

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК. 534.631

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.Н. Осмехин³, А.С. Плехов²

ИЗМЕРЕНИЕ ТОРСИОННЫХ МОМЕНТОВ НА ВАЛАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, СОЕДИНЕННЫХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ МУФТОЙ, ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ¹

Институт проблем машиностроения РАН¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»³

Объект исследования: электротехнические комплексы.

Цель: исследование торсионных моментов в системах, соединяющих электротехнические комплексы.

Результаты: разработан способ измерения торсионных моментов частотным способом

Область применения: системы контроля работы исполнительных механизмов, соединяющих электротехнические комплексы с энергозадающими генераторами и потребителями.

Ключевые слова: магнитоологический трансформатор; магнитоологическая жидкость; дроссельный канал; внутреннее управляющее магнитное поле.

Введение

В статье рассмотрены новые подходы к исследованию торсионных моментов, возникающих на валах электротехнических комплексов при соединении их магнитоологическими муфтами. Показано, что поскольку вязкость магнитоологической жидкости (МРЖ), заполняющей муфту, является функцией магнитного поля, то целесообразно дроссельные каналы в магнитоологических трансформаторах (МРТ) заменить одним дроссельным каналом между коаксиальными цилиндрами. Магнитоологический эффект и различные его применения в демпфирующих устройствах исследовались и публиковались в работах [1-4].

Частотный метод измерения торсионных моментов

Свойства магнитоологических жидкостей изменять вязкость при действии магнитных полей нашли широкое применение в различных областях науки и техники [5-13]. В работах [14-16] раскрыт способ измерения торсионных моментов неравномерно нагруженных валов частотным методом. Именно этот способ измерения торсионных моментов можно применить и к вращающимся соединительным муфтам с МРЖ, соединяющим валы исполнительных механизмов с электромеханическими комплексами [18].

При сцеплении валов муфтой возникает закрутка коаксиальных цилиндров, соединенных магнитоологическими муфтами (рис. 1) [8 – 10, 18].

При сцеплении валов соединительной муфтой в них возникает торсионный момент. При измерении торсионного момента используется симметричный линейный закон периодической частотной модуляции генератора качающейся частоты (ГКЧ) (рис. 2). Применяются два генератора: ГКЧ_о- опорного сигнала (f_0), ГКЧ_с смещённого сигнала (f_c) (рис. 2, а) [14 – 16].

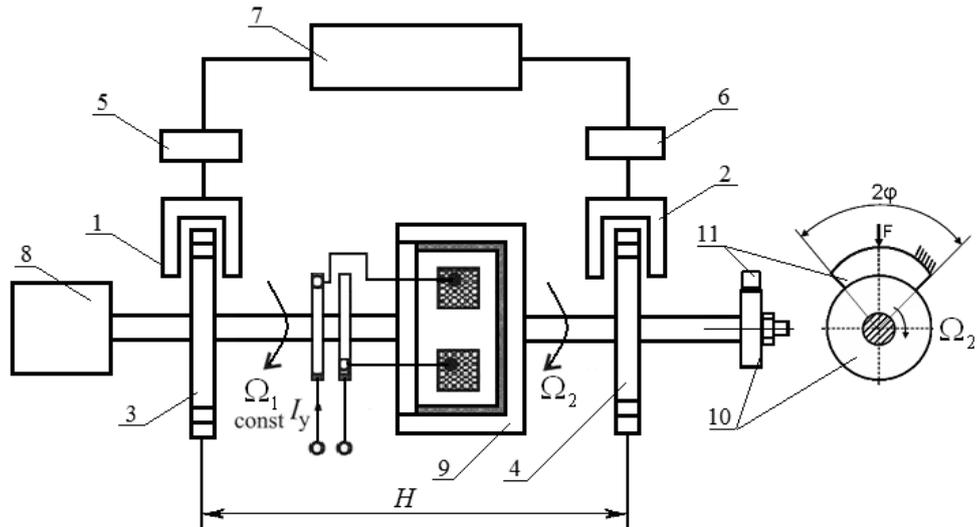


Рис. 1. Функциональная схема испытаний цилиндрической магнитореологической муфты вязкого трения с парой трения «диск-колодка»:

1, 2 – оптопары; 3, 4 – измерительные диски; 5, 6 – преобразователи импульсов; 7 – частотный измеритель «углового рассогласования ведущего и ведомого валов»; 8 – электродвигатель; 9 – магнитореологическая муфта; 10, 11 – диск и колодка пары трения; H – базовое расстояние (длина) муфты

При сцеплении валов муфтой возникающее угловое рассогласование валов приводит к смещению во времени сигналов частоты вращения валов муфты и, следовательно, частотно-модулированных сигналов ГКЧ. Частота опорного сигнала (от ГКЧ₀) опережает частоту смещенного сигнала (от ГКЧ_c). В результате происходит частотный сдвиг между опорным и смещенным сигналами ГКЧ.

