

ДРУГИЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК. 621.752.3

DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-10

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ И УГЛОВОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ ВЕДУЩЕГО И ВЕДОМОГО ВАЛОВ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ МУФТЫ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ¹

Ванягин Алексей Владимирович,

(Федеральный Исследовательский Центр Институт Прикладной Физики Российской Академии Наук,
г. Нижний Новгород)
e678xk@mail.ru

Гордеев Борис Александрович, Охулков Сергей Николаевич, Ермолаев Артем Игоревич,

(Институт проблем машиностроения Российской академии наук,
Филиал ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН», г. Нижний Новгород)

Титов Дмитрий Юрьевич

(Нижегородский Государственный Технический Университет
им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород)
dm_titov@list.ru

***Аннотация.** Измерение демпфирующих свойств и углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной магнитоэологической муфты (МР-муфты) являются наиболее актуальными задачами для энергоёмких мобильных объектов, таких как: дизель-генераторные установки на железнодорожном, речном и морском транспорте и других перемещающихся объектах, где по техническим условиям приходится часто осуществлять реверс исполнительных механизмов. Особенно часто эта проблема возникает при работе шаговых двигателей, управляемых по заранее заданной программе.*

***Ключевые слова:** Магнитоэологическая муфта, ведущий вал, ведомый вал, измерение крутящего момента, деформация кручения, крутильные колебания, генератор качающейся частоты.*

***Для цитирования:** Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Ермолаев А.И., Титов Д.Ю. Измерение демпфирующих свойств и углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной магнитоэологической муфты для мобильных транспортных средств//ТРАНСПОРТ: Наука, Техника, Управление. Научный информационный сборник. 2022. №7. С. 56-66. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-10.*

OTHER MODES OF TRANSPORT

Scientific article

MEASUREMENT OF DAMPING PROPERTIES AND ANGULAR MISMATCH OF THE DRIVESHAFT AND DRIVEN SHAFT OF THE MAGNETORHEOLOGICAL COUPLING OF MOBILE VEHICLES¹

Vanyagin Alexey V.,

(Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod)

Gordeev Boris A., Okhulkov Sergey N., Ermolaev Artem I.,

(Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Branch of "FRC IAP RAS", Nizhny Novgorod)

Titov Dmitriy.Yu.

(Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod)

***Abstract.** Measurement of damping properties and angular misalignment of the driveshaft and driven shaft of the connecting magnetorheological coupling (MR-coupling) are the most urgent tasks for energy-intensive mobile objects such as diesel generator sets on railway, river and sea transports and other mobile objects, where, according to technical conditions, it is often necessary to reverse the motors. This problem occurs especially often when stepper motors are operated according to a predetermined algorithm.*

***Keywords:** magnetorheological coupling, driveshaft, driven shaft, torque measurement, torsion deformation, torsional vibrations, oscillating frequency generator.*

***For citation:** Vanyagin A. V., Gordeev B. A., Okhulkov S. N., Ermolaev A. I., Titov D. Yu. Measurement of damping properties and angular mismatch of the driveshaft and driven shaft of the magnetorheological coupling of mobile vehicles//TRANSPORT: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection. 2022. № 7. P. 56-66. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-10.*

Введение

Рассмотрено измерение углового рассогласования муфты частотным методом [1] при помощи широкополосной частотной модуляции (ЧМ) генераторов качающейся частоты (ГКЧ). Приведена структурная схема измерительной системы измерения углового рассогласования соединительной МР-муфты (рис. 1) [1,2,3].

1. Системы измерения углового рассогласования ведущего и ведомого валов и демпфирующих свойств соединительной МР-муфты

В работе [1] рассмотрено измерение углового рассогласования муфты частотным методом при помощи широкополосной частотной модуляции (ЧМ) генераторов качающейся частоты (ГКЧ). Приведена структурная схема измерительной системы измерения углового рассогласования соединительной МР-муфты (рис. 1) [1,2,3]. Установлено, что при частотном методе измерения момента вращающихся валов, соединенных МР-муфтой наблюдается частотный сдвиг между опорным и смещенным частотно-модулированными сигналами (рис. 2) генераторов качающейся частоты (ГКЧ). Это происходит при угловом рассогласовании между соединёнными муфтой валами. Применяются два генератора: ГКЧ_о 1 – опорного сигнала (f_o) и ГКЧ_с 2 – смещённого сигнала (f_c) (рис. 1) [1-7].

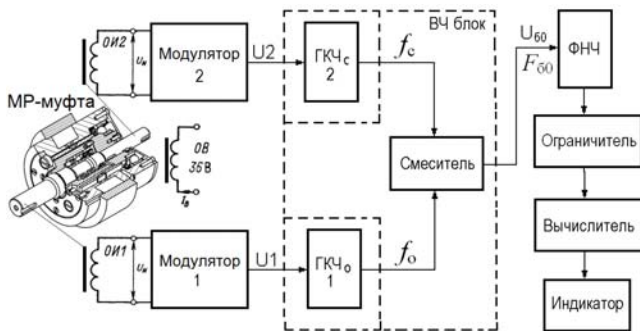


Рис. 1. Структурная схема измерителя угла относительного поворота ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ модуляцией

С вращающихся валов МР-муфты (рис. 1), с обмоток индуктивных датчиков ОИ 1 и ОИ 2 снимают равные частоты вращения валов $F_{вр}(t)$ ведущего 1 и ведомого 2, и подают на входы модуляторов 1 и 2. С выходов модуляторов модулирующие сигналы с частотами, равными частотам вращения валов $F_{вр}(t)$ подают на модуляционные входы ГКЧ_о 1 и ГКЧ_с 2 [1-7]. При сцеплении валов в МР-муфте возникает торсионный момент, измеряемый измерителем углового рассогласования при гармоническом законе модуляции ГКЧ (рис. 2) [1].

В результате смещения двух колебаний ЧМ-колебаний ГКЧ на входе смесителя образуются биения. Высоочастотные составляющие сигнала биений отфильтровываются фильтром низких частот (ФНЧ) [1-7,19].

На (рис. 2, а) средняя частота $f_o \gg \Delta f_m$, где $\Delta f_m = 20 \div 50$ МГц – девиация частоты. В обозначении девиации частоты ГКЧ нижний индекс указывает на широкополосную ЧМ модуляцию несущей частоты [1-7,19].

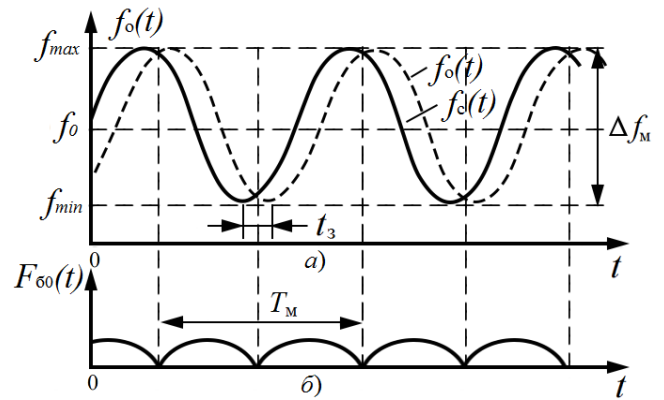


Рис. 2. Изменение частот опорного (f_o) и смещенного (f_c) частотно-модулированных сигналов ГКЧ (а) и частоты биений $F_{60}(b)$ в измерителе углового рассогласования

Частота смещенного во времени сигнала под действием углового рассогласования (рис. 2, а) соединительной муфты изменяется таким же образом, как и частота f_o опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания $t_3 = \Delta\varphi / \Omega_{вр}$ относительно частоты f_o (см. рис. 2, а) [1-7].

