 \cdot 10^{-6} = 27,84525 \cdot 10^{-6} \text{ рад}.$$

В угловых единицах деформация торсиона вискозиметра длиной $L = 23,666 \cdot 0,006 = 142$ мм составит величину $\Delta\varphi_{\max} \cong 23,666 \cdot 0,242683'' = 5,7435''$ – угловых секунд.

Минимальное время закрутки торсиона вискозиметра с $L = 142$ мм при $\Omega_{кр} = 0,628 \text{ рад/с}$ и $T_{кр} = 0,1$ с равно:

$$t_{\text{с. max}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{с. max}}}{2\pi} \cdot T_{кр} = \frac{27,84525 \cdot 10^{-6}}{2\pi} \cdot 0,1 \text{ с} = 0,4433 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Допустимый номинальный крутящий момент на торсионе вискозиметра при неравномерности его вращения определяется выражением [14,15]:

$$M_{кр.н} = \frac{\Delta\varphi}{L} G \int_S r^2 dS. \quad (16)$$

Интеграл в выражении (16) полярный момент инерции сечения круглого торсиона вискозиметра, радиуса r . У круглого торсиона вискозиметра постоянного сечения полярный момент инерции сечения постоянен по длине и не зависит от длины его базового участка ($L = 142$ мм):

$$J_p = \int_S r^2 dS. \quad (17)$$

Для круглого сечения торсиона вискозиметра с радиусом $r = 0,006$ м полярный момент инерции определяется выражением: $J_p = \pi \cdot r^4 / 2$ [14,15]; модуль сдвига материала торсиона вискозиметра $G = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м²; плотность материала торсиона вискозиметра $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; жёсткость $GJ_p = G \cdot \pi \cdot r^4 / 2 = 8 \cdot 10^{10} \cdot 3,1416 \cdot 0,006^4 / 2 = 162,86$ Н·м².

Крутящий момент при неравномерности вращения торсиона без МРЖ с частотой $\Omega_{кр} = 0,628 \text{ рад/с}$ определяем по выражению [14,15]:

$$M_{кр.н} = \frac{\Delta\varphi_{\text{с. max}}}{L} GJ_p = \frac{27,84525 \cdot 10^{-6}}{0,142 \text{ м}} 162,86 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 = 31,936 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (18)$$

Полученные малые максимальные время закрутки и крутящий момент при неравномерности вращения торсиона вискозиметра показывают на целесообразность применения для измерения динамической вязкости МРЖ частотного метода измерения малых крутящих моментов.

4. Частотный метод измерения вязкости МРЖ ротационным вискозиметром.

Установлено, что при частотном методе измерения крутящего момента вращающихся торсионных валов [3,4,11-13] закручивание торсионного вала приводит к частотному сдвигу между опорной и смещенной волнами высокочастотных генераторов качающейся частоты (ГКЧ). Применяются два генератора ГКЧ_о - опорного сигнала и ГКЧ_с – смещённого сигнала. При этом частота опорного сигнала (f_o) и смещенного (f_c) меняется во времени по закону симметричной треугольной пилы (рис.4, а) [11-13].

Рис. 4. Изменение во времени частот опорного (f_o) и смещенного (f_c) частотно-модулированных сигналов (а), частоты (F_6) (б, в) и сигнала биений (г) в измерителе крутящего момента на низкой или с нулевой промежуточной частоте [3,4,11,12]

В измерителе крутящего момента используется симметричный линейный закон периодической модуляции частоты ГКЧ [7, 10]. Заметим, что на (рис. 4) масштаб не выдержан, так как всегда средняя частота $f_o \gg \Delta f_m$, где $\Delta f_m = 20 \div 50$ МГц – девиация частоты.

В измерителе крутящего момента используется симметричный линейный закон периодической модуляции частоты ГКЧ [3,4,11,12].

Заметим, что на (рис. 4) масштаб не выдержан, так как всегда средняя частота $f_o \gg \Delta f_m$, где $\Delta f_m = 20 \div 50$ МГц – девиация частоты.

Частота смещенного во времени сигнала под действием крутящего момента изменяется таким же образом, как и частота f_o опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания

$t_3 = \Delta\varphi/\Omega_{\text{вр}}$ относительно частоты f_0 (рис.4, а). В результате смещения колебаний ГКЧ возникают биения.