Частота смещенного во времени сигнала под действием углового рассогласования соединительной муфты изменяется таким же образом, как и частота f_0 опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания $t_3 = \Delta\varphi/\Omega_{вп}$ относительно частоты f_0 (рис. 1, а).

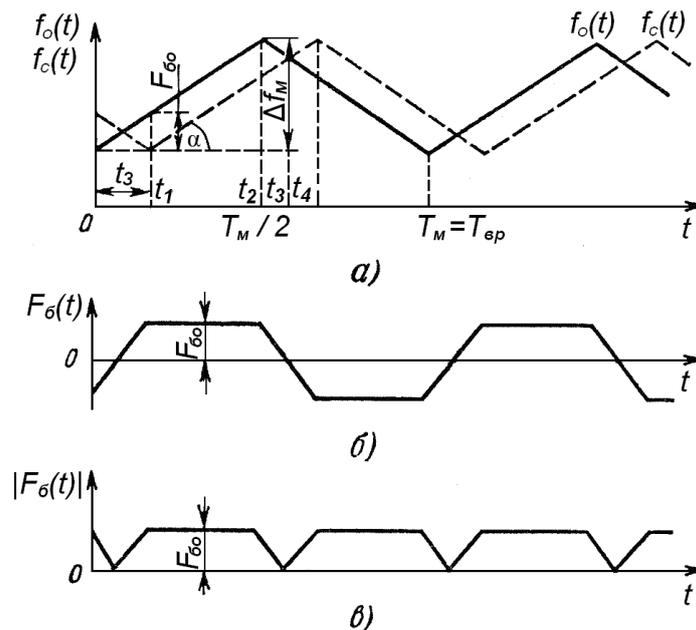


Рис. 2. Изменение во времени частот опорного (f_0) и смещенного (f_c) частотно-модулированных сигналов (а) и разностной частоты биений F_{δ} (б, в) в измерителе углового рассогласования ведущего и ведомого валов [12 -15]

Скорость изменения частоты двух ГКЧ одна и та же. В результате смещения колебаний двух ГКЧ возникает биения.

Изменение частоты генераторов $ГКЧ_0$ и $ГКЧ_c$ по рис. 2, а составляет

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_o}{dt} = \frac{df_o/dt}{\Omega_{вр}} \Delta \varphi, \quad (1)$$

то есть пропорциональна углу рассогласования муфты $\Delta \varphi$ [14–17].

Измерение углового рассогласования валов, определяемого торсионными моментами, производится по частотному сдвигу ГКЧ, и основано на сравнении их частот в смесителе. На выходе смесителя выделяется разностная частота биений F_{60} .

Реализация измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов, соединенных муфтой по частоте биений

Структурная схема устройства измерения углового рассогласования ведущего и ведомого валов на разностной нулевой частоте биений приведена на рис. 3. Измеритель углового рассогласования ведущего и ведомого валов, соединенных муфтой реализуется на измерении частоты биений следующим образом (рис. 2) [14 -16]. С помощью установленных на ведущем и ведомом валах соединительной муфты кодовых дисков с фотоэлектрическими датчиками 1 и 2 снимаются сигналы частот вращения валов, соединённых муфтой (рис. 1).