Скорость изменения частоты двух ГКЧ одна и та же. В результате смещения колебаний ГКЧ возникает биение с разностной частотой биений F_{60} .

Изменение частоты генераторов ГКЧ_о и ГКЧ_с по (рис. 2, а) составляет:

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

т.е. пропорциональна углу рассогласования муфты $\Delta\varphi$.

Разностная частота, при восходящих волнах (рис. 2): опорной и смещенной, будет равна

$$|\Delta f(t)| = |f_o(t) - f_c(t)| = |2\Delta f_m F_m t_3| = |F_{60}(t)|. \quad (2)$$

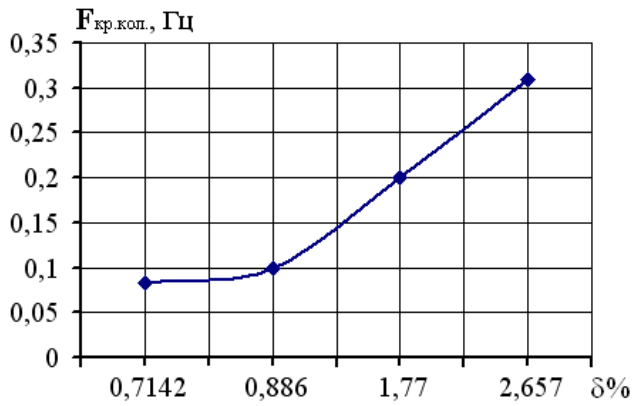
Частота биений, равна абсолютной разности частот сигналов ГКЧ [1-7].

Измерение частотного сдвига в измерителе углового рассогласования муфты основано на сравнении частоты опорного сигнала (от ГКЧ_о 1) и частоты смещенного сигнала (от ГКЧ_с 2). На выходе смесителя выделяется нулевая разностная частота биений F_{60} [1-7].

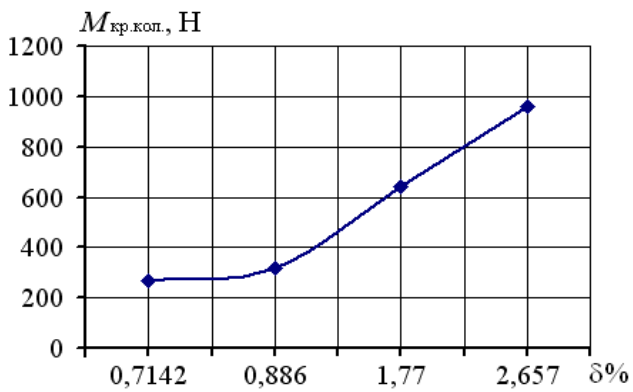
В работах [8-12] предложен метод оценки необходимых упругих и демпфирующих свойств соединительной муфты, основанный на определении отношения крутящих моментов на вращающемся ведомом валу ДГУ. По расчетным значениям крутящих моментов от крутильных колебаний на крайних участках ведомого и ведущего валов вычисляем отношение K_m от крутящих моментов $M_{кр.э.г.}$ и $M_{кр.кол.0,7}$:

$$K_m = M_{кр.э.г.} / M_{кр.кол.0,7}. \quad (3)$$

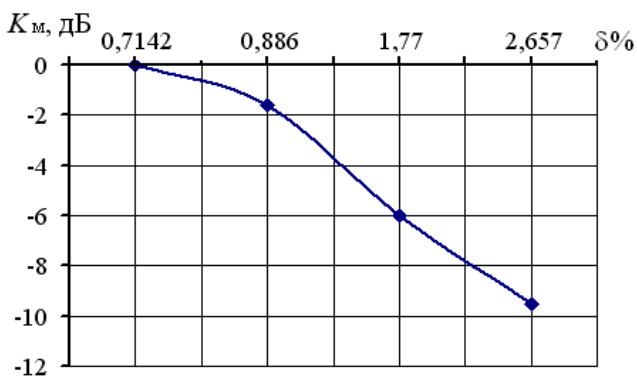
В работе получены расчётные зависимости частоты крутильных колебаний, крутящего момента коленчатого вала и коэффициента демпфирования соединительной муфты от степени неравномерности $\delta\%$ частоты вращения коленчатого вала дизеля 16ЧН26/26 ДГУ представлены на (рис. 3) [12].



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимости частоты крутильных колебаний (а); крутящего момента коленчатого вала (б); коэффициента демпфирования соединительной муфты (в) от степени неравномерности δ% частоты вращения вала дизеля 16ЧН26/26 ДГУ

Степень неравномерности δ частоты вращения коленчатого вала ДГУ определяется измерением отрезков времени τ, в течение которых происходит поворот коленчатого вала на заданный угол, а также определяется через отношение разности максимальной n_{max} и минимальной n_{min} частот вращения к средней частоте вращения n_{ср} коленчатого вала [12]:

$$\delta = (n_{\max} - n_{\min}) / n_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где размерность частот вращения n_{max}, n_{min} и n_{ср} коленчатого вала [об/мин].

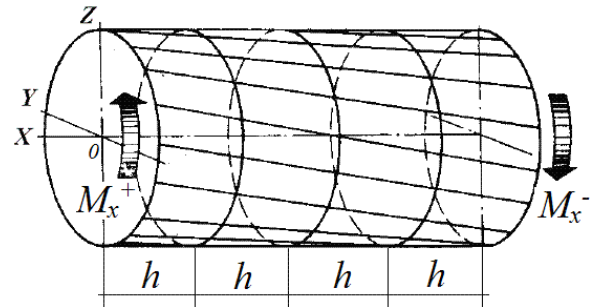
Полученные в работе соотношения предназначены для дальнейшего их применения при разработке изме-

рительной системы диагностики крутильных колебаний валов соединительной МР-муфты на базе частотного метода измерения фазовых сдвигов при помощи широкополосной частотной модуляции [1-7].

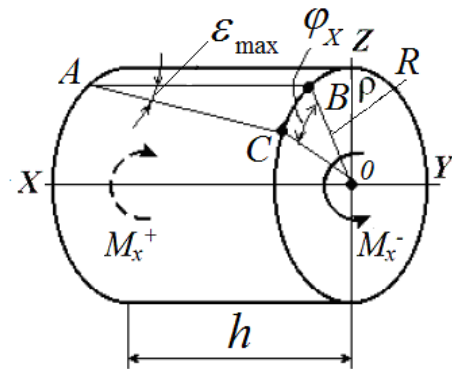
2. Диагностика крутящих моментов вращающихся ведущего и ведомого валов МР-муфты реализовано на основе метода конечных элементов

При измерении крутящих моментов вращающихся ведущего и ведомого валов соединительной МР-муфты применён оригинальный подход, основанный на расчёте и измерении максимальных деформаций сдвига и напряжений упругих вращающихся валов на основе метода конечных элементов [7-12,20,21].

Расчет максимальных деформаций сдвига и напряжений упругих вращающихся валов МР-муфты состоит в разбиении валов на единичные элементы длиной h с эквивалентной жёсткостью (рис.4, а, б), с последующим определением переменных крутящих моментов на её вращающихся ведущем и ведомом валах.