Изменение частоты генераторов ГКЧ_о и ГКЧ_с согласно (рис. 4, а) составляет

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_0}{dt} = \frac{df_0/dt}{\Omega_{\text{вр}}} \Delta\varphi, \quad (19)$$

то есть пропорциональна углу $\Delta\varphi$ закручивания вращающегося торсионного вала ротационного вискозиметра при его деформации кручения [3,4,11,12].

Изменение частоты генераторов ГКЧ_о и ГКЧ_с согласно (рис. 4, а) составляет

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_0}{dt} = \frac{df_0/dt}{\Omega_{\text{вр}}} \Delta\varphi, \quad (19)$$

то есть пропорциональна углу $\Delta\varphi$ закручивания вращающегося торсионного вала ротационного вискозиметра при его деформации кручения [3,4,11,12].

Измерение частотного сдвига в измерителе крутящего момента ротационного вискозиметра основано на сравнении частоты опорного сигнала (от ГКЧ_о) и частоты смещенного сигнала (от ГКЧ_с). На выходе смесителя, выделяется нулевая разностная частота F_{60} .

5. Реализация измерителя крутящего момента торсионного вала ротационного вискозиметра на нулевой промежуточной частоте. Измеритель крутящего момента торсионного вала ротационного вискозиметра реализован на низкой или нулевой промежуточной частоте следующим образом (рис. 5) [3,4,11,12].

С помощью разнесенных вдоль торсионного вала ротационного вискозиметра фотоэлектрических (или индуктивных) датчиков 1 и 2 частоты вращения вала синхронно и синфазно снимают с вращающегося торсионного вала два сдвинутых по фазе друг относительно друга сигнала с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. При этом следует уточнить, что использование терминов *синхронность* и *синфазность* относительно сигналов с датчиков правомерно только при постоянном торсионном моменте на валу, так как в противном случае синхронность и синфазность нарушаются.

Пройдя через триггеры Шмитта - делители частоты сигналы поступают на интеграторы. Полученные низкочастотные пилообразные сигналы треугольной формы пропускают через усилители напряжения на ГКЧ_о и ГКЧ_с для обеспечения периодической частотной модуляции.

Далее сохранившие фазовый сдвиг, сформированные частотно-модулированные опорный сигнал с датчика 1 с частотой $f_0(t)$ и сдвинутый вследствие деформации кручения сигнал с датчика 2 с частотой $f_c(t)$ подают на смеситель, снабженный на выходе фильтром низкой частоты (ФНЧ) с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{60\text{мах}}$.

Фильтр низкой частоты (ФНЧ) соединен с входом счетчика частоты биений, который преобразует частоту биений в значения деформации кручения упругого вала.

Счётчик состоит из формирователя прямоугольных импульсов, длительность которых соответствует половине периода частоты биений, и высокостабильного генератора тактовых импульсов (ГТИ) с тактовой частотой порядка 100 МГц. Использовать более высокую частоту нецелесообразно из-за погрешности фотоэлектрических датчиков [3,4,11,12].

Поскольку условие линейной зависимости угла закрутки торсионного вала вискозиметра от изменения момента на валу сохраняется, то число импульсов ГТИ, занесённых в счётчик пропорционально углу $\Delta\varphi$ закручивания торсионного вала.

Рис. 5. Структурная схема устройства измерения крутящего момента на низкой или нулевой промежуточной частоте [12]

Результат вычисления деформации кручения торсионного вала ротационного вискозиметра в виде значений угла $\Delta\varphi$ закручивания вала или в значениях торсионных моментов индицируется индикатором.

Подставив формулу (9) для времени t_3 задержки в формулу (19) для частоты биений получим выражение, определяющее изменение частоты ГКЧ₀ за время t_3 задержки [3,4,11,12]:

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_0}{dt} = \frac{2(df_0/dt)H}{\Omega_{\text{вр}} Gd} \tau. \quad (20)$$

Согласно формуле (20) приращение F_6 пропорционально касательным напряжениям τ на поверхности торсионного вала ротационного вискозиметра.

Мгновенная частота биений равна абсолютному значению разности мгновенных значений частот опорного и смещенного сигналов хотя формально можно учитывать знак частоты $F_6(t)$ [3,4,11,12].