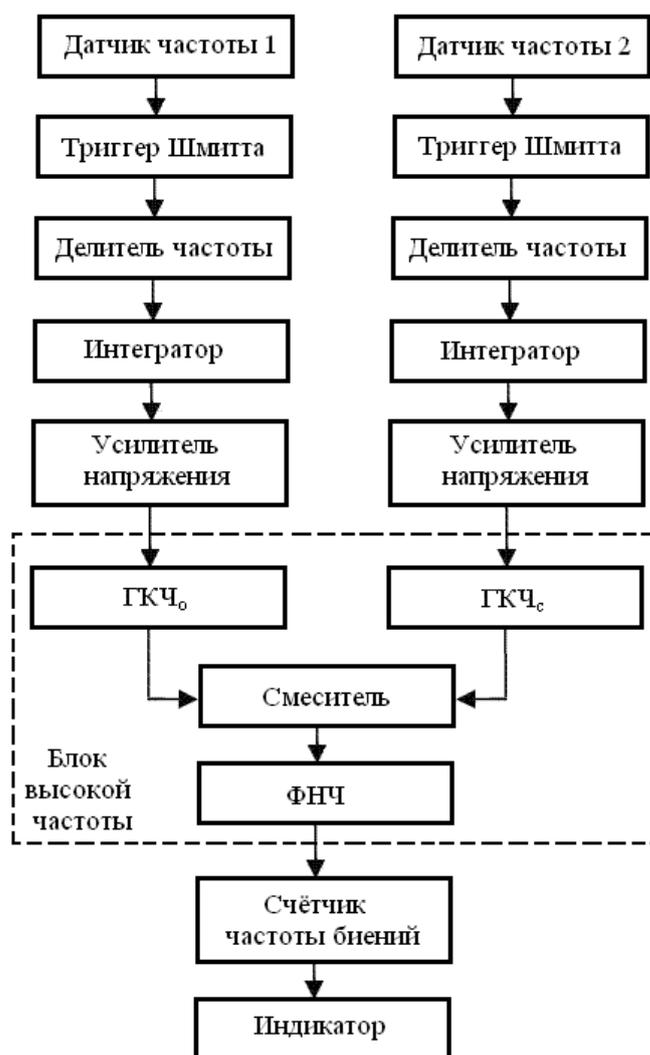


Рис. 3. Структурная схема устройства измерения углового рассогласования ведущего и ведомого валов на разностной нулевой частоте биений [12]

Измерение вязкости МРЖ происходит за счет определения углового рассогласования ведущего и ведомого валов муфты 9.

Сигналы частот вращения валов формируют модулирующие напряжения ГКЧ по закону симметричной треугольной пилы (рис. 1, а). Частоты вращения валов соединительной муфты 9 синхронно и синфазно снимают фотоэлектрическими датчиками 1 и 2 (рис. 1) Сигналы с фотоэлектрических датчиков 1 и 2 сдвинуты по фазе друг относительно друга за время изменения углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединенных муфтой 9 определённым торсионным моментом.

При этом следует уточнить, что использование терминов *синхронность* и *синфазность* относительно сигналов с датчиков 1 и 2 правомерно только при постоянном торсионном моменте на валах, соединённых муфтой 9, так как в противном случае синхронность и синфазность нарушаются.

Далее сохранившие фазовый сдвиг сформированные частотно-модулированные сигналы ГКЧ (опорный с датчика 1 с частотой $f_o(t)$ и сдвинутый вследствие углового рассогласования ведущего и ведомого валов муфты 9, сигнал с датчика 2 с частотой $f_c(t)$) подают на измеритель углового рассогласования ведущего и ведомого валов 7 (рис. 1). В измерителе на выходе смесителя установлен фильтр низкой частоты (ФНЧ) с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{60\max}$ (рис. 2).

Выход ФНЧ соединен с входом счетчика частоты биений, преобразующий частоту биений в значения углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты 9. 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 1 и 2.

Поскольку условие линейной зависимости угла рассогласования муфты 9 от изменения момента на муфте сохраняется, то число импульсов ГТИ, занесённых в счётчик, пропорционально углу $\Delta\varphi$ закручивания муфты. Результат вычисления углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты 9 в виде значений угла $\Delta\varphi$ индицируется индикатором.

Мгновенная частота биений равна абсолютному значению разности мгновенных значений частот опорного и смещенного сигналов

$$|F_6(t)| = |f_o(t) - f_c(t)|,$$

хотя формально можно учитывать знак частоты $F_6(t)$ [14 -16].

Изложенное иллюстрируется на рис. 2, 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. 1, а и формулы (1), равно $F_{60} = \beta t_s$, где $\beta = \frac{df_o}{dt} = 2\Delta f_m F_m$ - скорость изменения частоты ГКЧ; Δf_m - девиация частоты; $F_m = F_{вр}$ - частота модуляции.

Из приведённого рассмотрения следует, что при изменении вязкости МРЖ под действием магнитного поля изменяется частота ГКЧ, частота которого модулируется частотой Ω_2 ведомого вала. Это указывает на деформацию соединительной муфты 9 или на проскальзывание ведомого вала [10].

Крутящий момент на вращающемся ведомом валу соединительной муфты 9 определяется выражением

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} GJ_p, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ – угол относительного поворота коаксиальных цилиндров муфты (9); H – базовое

расстояние (длина) муфты; G, J_p – модуль сдвига материала и полярный момент сечений ведущего и ведомого валов соединительной муфты.