а)



б)

Рис. 4. Вращающийся ведущий вал, разбитый на элементы длиной h (а) и кручение одного элемента вращающегося ведущего вала (б) [7-12]

Допустим, что ведущий вал МР-муфты вращается с некоторой угловой частотой ω_{вр}, и при вращении при действии крутящих моментов M_x⁺ и M_x⁻ возникают крутильные колебания с частотой Ω_{кр}. Крутящие моменты M_x⁺ и M_x⁻ (рис.4, а, б) создают упругими напряжениями, моментами инерционных сил или моментами внешних сил по отношению к упругому вращающемуся ведущему валу МР-муфты. Считаем, что форма сечения ведущего вала не меняется [20,21]. В данном случае происходит только поворот сечений длиной h упругого ведущего вала МР-муфты на угол φ_x (рис.4, б). Ве-

личины закручивания элементов длиной h ведущего вала не остаются постоянными и равными φ_x , а изменяются с линейной скоростью $v_a = \Omega_{кр} \cdot r$ [7-12]. Таким образом, функция φ_x зависит только от координаты x и не зависит от координат y и z (рис. 4, а, б).

При диагностике крутящих моментов вращающегося ведущего вала МР-муфты проводят оценку деформаций сдвига ε_{\max} по его сечению при действии переменных крутящих моментов на валу M_x^+ и M_x^- (рис. 4, а). Здесь необходимо проводить вычисление перемещений всех точек вращающегося ведущего вала в любой текущий момент времени. И задача измерителя крутящих моментов состоит в измерении перемещений во времени во всех точках вращающихся валов МР-муфты.

Для этого вводится дискретизация по координате h и времени τ для вращающегося ведущего вала МР-муфты, т.е. выбираются шаги сетки h и τ , и разбивается область решения на дискретные элементы $h \times \tau$. Затем шаги сетки пронумеровываются [7-12,21].

Далее выбирается произвольный элемент круглого вращающегося ведущего вала с номером “ i ” и записывается уравнение его динамического равновесия в виде:

$$M_x^+ - M_x^- = J_m \frac{d^2 \varphi_x}{dt^2}, \quad (5)$$

где J_m – момент инерционных сил элемента (момент инерции элемента).

Крутящие моменты определяются через касательные напряжения [7-12,21]:

$$M_x^+ = \int_S \sigma_{i+0,5} r dS, \quad (6)$$

где r – расстояние элемента площади до центра вращающегося ведущего вала.

Касательные напряжения σ изменяются по поверхности S как по значению, так и по направлению. Значения напряжений σ определяют через углы поворота ϕ_x сечений ЧЭ [7-12,21]. Для этого, рассматривается кручение цилиндра, вырезанного из элемента вращающегося ведущего вала (рис.4, б).

Деформация сдвига определяется как $tg \alpha$

$$tg \alpha = \frac{(\varphi_{x,i+1} - \varphi_{x,i})r}{h}, \quad (7)$$

а касательные напряжения пропорциональны $tg \alpha$

$$\sigma = G r \frac{\varphi_{x,i+1} - \varphi_{x,i}}{h}, \quad (8)$$

где G – модуль сдвига материала ЧЭ измерительного вала.

При введении дискретизации по координате h и времени τ для вращающегося ведущего вала МР-муфты, время его закрутки определяется по формуле [7-12]:

$$T_{сж} = n \tau = (L/h) \tau. \quad (9)$$

В соответствии с [7-12] шаг сетки по времени

$$\tau = h \sqrt{\rho/G}. \quad T_{сж} = L \sqrt{\rho/G}. \quad (10)$$

Именно данные выражения (10) для шага сетки по времени и времени закрутки ведущего вала соответственно и используются для бесконтактного измерения крутящих моментов вращающегося ведущего вала МР-муфты.

Известно [7-12,21], что скорость распространения механических колебаний в твердых телах определяется из соотношения

$$V = \sqrt{E/\rho}, \quad (11)$$

где E – модуль упругости, ρ – плотность материала вращающегося вала.

Механические колебания в вращающегося вала являются волнами кручения, и они чистопоперечные и недисперсионные, то есть их скорость не зависит от длины волны [7-12,21]. Поэтому, если твердое тело закручивается, в нашем случае вращающийся ведущий вал МР-муфты, то скорость распространения механических колебаний в нём определяется из выражения

$$V = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E/[2\rho(1+\mu)]}, \quad (12)$$

где μ – коэффициент Пуансона.

Поэтому время закрутки вращающегося ведущего вала МР-муфты представляет собой отношение [7-12,21]:

$$T_3 = T_{сж} = L / V, \quad (13)$$

которое определяет время прохода ультразвуковой волны по длине ведущего вала МР-муфты и не зависит от скорости его закрутки v_a и, конечно, от выбранных шагов h и τ . Тогда максимальные деформации во всех элементах вращающегося ведущего вала МР-муфты получаются одинаковыми и равными [7-12,21]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{v_a \tau}{h} = v_a \sqrt{\frac{2\rho(1+\mu)}{E}} = \frac{v_a}{V}, \quad (14)$$

Максимальные деформации и напряжения вращающегося ведущего вала определяются выражением (14) и они не остаются постоянными и равными φ_x , а изменяются с линейной скоростью v_a , т.е. при приложении крутящих моментов максимальные деформации являются функциями $\varepsilon = f(v_a)$ и $\varepsilon = f(\Omega_{кр})$ при $v_a = \Omega_{кр} \cdot r$. Поэтому искомые величины являются и функциями частоты крутильных колебаний вращающегося ведущего вала МР-муфты [7,8].

Измерение крутящих моментов вращающегося ведущего вала соединительной МР-муфты осуществляется следующим образом:

На основе выражений для шага сетки по времени и времени закрутки вращающегося ведущего вала в состав измерителя крутящих моментов вводится измерительная схема, в которой шаг сетки по времени или время закрутки вращающегося ведущего вала заменяются временем задержки $t_3 = \tau = const$ в электронной (коаксиальной) линии задержки в измерительной схеме.

3. Измерительная схема для вращающегося ведущего вала МР-муфты, входящая в состав измерителя крутящих моментов

Измерительная схема для вращающегося ведущего вала МР-муфты представлена на (рис. 5, а).

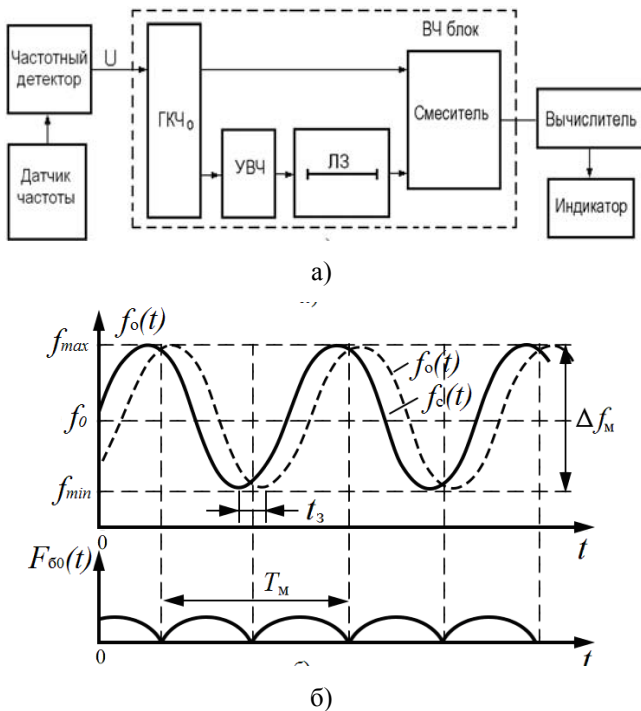


Рис.5. Измерительная схема для вращающегося ведущего вала МР-муфты, входящая в состав измерителя крутящих моментов

Измерение крутящих моментов вращающихся валов МР-муфты основано на применении измерительной системы, в которую входят:

Датчик частоты; модулятор-частотный детектор; опорный ГКЧ₀, частота модуляции которого изменяющейся с частотой крутильных колебаний вращающегося вала; широкополосный усилитель высокой частоты (УВЧ); коаксиальная линия задержки (ЛЗ), смеситель; вычислитель и индикатор [13,14].