Сказанное, иллюстрируется на (рис. 5, б, в). Частота биений, которая в течение большей части периода модуляции $T_m = T_{вр}$ остается постоянной, является основной.

Ее значение, как видно, из (рис. 5, а) и формулы (10), равно $F_{60} = \beta t_3$,

где: $\beta = \frac{df}{dt} = 2\Delta f_m F_m$ – скорость изменения частоты ГЧЧ; Δf_m – девиация частоты; $F_m = F_{вр}$ – частота модуляции.

Тогда, основная частота биений с учетом (20) будет равна

$$F_{60} = \left(\frac{4\Delta f_m F_m}{\Omega_{вр} G} \right) \left(\frac{H}{d} \right) \tau, \quad (22)$$

причем девиация частоты Δf_m несколько десятков мегагерц, а F_m – десятки герц.

Так как $F_m = F_{вр}$, а $\Omega_{вр} = 2\pi F_{вр}$, то выражение (22) преобразуется к виду

$$F_{60} = \left(\frac{4\Delta f_m F_m}{2\pi F_m G} \right) \left(\frac{H}{d} \right) \tau. \quad (22,a)$$

В этом случае круговая частота биений будет равна

$$\Omega_{60} = 2\pi F_{60} = 4\Delta f_m \left(\frac{\tau}{G} \right) \left(\frac{H}{d} \right). \quad (23)$$

Из выражения (23) можно определить допустимые касательные напряжения τ на вращающемся валу, которые будут равны

$$\tau = \left(\frac{\Omega_{60}}{4\Delta f_m} \right) \left(\frac{d}{H} \right) G. \quad (24)$$

Далее можно определить крутящий момент на вращающемся валу. С учетом выражений (7-9) крутящий момент на вращающемся валу будет равен выражению

$$M_{кр} = \frac{2\tau}{d} \left(\frac{\pi d^4}{32} \right) = \left[\left(\frac{\Omega_{60}}{4\Delta f_m} \right) \left(\frac{d}{H} \right) G J_p \right] \frac{2}{d} = \frac{\Omega_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H} = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H}. \quad (25)$$

Крутящий момент на вращающемся торсионном валу ротационного вискозиметра с учётом (4) и (15) определяется выражением

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} G J_p = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H} = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{G J_p}{H}, \quad (26)$$

в котором величина $\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi = \Delta\varphi$ есть угол закручивания торсионного вала ротационного вискозиметра, выраженный в радианах.

Приравняв выражение (26) к выражению (3), получаем равенство

$$M_{кр} = \eta \frac{(\Omega_{вр} S r)}{l} = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{G J_p}{H}. \quad (27)$$

Теперь из равенства (27) можно определить динамическую вязкость η исследуемой массы МРЖ в ротационном вискозиметре

$$\eta = \left(\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{GJ_p}{H} \right) \cdot \left(\frac{l}{2\pi F_{вр} SR} \right) = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} \frac{l}{F_{вр} SR}, \quad (28)$$

где $2\pi F_{вр} = \Omega_{вр}$ – угловая скорость вращения внутреннего воспринимающего цилиндра; S – рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра; R – радиус внутреннего воспринимающего цилиндра; l – зазор между стаканом и ротором.

6. Оценка дискретной погрешности измерения угла закрутки торсиона ротационного вискозиметра. Построение измерителя крутящего момента с широкополосной частотной модуляцией (ЧМ) основано на применении ГКЧ, вырабатывающие сигнал с частотой, изменяющейся периодически, например, по симметричному линейному закону [11,12]. В этом случае изменение – девиация частот смещённого ГКЧ_с и опорного ГКЧ_о (рис. 4, а) ЧМ-сигналов составит [11-13]:

$$\Delta f = 2\Delta f_m F_m t_{см} = 2\Delta f_m F_m \Delta\varphi / \Omega_{вр}. \quad (29)$$

Однако у частотного измерителя крутящего момента есть серьезный недостаток – наличие дискретной погрешности $\delta\Delta\varphi_{\max}$ измерения угла $\Delta\varphi$, обусловленной периодичностью модуляции ЧМ-сигналов ГКЧ_с и ГКЧ_о.