Далее можно определить крутящий момент на вращающемся ведомом муфтой валу [14-16]. С учетом выражения (2) крутящий момент на вращающемся ведомом валу соединительной муфты будет равен

$$M_{кр} = \frac{\Omega_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H}. \quad (3)$$

Приравняв выражение (2) к выражению (3), получаем равенство

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} GJ_p = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{GJ_p}{H}, \quad (4)$$

где относительная величина $\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi = \Delta\varphi$ в правой части есть угол относительного поворота коаксиальных цилиндров муфты, выраженный в радианах.

Используя равенство (4), можно определить динамическую вязкость η исследуемой МРЖ в соединительной муфте:

$$\eta = \left(\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{GJ_p}{H} \right) \cdot \left(\frac{l}{2\pi F_{вр} Sr} \right) = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} \frac{l}{F_{вр} Sr}, \quad (5)$$

где $\Omega_{вр} = 2\pi F_{вр}$ – угловая скорость вращения; S – рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра ведомого вала муфты; l – зазор между внешним и внутренним воспринимающим цилиндром; η – вязкость МРЖ.

Заключение

Рассмотренный метод измерения торсионных моментов, возникающих на валах, соединенных магнитореологическими муфтами, электротехнических комплексов позволяет производить исследования рабочей жидкости с изменяющейся вязкостью на несколько порядков. Изменение вязкости МРЖ, заполняющей соединительную муфту, позволяет оценить степень надёжного сцепления ведущего и ведомого валов исполнительных механизмов с электротехническими комплексами.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. Шульман, З.П. Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
2. Борин, Д.Ю. Инженерное образование. Наука в образовании / Д.Ю. Борин, В.П. Михайлов, А.М. Базиненков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – №10. – 9 с.
3. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
4. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
5. Гордеев, Б.А. Применение магнитореологических жидкостей в машиностроении / Б.А. Гордеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 29–42.
6. Гордеев, Б.А. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – №7. – С. 32–38.
7. Морозов, Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2011. – 264 с.
8. Соловьев, С.Н. Особенности проектирования исполнительных органов механотронных

- систем с магнито-реологическими средами / С.Н. Соловьев, А.Н. Гурский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 8. – С. 145–149.
9. **Соловьев, С.Н.** Улучшение рабочих характеристик электромагнитных муфт / С.Н. Соловьев, А.Н. Гурский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 75–77.
 10. **Сизов, А.П.** Разработка и исследование магнито-жидкостных муфт / А.П. Сизов, Ю.И. Малков // Магнитные жидкости: научные и прикладные исследования: сб. науч. тр. - Минск, 1983. – С. 103–113.
 11. **Гордеев, Б. А.** К вопросу создания цилиндрического магнито-реологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – № 2. – С. 15–21.
 12. **Крутоголов, В.Д.** Ротационные вискозиметры / В.Д. Крутоголов, М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
 13. **Корганова, О.Г.** Ротационный вискозиметр / О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов / Вестник самарского государственного технического университета. Технические науки. Информационные технологии. – 2012. – №1 (33). – С 55–60.
 14. Частотный метод измерения крутящего момента вращающихся валов / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. 2015. – № 2. – С. 3–7.
 15. Частотный метод измерения деформации кручения на вращающихся валах машин и механизмов / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Надёжность и ресурс в машиностроении. – 2006. – Вып. 16. – С. 62–70.
 16. Пат. Способ определения крутящего момента / С. Н. Охулков. № 2196309 от 10.01.2003. Заявка № 2000110472 от 24.04.2004.
 17. **Викторов, В. А.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М.: Энергоиздат, 1989. – 208 с.
 18. **Ганзбург, Л. Б.** Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: справочник / Л. Б. Ганзбург, Л. А. И. Федотов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1980. – 364 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.07.2017*

Gordeev B.A.^{1,2}, Okhulkov S.N.^{1,2}, Osmekhin A.N.³, Plekhov A.S.²

**MEASUREMENT OF THE TORSION MOMENTS ON SHAFT
OF THE ELECTROTECHNICAL COMPLEXES CONNECTED
BY THE MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH, THE FREQUENCY METHOD**

Institute of problems of mechanical engineering of the Russian Academy of Sciences¹,
The Nizhny Novgorod state technical university of R. E. Alekseev²,
JSC Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering of I. I. Afrikantov³

Object of probe: – electrotechnical complexes

Purpose: probe of the torsion moments in the systems connecting electrotechnical complexes.

Results: the mode of measurement of the torsion moments by a frequency mode the Scope is developed: control systems of operation of the executive gears connecting electrotechnical complexes to the power setting generators and consumers.

Key words: magnetorheological transformer; magnetorheological liquid; throttle port; temporary magnet winding; the induced impulses; the internal steering magnetic field.