На входы смесителя поступают два частотно-модулированных сигнала от ГКЧ₀, прямой и задержанный на время $t_3 = const$ (рис. 5, а) [13,14]. При этом частоты опорного сигнала (f_0) и смещенного (f_c) меняются во времени по гармоническому закону (рис. 5, б). В результате смешения (сложения) в смесителях двух прямых и задержанных колебаний ГКЧ₀ на выходе смесителя образуются биения (рис. 5, б). Заметим, что для ГКЧ₀ также их средняя частота $f_0 \gg \Delta f_m$, где Δf_m – девиация частоты (полоса качания) [1-7].

Измерение крутильных колебаний на вращающемся вале за один период исследуемого напряжения основано на сравнении опорных частот и смещенных частот сигналов ГКЧ₀ в смесителе, выделяющего нулевую разностную частоту $F_{60,кр}(t)$ [6,7]. Частота смещенного во времени сигнала от модулятора под действием крутильных колебаний изменяется таким же образом во времени, что и частота опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания $t_{3,1} = const$ относительно частоты опорного сигнала (рис. 5, б). При этом сдвиг фазы

задержанного частотно-модулированного высокочастотного напряжения от ГКЧ₀ остаётся постоянным $\Delta\varphi = \omega_{\nu} t_3 = const$. В результате смешения прямых и задержанных частотно-модулированных высокочастотных колебаний ГКЧ₀ на выходе смесителя образуются биения (рис. 5, б) [1-7]. Мгновенная частота биений равна абсолютному значению разностей мгновенных значений частот опорного и смещенного частотно-модулированных сигналов ГКЧ₀ $|F_{60}(t)| = |f_0(t) - f_c(t)|$, хотя формально можно учитывать знаки частот $F_{60}(t)$ (рис. 5, б).

Измеритель крутильных колебаний на вращающемся ведущем вале реализован следующим образом (рис. 5, а).

С датчика частоты вращения вала снимают частоту вращения вала $F_{вр}(t)$, поступающую на вход модулятора-частотного детектора.

Модулятор-частотный детектор выделяет напряжение, пропорциональное частоте и напряжению крутильных колебаний вращающегося вала. Выделенное напряжение крутильных колебаний в модуляторе усиливаются до амплитуды U с частотой $F_{кр}$. Данное напряжение U с выхода модулятора является модулирующим напряжением и поступает на модуляционный вход ГКЧ₀ для обеспечения периодической широкополосной частотной модуляции.

Далее, сформированные частотно-модулированные сигналы, а именно, опорный сигнал с ГКЧ₀ с частотой $f_0(t)$ и задержанный сигнал, за счёт коаксиальной линии задержки ЛЗ с постоянным временем задержки $t_3 = \tau = const$ с частотой $f_c(t)$ подаются на смеситель, где τ – шаг дискретизации по времени для вращающегося вала [1-7]. Вход коаксиальной линии задержки ЛЗ соединён с выходом широкополосного усилителя высокой частоты УВЧ, предназначенного для компенсации затуханий задержанного частотно-модулированного сигнала с ГКЧ₀. С выхода смесителя снимается разностный сигнал $u_{пр.с}$ с частотой биений $F_{60,кр}(t)$, пропорциональной частоте и амплитуде крутильных колебаний. Сигнал $u_{пр.с}$ поступает на вход фильтра низкой частоты ФНЧ с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{60,кр}$, соединенного с входом вычислителя крутящих моментов от крутильных колебаний.

Вычислитель вычисляет частоту биений $F_{60,кр}(t)$, поступающую с выхода смесителя, пропорциональную результирующим деформациям сдвига ϵ_{max} от действия торсионных моментов M_x^+ и M_x^- . Вычислитель подсчитывает только среднюю частоту биений за период модуляции ГКЧ₀ $T_m(t)$, и преобразует разностную частоту биений $F_{60,кр}(t)$ в значения деформации кручения упругого вращающегося вала. Результат вычисления деформации кручения упругого вращающегося вала в виде угловых единиц закрутки вала или в значениях торсионных моментов индицируется цифровым индикатором [1-7,13,14].

Представленный способ измерения крутящих моментов вращающегося ведущего вала МР-муфты реализован при помощи измерителя фазовых сдвигов по разностному сигналу биений. В измеритель фазовых сдвигов входят: опорный высокочастотный ГКЧ₀, частота модуляции которого изменяется с частотой крутильных

колебаний вращающегося вала; широкополосный УВЧ; коаксиальная линия задержки; смеситель; вычислитель с индикатором [7,13,14].

Для измерения крутящих моментов вращающегося ведомого вала МР-муфты применяется такая же измерительная схема, что и для вращающегося ведущего вала МР-муфты, входящая в состав измерителя крутящих моментов.

На (рис. 6) приведена структурная схема системы

диагностики крутильных колебаний валов соединительной МР-муфты ДГУ [13,14]. В основе измерительной системы диагностики соединительной МР-муфты лежит замена для контролируемых участков её валов их шагов дискретизации по времени τ на постоянные временные задержки t_{31} и t_{32} и двух коаксиальных линий задержки (ЛЗ) [15]. Шаги дискретизации по времени $\tau_{в.в.1}$, для ведущего и $\tau_{в.в.2}$ для ведомого валов муфты заменяются их эквивалентными аналогами.

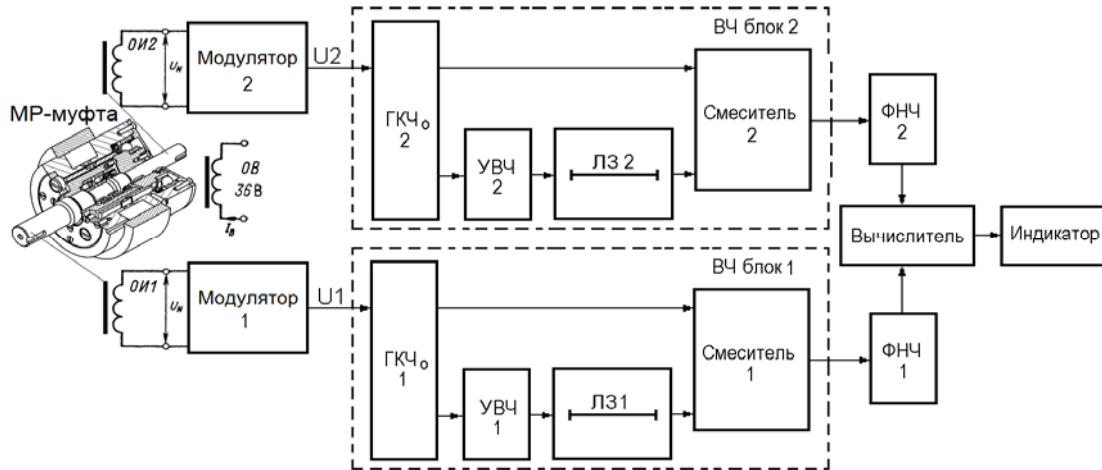


Рис. 6. Структурная схема измерителя крутильных колебаний на валах МР-муфты за один период исследуемого напряжения с широкополосной частотной модуляцией

В основе измерительной системы диагностики соединительной МР-муфты лежит замена для контролируемых участков её валов их шагов дискретизации по времени τ на постоянные временные задержки t_{31} и t_{32} и двух коаксиальных линий задержки (ЛЗ) [15]. Шаги дискретизации по времени $\tau_{в.в.1}$, для ведущего и $\tau_{в.в.2}$ для ведомого валов муфты заменяются их эквивалентными аналогами. Эквивалентными временными аналогами шагов дискретизации по времени координатной сетки валов муфты ДГУ являются постоянные временные задержки t_{31} и t_{32} коаксиальных линий ЛЗ [8-12].