Рассмотрим физическую природу дискретной погрешности. Сигналы ГКЧ определяются выражениями [13]:

$$\overbrace{e_o(t) = E_o \cos[(\omega t) + \beta \sin(\Omega_m t + \varphi_0)]}^{\text{опорный}}; \quad \overbrace{e_c(t) = E_c \cos[\omega(t - \tau) + \beta \sin(\Omega_m(t - \tau) + \varphi_0)]}^{\text{смещённый}},$$

где E_o, E_c – амплитуды высокочастотных сигналов ГКЧ_о и ГКЧ_с;

$\tau = \frac{\Delta\varphi}{\Omega_{вр}} = \frac{\Delta\varphi}{\Omega_m}$ – время смещения вала; φ_0 – начальный фазовый угол; $\beta = 2\pi \frac{\Delta f_m}{\Omega_m}$ – индекс

частотной модуляции. Сигнал на выходе смесителя имеет вид [13]:

$$e(t) = E \cos \varphi, \quad (30)$$

где $\varphi = \omega \tau + \varphi_m \cos \Omega_m t$ текущая фаза; ω – круговая несущая частота.

Сигнал на выходе смесителя определяется выражением [13]:

$$\varphi_m = 2\beta \sin\left(\Omega_m \tau / 2\right) \approx \beta \Omega_m \tau = \beta \Omega_m \frac{\Delta\varphi}{\Omega_m} = \beta \Delta\varphi. \quad (31)$$

Наличие зависимости φ_m от измеряемого значения деформации кручения приводит к тому, что при незначительном изменении крутящего момента (угла закручивания вала) изменяется форма сигнала на выходе смесителя. Это изменение также обусловлено небольшими отрезками времени, равными времени t_z запаздывания, в течение которых частота биений не остается постоянной (рис. 4, б и рис. 4, а, б) – так называемыми зонами обращения. В средних точках этих зон функция $F_6(t)$ проходит через ноль. В зонах обращения функция

$|F_{\phi}(t)|$ (рис. 4, в,г) отличается от F_{60} . Влияние зон обращения тем меньше, если выполняется неравенство $T_M \gg t_3$.

Сигнал на выходе смесителя имеет постоянную частоту F_{60} , исключая участки длительностью t_3 , отстоящие друг от друга на расстоянии $T_M/2$, внутри которых его фаза изменяется на π , т. е. на 180° [3,4,11,12].

Измерение частоты сигнала биений основано на подсчете числа нулей N за период модуляции $T_M = T_{вр}$. Зависимость числа нулей от допустимого угла закручивания двух сечений торсионного вала под действием крутящего момента $M_{кр}$ приведена на (рис. 6) [16].

Рис. 6. Зависимость числа N нулей от допустимого угла закручивания двух сечений вала, где n – число ступенек, каждая зависит от условий эксперимента

На (рис.6) ступенчатые линии означают допустимые погрешности при измерении углов закрутки вала, а средняя линия означает среднеквадратичное значение погрешности измерений во всём диапазоне изменения углов закрутки. Минимальный допустимый угол $\delta\Delta\varphi_{\max}$ закручивания вала называют минимальным допустимым смещением или дискретной погрешностью. Значение минимального критического смещения определяется из условия изменения числа нулей на единицу времени [11,16].

Если φ_M изменяется на π , то тогда в соответствии [11,16] имеем:

$$\left. \begin{aligned} \beta \Omega_M (\delta t_{\text{см.мин}}) &= \pi; \\ \beta \Omega_M \left(\frac{\Delta F_{60}}{2\Delta f_M F_M} \right) &= \pi; \\ \beta \Omega_M \left(\frac{1}{2\Delta f_M} \right) &= \pi. \\ 2\pi \frac{\Delta f_M}{\Omega_M} \Omega_M \left(\frac{1}{2\Delta f_M} \right) &= \pi. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Из выражений (32) следует:

$$\delta\Delta\varphi_{\max} = \frac{\varphi F_{60}}{2\Delta f_M} = \frac{\varphi F_M}{2\Delta f_M} \text{ рад.} \quad (33)$$

В связи с тем, что счетчики подсчитывают число полных биений, показания частотного измерителя крутящего момента ротационного вискозиметра на нулевой промежуточной частоте изменяются скачками [16]. Наименьшее значение деформации кручения торсионного вала, которое способен измерить измеритель, соответствует одному полному биению за период модуляции ($n_1 = 1$).