Поэтому в статье и приведён способ измерения частотным методом торсионных моментов неравномерно нагруженных валов [6-8]. Именно этот способ измерения торсионных моментов можно применить и к вращающимся соединительным МР-муфтам с МРЖ, соединяющим валы исполнительных механизмов. Частотный измеритель крутящего момента (ИКМ) предназначен для бесконтактного измерения пороговых величин крутящих моментов на вращающихся валах МР-муфты [6-8].

Структурная схема измерителя крутящих моментов (ИКМ) и крутильных колебаний на ведущем и ведомом валах соединительных муфт представлена на (рис. 6). Модуляторы 1 и 2 – частотные (фазовые) детекторы (при коэффициенте частотной модуляции $m \ll 1$) выделяют крутильные колебания валов МР-муфты.

Измерение крутильных колебаний на вращающихся валах соединительной МР-муфты основано на применении двухканальной измерительной системы с модуляторами 1 и 2 -частотными детекторами, с двумя опорными ГКЧ_о, частотами модуляции изменяющихся с частотой крутильных колебаний ведущего и ведомого валов МР-муфты, двух широкополосных усилителей высокой частоты (УВЧ), двух коаксиальных линий задержки и двух смесителей [6-8,13].

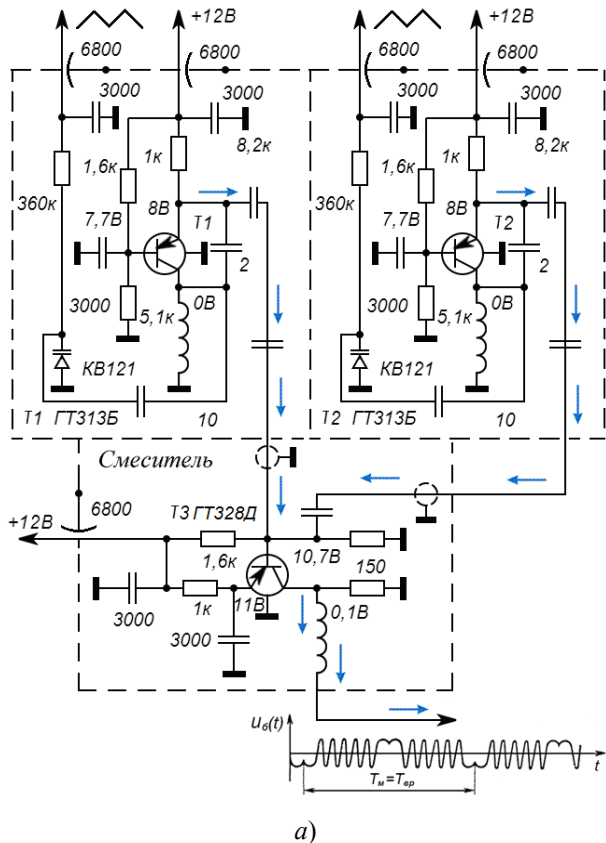
На входы смесителей поступают два частотно-модулированных сигнала от ГКЧ_о, прямой и задержанный на время $t_3 = const$ $t_{3,1} = \tau_{в.в.1}$ и $t_{3,2} = \tau_{в.в.2}$ относительно прямых сигналов от ГКЧ_о (рис. 6). Частоты опорных сигналов (f_0) и смещенных (f_c) изменяются во времени по гармоническому закону. В результате смешения (сложения) в смесителях двух прямых и задержанных колебаний ГКЧ_о на выходе смесителей образуются биения (рис. 6) и (рис.5, б).

Сформированные ЧМ сигналы, а именно, опорные сигналы с ГКЧ_{о1} и ГКЧ_{о2} с частотами $f_0(t)$ и задержанные сигналы, за счёт коаксиальных линий задержек ЛЗ с постоянными временами задержек $t_{3,1} = \tau_{в.в.1}$ и $t_{3,2} = \tau_{в.в.2}$ с частотами $f_c(t)$ подаются на смесители 1 и 2, где $\tau_{в.в.1}$ и $\tau_{в.в.2}$ шаги дискретизации по времени ведущего и ведомого валов МР-муфты [6-8,11-13].

Входы коаксиальных линий задержек ЛЗ1 и ЛЗ2 соединены с выходами широкополосных усилителей высокой частоты УВЧ1 и УВЧ2, предназначенных для компенсации затуханий задержанных частотно-модулированных сигналов с ГКЧ_{о1} и ГКЧ_{о2}. С выходов смесителей 1 и 2 снимаются разностные сигналы $u_{пр.с.1}$ и $u_{пр.с.2}$ с частотами биений $F_{601}(t)$ и $F_{602}(t)$, поступающие на входы фильтров низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2 с полосами пропускания, соединенные с первым и вторым входами вычислителя. Вычислитель (рис. 6) вычисляет отношение разностных частот биений $F_{601}(t)$ и $F_{602}(t)$ (отношение K_m крутящих моментов $M_{кр.1}$ и $M_{кр.2}$), пропорциональных крутильным колебаниям на ведущем вале 1 и ведомом вале 2 МР-муфты [6-8,11-13]. Результат вычисления деформации кручения валов муфты в виде угловых единиц закрутки или в значениях торсионных моментов индицируется индикатором.

4. Принципиальная схема ВЧ-блока измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ ГКЧ

Одним из основных узлов измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ является высокочастотный блок (ВЧ-блок), выполненный на базе двух ГКЧ и смесителя (рис. 7, а) [16-18].



Статическая модуляционная характеристика с высокой линейностью автогенератора на высокочастотном транзисторе ГТ313Б

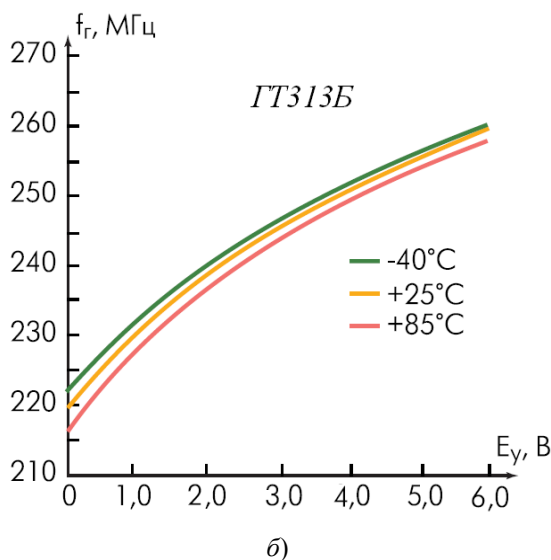


Рис. 7. Принципиальная схема ВЧ-блока измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ ГКЧ (а) и статическая модуляционная характеристика ГКЧ (б) [16-18]

Генераторы качающейся частоты генерируют колебания с широкополосной частотной модуляцией, т.е. при больших индексах модуляции $m \gg 1$. Сигнал опорного генератора качающейся частоты ГКЧ₀ на транзисторе Т1 поступает на вход 1 смесителя на транзисторе Т3.

Смещенный сигнал от ГКЧ_с на транзисторе Т2 поступает на вход 2 смесителя Т3 и запаздывает на время t_3 относительно сигнала ГКЧ₀ (рис. 2, а). В результате смешения двух колебаний ЧМ-колебаний ГКЧ на входе смесителя Т3 образуются биения [16-18].

С вращающихся валов МР-муфты (рис. 1), с обмоток индуктивных датчиков ОИ 1 и ОИ 2 снимают равные частоты вращения валов $F_{вр}(t)$ ведущего 1 и ведомого 2, и подают на входы модуляторов 1 и 2. С выходов модуляторов модулирующие сигналы с частотами, равными частотам вращения валов $F_{вр}(t)$ подают на модуляционные входы ГКЧ₀ 1 и ГКЧ_с 2 [6]. Модулирующие сигналы с индуктивных датчиков ОИ 1 и ОИ 2 для ГКЧ₀ 1 и ГКЧ_с 2 в модуляторах 1 и 2 формируются по закону симметричной треугольной пилы для обеспечения на выходе смесителя равномерной амплитуды разностной частоты биений [6-8].

Генераторы качающейся частоты выполняются на базе транзисторных автогенераторов (АГ) благодаря ряду достоинств: быстрой перестройке частоты, малому потреблению мощности, малой массе и малым габаритам, высокой надежности [16-18]. Одной из основных задач при проектировании АГ с электронной перестройкой частоты является реализация широкого диапазона перестройки с высокой линейностью статической модуляционной характеристики АГ (рис. 7, б). Современные транзисторы способны обеспечить широкие полосы качания частоты в диапазоне 200 ÷ 300 МГц [16-18].

5. Принципиальная схема ВЧ-блока измерителя крутильных колебаний ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ ГКЧ

На (рис. 8) приведена принципиальная схема ВЧ-блока пиковых значений переменных напряжений ИО БМП за один период исследуемого напряжения с помощью широкополосной ЧМ ГКЧ [17-19].

В схеме ВЧ-блока применена схема маломощного ГКЧ – АГ на транзисторе ГТ313Б и варикапе КВ121 и схема транзисторного смесителя СВЧ колебаний на транзисторе ГТ328Д [17,18]. Величина перестройки частоты составляет 15-20% [17,18]. Частота колебаний такого АГ лежит в диапазоне 220...260 МГц. Девиация частоты 20 МГц (рис. 7, б).

Для компенсации затуханий задержанного ЧМ-сигнала с ГКЧ₀ 1 в ВЧ-блоке (рис. 8) применены два каскада широкополосных усилителей СВЧ с низким коэффициентом усиления (около 10 дБ) на последовательно-параллельных транзисторных парах [18,19]. Фотография ВЧ-блока приведена на (рис. 9, а).

В качестве линии задержки широкополосных ЧМ-сигналов СВЧ от каждого ГКЧ₀ в ВЧ-блоке применена 10-метровая бухта коаксиального кабеля РК-50-4-11 (рис.9, б) с входным и выходным сопротивлениями в 50 Ом для формирования режима бегущих волн [15,17]. При длине кабеля в 1 метр время задержки широкополосных ЧМ-сигналов СВЧ составляет около 3,5 нс.

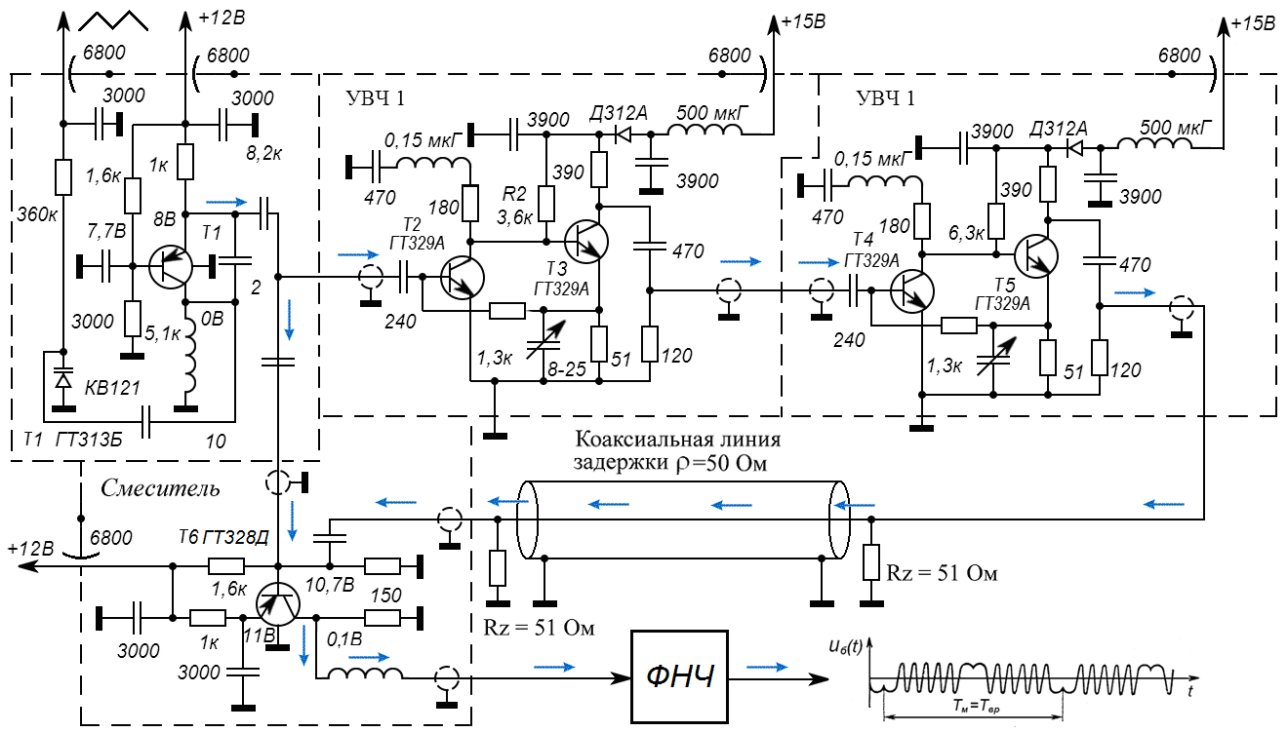


Рис. 8. Принципиальная схема ВЧ-блока измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ ГКЧ [16-18]



а)



б)

Рис.9. Фотографии ВЧ-блока измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов МР-муфты с широкополосной ЧМ ГКЧ (а) и бухты коаксиального кабеля РК-50-4-11 (б) [16-18]

При подаче на модуляционный вход ГКЧ с девиацией частоты в 10 МГц с выхода модулятора гармонического модулирующего напряжения с частотой 10 Гц при времени задержки 0,07 мкс (отрезок кабеля РК-50-4-11 в 0,21 метр) на выходе смесителя и выходе ФНЧ выделяется сигнал биений частотой 14 Гц.

Осциллограмма сигнала биений при гармоническом модулирующем напряжении ГКЧ показана на (рис. 10). Число переходов через ноль $n_{т1} = 14$.

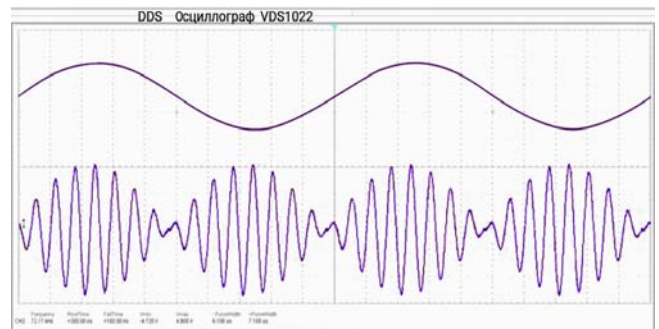


Рис. 10. Осциллограмма сигнала биений при $n_{т1} = 14$ за период модуляции с частотой 10 Гц при гармоническом модулирующем напряжении ГКЧ

Осциллограмма сигнала биений на выходе ФНЧ при симметричном пилообразном модулирующем напряжении ГКЧ, сформированном в модуляторе, при числе импульсов $n_t = 8$ за период модуляции, снятая с экрана двух лучевого цифрового осциллографа показана на (рис. 11).