Возникновения дискретной ошибки и минимального измеряемого значения деформации кручения торсионного вала рассмотрен на примере определения разностной частоты по методу счёта нулей. Однако природа этого явления более глубокая, и она связана с дискретной структурой спектра преобразованного сигнала. В случае дискретной структуры спектра дискретная ошибка имеет место при любом методе измерения частоты.

Изложенный метод измерения и контроля торсионных моментов в ротационном вискозиметре позволяет проводить оценку измерения динамической вязкости МРЖ в реальном масштабе времени и может найти применение в практике технической диагностики вязкости рабочих жидкостей ротационными вискозиметрами [5,17,18].

Заключение. Рассмотренный метод измерения динамической вязкости МРЖ позволяет производить исследования рабочей жидкости с изменяющейся вязкостью на несколько порядков [5,17,18]. Перед заполнением магнитореологических трансформаторов рабочей жидкостью необходимо проводить предварительную калибровку вязкости МРЖ в зависимости от магнитной индукции управляющего магнитного поля.

Список литературы

1. Корганова О.Г., Кузнецов В.А. Автоматическое определение вязкости ротационным вискозиметром типа ВЦР // Вестник Самарского государственного технического университета, сер. Технические науки. Приборостроение, метрология, информационно-измерительные приборы и системы. - 2019. - №2 (33). - С. 88-97.
2. Корганова О.Г., Кузнецов В.А. Ротационный вискозиметр // Вестник Самарского государственного технического университета, сер. Технические науки. Информационные технологии. - 2012. - №1 (33). - С 55-60.
3. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Осмехин А.Н., Мишанов Е.А. Измерение динамической вязкости магнитореологических жидкостей в ротационном вискозиметре частотным методом // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сб. н.-техн. статей. - 2017. - С. 77-87.
4. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Шохин А.Е. Измерение частотным методом торсионного момента на ведомом валу, соединенном магнитореологической муфтой с ведущим валом // Вестник машиностроения. - 2018. - № 9. - С. 8-13.
5. Пирогов А.Н., Доня Д.В. Инженерная реология. Учебное пособие / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово: 2004. – 110 с.: ил.
6. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Синёв А.В. Вращающееся магнитное поле в управлении магнитореологическим трансформатором // Вестник машиностроения. - 2018. - № 11. - С. 33-35.
7. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Синёв А.В., Ермолаев А.И., Шохин А.Е. Магнитореологический трансформатор управляемый вращающимся магнитным полем // Проблемы машиностроения и надёжности машин. - 2018. - №4. - С. 28-35.

8. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Горсков В.П. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор // Вестник машиностроения. - 2015. - №7. - С. 32-38.
9. Гордеев Б. А., Маслов В.Г., Охулков С.Н., Осмехин А.Н. К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях. Статья. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. - 2014. - № 2. - С. 15 -21.
10. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Мугин О.О. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. - М.: Физматлит, 2004. - 175 с.
11. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Бугайский В.В., Горсков В.П. Частотный метод измерения крутящего момента вращающихся валов // Вестник машиностроения. - 2015. - № 2. - С.3-7.
12. Охулков С. Н. Патент на изобретение «Способ определения крутящего момента» за № 2196309 от 10.01.2003 г., по заявке № 2000110472 от 24.04.2004 г.
13. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. - М.: Энергоиздат, 1989. - 208 с.
14. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Шохин А.Е. Снижение виброперегрузок возбуждаемых вращающимися валами в переходных режимах // Вестник машиностроения. - 2018. - № 2. - С. 9-15.
15. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Корендясев Г.К. Оценка упругих и демпфирующих свойств соединительной магнитореологической муфты вращающихся валов // Вестник машиностроения. - 2018.- № 5. - С. 9-14.
16. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. - Киев: Наукова думка, 1981. - 584 с.
17. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. - Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2011. - 264 с.
18. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект. - Минск: Наука и техника, 1982. - 184 с.
19. Курс физики: Учебник. в 2 томах / Под ред. В.Н. Лозовского. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Лань, 2009. - 572 с., 600 с.

Дата поступления: 14 февраля 2020 г.