В измерителе крутильных колебаний для ведущего и ведомого валов соединительной МР-муфты необходимо наличие двух ВЧ-блоков, построенных по (рис. 8) для каждого из вращающихся валов МР-муфты.

При подаче на модуляционный вход ГКЧ с девиацией частоты в 20 МГц симметричного пилообразного модулирующего напряжения с частотой 10,0 Гц при времени задержки 0,07 мкс на выходе смесителя и выходе ФНЧ выделяется сигнал биений частотой 28,0 Гц. Число переходов через ноль 28 (рис. 12).

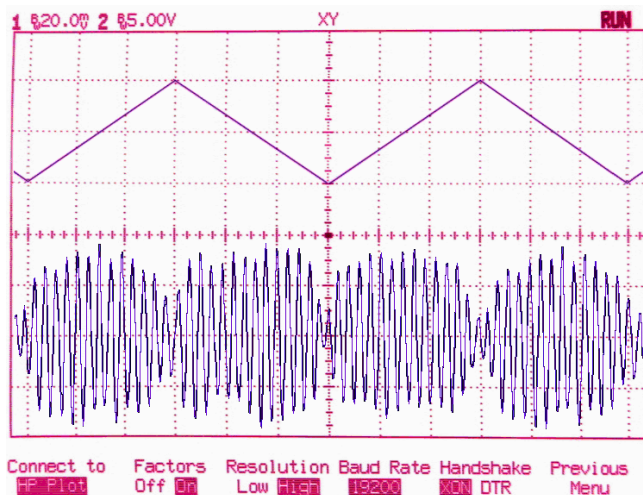


Рис. 10. Оциллограмма сигнала биений при $n_t = 28$ на выходе ФНЧ при симметричном пилообразном модулирующем напряжении ГКЧ

Оциллограмма сигнала биений на выходе ФНЧ при симметричном пилообразном модулирующем напряжении ГКЧ при числе импульсов $n_t = 28$ за период модуляции, снятая с экрана двух лучевого цифрового осциллографа показана на (рис. 9). На оциллограмме сигнала биений (рис. 9) наблюдаются искажения, что объясняется только тем, что ГКЧ работает на нелинейном участке своей модуляционной характеристики (рис. 5, б)

По измеренным частотам сигналов биений, снимаемых с входов фильтров низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2 (рис. 6) вычисляются значения крутящих моментов от крутильных колебаний на измерительных участках ведомого и ведущего валов МР-муфты и определяется их отношение K_M .

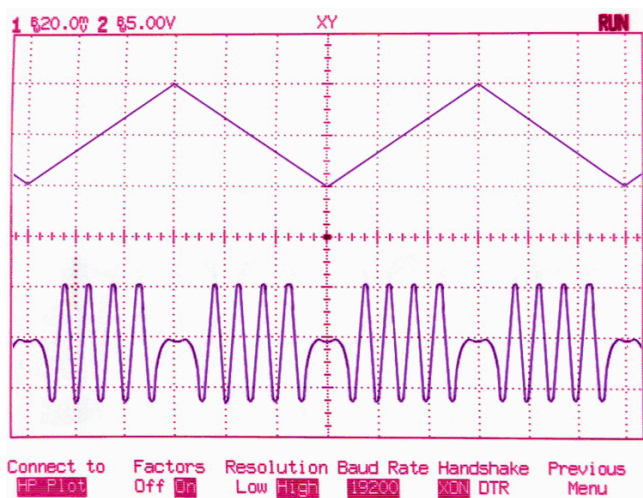


Рис. 11. Оциллограмма сигнала биений при $n_t = 8$ на выходе ФНЧ при симметричном пилообразном модулирующем напряжении ГКЧ

Заключение

В работе применен новый подход в построении измерительных выходных схем МР-муфты, основанный на новых технических решениях и методах, и реализованный с применением измерителя фазовых сдвигов сигналов СВЧ генераторов качающейся частоты с широкополосной частотной модуляцией и смещения данных сигналов в смесителях на нулевой разностной промежуточной частоте. Предложенные топологии измерительных выходных схем МР-муфты могут найти применение в практике при построении измерительных систем контроля торсионных моментов и демпфирующих свойств МР-муфты.

Рассмотренный новый подход в построении измерительных выходных схем МР-муфты предназначен для бесконтактной оценки условий эксплуатации электрических машин при диагностике состояния рабочих валов силовых установок на судах морского и речного флота, компрессоров, насосов АЭС в реальном масштабе времени без применения торсиографирования и тензометрирования на вращающихся объектах¹.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

Список источников

1. 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". № 9. 2018 г. С 8-13.
2. Беляев Е.С., Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н. Метрологические характеристики частотного метода измерения вязкости магнитореологических жидкостей в ротационном вискозиметре // Вестник машиностроения. – 2020. – №10. – С. 47-56.
3. Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н. Измерение вязкости неньютоновской жидкости в ротационном вискозиметре частотным методом // Вестник научно-технического развития. 2020. № 2 (150). С. 10-25.
4. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Плехов А.С. Измерение торсионных моментов на валах электромеханических комплексов, соединённых магнитореологической муфтой частотным методом. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 3. С. 65-70.
5. Частотный метод измерения крутящего момента вращающихся валов. / Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Бугайский В.В., Горсков В.П. // "Вестник машиностроения". № 2. 2015 г. С.3-7.
6. Охулков С. Н. Патент на изобретение «Способ определения крутящего момента», RU №2196309 С2. Заявка № 2000110472/28 от 24.04.2000 г. Опубликовано 10.01. 2003 г. Бюл. №1.
7. Sergei Dmitriev, Andrey Daryenkov, Leonid German, Boris Gordeev, Sergei Okhulkov, Alexander Serebryakov. Torque sensors calibration of electromechanical complexes shafts// JVI International is the Publisher of International Research Journals and the Organizer of International Conferences. 13-14. 12.2018. pp. 231-236.

¹ © Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Ермолаев А.И., Титов Д.Ю. 2022.

8. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Шохин А.Е. Снижение виброперегрузок возбуждаемых вращающимися валами в переходных режимах. // "Вестник машиностроения". № 2. 2018 г. С.9 - 15.

9. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Корендяев Г.К. Оценка упругих и демпфирующих свойств соединительной магнитоэологической муфты вращающихся валов // "Вестник машиностроения". № 5. 2018 г. С.9-15.

10. Ваягин А. В., Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н. Снижение интенсивности крутильных колебаний валов с использованием магнитоэологических муфт// Вестник научно-технического развития. № 1 (149), 2020 г. С 11-22.

11. Ермолаев А.И., Охулков С.Н., Плеков А.С., Титов Д.Ю. Методика оценки виброперегрузок вращающихся валов электрических машин. // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб.ст. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2016. – С. 65 - 70.

12. Охулков С.Н., Плеков А.С., Титов Д.Ю., Шевырев Ю.В. Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография; Нижний Новгород. Нижегород. гос. техн. у-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 254 с.

13. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Кралин А.А., Ермолаев А.И. Измерение пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток магнитоупругих датчиков крутящего момента с помощью широкополосной частотной модуляции генераторов качающейся частоты// Интеллектуальная электротехника./ Сборник научно-технических статей. ИНЭЛ, НГТУ Р.Е. Алексеева. 2019 №4. С. 100-111.

14. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Дарьенков А.Б., Плеков А.С., Бугайский В.В. Способы снижения погрешностей магнитоупругих датчиков крутящего момента вращающихся валов машин //Прикладная механика и технологии машиностроения: сборник научных трудов / под ред. В.И. Ерофеева, В.Н. Перевезенцева и С.И.Смирнова. - Нижний Новгород: Изд. „Интелсервис“, 2014, № 1 (23). С. 142-1167.

15. Сапожников, Д.В. Методика расчёта линии задержки частотного дискриминатора // Россия молодая: Сер. передовые технологии - в промышленность. 2017. № 1. С. 280-282.

16. Ред, Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: Схемы, блоки, 50-омная техника [под ред. Ю.А. Лурье]. – М.: Изд-во Мир, 1990. – 256 с.

17. Белов Л.А. Компоненты синтезаторов стабильной частоты. Генераторы, управляемые напряжением. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. Изд. РИЦ «Техносфера» 1/2004. С. 42-46.

18. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособ. / Л.А. Белов – М.: Издательский дом МЭИ.2010. – 320 с.

19. Викторов, В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков – М.: Энергоиздат, 1989 — 208 с.

20. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений/ Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.И. Полухин, Н.А. Чиченев. Справочное пособие. Киев «Наукова думка» 1981. 584 с.

21. Маквцов Е. Н., Тартаковский А. М. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1993.-200 с.

References

1. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Plekhov A.S., Shokhin A.E. Measurement by the frequency method of the torsion moment on the driven shaft connected by a magnetorheological coupling to the driveshaft, *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2018, vol. 9, pp. 8-13.

2. Belyaev E.S., Vanyagin A.V., Gordeev B.A., Erofeev V.I., Okhulkov S.N. Metrological characteristics of the frequency method of measuring the viscosity of magnetorheological fluids in a rotary viscometer, *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2020, vol. 10, pp. 47-56.

3. Vanyagin A.V., Gordeev B.A., Erofeev V.I., Okhulkov S.N. Measurement of viscosity of a non-Newtonian fluid in a rotary viscometer by the frequency method, *Bulletin of Scientific and Technical Development*. 2020, vol. 2 (is. 150), pp. 10-25.

4. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Osmekhin A.N., Plekhov A.S. Measurement of torques on the electromechanical complexes shafts connected by a magnetorheological coupling by the frequency method, *NNSTU n.a. R.E. Alekseev Proceedings*. 2017, vol. 3, pp. 65-70.

5. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Plekhov A.S., Bugayskiy V.V., Gorskov V.P. Frequency method of measuring the torque of rotating shafts, *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2015, vol. 2, pp. 3-7.

6. Okhulkov S.N., Patent for the invention "Method for torque determining", RU 2196309 C2. Application No. 2000110472/28 dated 04/24/2000, published 10.01.2003, Bul. No. 1.

7. Dmitriev S., Daryenkov A., German L., Gordeev B., Okhulkov S., Serebryakov A. Torque sensors calibration of electromechanical complexes shafts, *JVI International is the Publisher of International Research Journals and the Organizer of International Conferences*. Dec. 13-14, 2018. pp. 231-236.

8. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Osmekhin A.N., Shokhin A.E. Reduction of vibration loads excited by rotating shafts in transient modes. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2018, vol. 2, pp. 9-15.

9. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Osmekhin A.N., Korendyasev G.K. Evaluation of elastic and damping properties of the coupling magnetorheological coupling of rotating shafts, *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2018, vol. 5, pp. 9-15.

10. Vanyagin A.V., Gordeev B.A., Erofeev V.I., Okhulkov S.N. Reduction of the intensity of torsional vibrations of shafts using magnetorheological couplings, *Bulletin of Scientific and Technical Development*. 2020, vol. 1 (is. 149), pp. 11-22.

11. Ermolaev A.I., Okhulkov S.N., Plekov A.S., Titov D.Yu. Methods of evaluation of vibration loads of rotating shafts of electric motors. // *Actual problems of electric power industry: coll. of pap., NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, N. Novgorod, 2016, pp. 65-70.

12. Okhulkov S.N., Plekhov A.S., Titov D.Yu., Shevyrev Yu.V. *Methods and devices for vibration attenuation of electromechanical complexes*, NNSTU n.a. R.E. Alekseev, N. Novgorod, 2016.

13. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Kralin A.A., Ermolaev A.I. Measurement of peak values of variable voltages of measuring windings of magnetoelastic torque sensors using broadband frequency modulation of oscillating frequency generators, *Smart Electrical Engineering*, 2019 vol. 4, pp. 100-111.

14. Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Darienkov A.B., Plekhov A.S., Bugaisky V.V. Ways to reduce errors of magnetoelastic torque sensors of rotating machine shafts, *Applied Mechanics and engineering technologies: a collection of scientific papers*, 2014, vol. 1 (is. 23). pp. 142-167.

15. Sapozhnikov D.V. Methodology for calculating the delay line of the frequency discriminator, *Young Russia: Ser. advanced technologies - in industry*. 2017. vol. 1. pp. 280-282.

16. Ed. E. *Reference manual on high-frequency circuitry: Schemes, blocks, 50-ohm technology* [ed. by Yu.A. Lurie], Publishing House "Mir", Moscow, 1990.

17. Belov L.A. *Components of synthesizers of stable frequency. Voltage-controlled generators. Electronics: Science, Technology, Business*. Publishing House "Technosphere", Moscow, 2004.

18. Belov L.A. *Devices for generating microwave signals and their components: textbook*. Publishing house of MEI, Moscow, 2010.

19. Viktorov V.A., Lunkin B.V., Sovlukov A.S. *Radio wave measurements of technological process parameters*. Publishing house "Energoizdat", Moscow, 1989.

20. Kasatkin B.S., Kudrin A.B., Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Polukhin P.I., Chichenev N.A. *Experimental methods for studying deformations and stresses* [handbook]. "Naukova dumka", Kiev, 1981.

21. Makvetsov E.N., Tartakovskiy A.M. *Mechanical effects and protection of electronic equipment* [textbook]. Radio and Communications, Moscow, 1993.

Сведения об авторах

Ванягин Алексей Владимирович - ведущий электроник;

Гордеев Борис Александрович - доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории волновой динамики и виброзащиты машин ИПМ РАН, профессор кафедры «Электрооборудования, электропривода и автоматики»;

Охулков Сергей Николаевич - кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и виброзащиты машин, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника»;

Ермолаев Артем Игоревич - кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории волновой динамики и виброзащиты машин;

Титов Дмитрий Юрьевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудования, электропривода и автоматики».

Information about the authors

Vanyagin A.V. – Leading Electronics Engineer;

Gordeev B.A. – Doctor (Tech.), Professor; Chief Researcher of the Laboratory of Wave Dynamics and Vibration Protection of Machines of the IPM RAS, Professor of the Department of Electrical Equipment, Electric Drive and Automation;

Okhulkov S.N. – PhD (Ph. & Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Wave Dynamics and Vibration Protection of Machines, Associate Professor of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering;

Ermolaev A.I. – PhD (Tech.), researcher at the Laboratory of wave dynamics and vibration protection of machines;

Titov D. Yu. – PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of "Electrical Equipment, electric drive and Automation".

Статья поступила в редакцию 14.03.2022, одобрена после рецензирования 28.04.2022, принята к публикации 11.05.2022.

The article was submitted 14.03.2022, approved after reviewing 28.04.2022, accepted for publication 11.05.2022.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contribution: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.