

УДК.621.752.3

Б.А. Гордеев ^{1,2}, С.Н. Охулков ^{1,2},
А.А. Кралин ², А.И. Ермолаев ^{1,2}

ИЗМЕРЕНИЕ ПИКОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОБМОТОК МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ

¹Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»

²Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Применен новый подход в построении измерительных выходных схем бесконтактных магнитоупругих преобразователей (БМП), основанный на новых технических решениях и реализованный при помощи измерителя фазовых сдвигов и измерителя пиковых значений напряжений с широкополосной частотной модуляцией (ЧМ) генераторов качающейся частоты (ГКЧ) на нулевой промежуточной частоте. Особенность метода состоит в том, что на основании сигналов измерительных обмоток (ИО) БМП в ГКЧ формируются опорные высокочастотные сигналы с частотами, пропорциональными измеренным напряжениям. Эти опорные сигналы сравниваются со смещенными, полученными посредством задержки опорного сигнала, в блоке-смесителе, выделяющего разностную частоту – низкочастотный сигнал биений. Показано, что разность частот биений пропорциональна разности напряжений измерительных обмоток БМП, следовательно, измерительные схемы на основе ГКЧ могут быть использованы при оценке углов закрутки валов. Более того, в такой измерительной схеме нет снижения точности из-за высокочастотных помех, фазового сдвига напряжений на ИО, несимметрии магнитной цепи, колебаний питающего напряжения.

Ключевые слова: бесконтактный магнитоупругий преобразователь, генератор качающейся частоты, датчик момента, деформация кручения вала, измерительные выходные схемы, упругий вал, частота биений, частотная модуляция.

I. Магнитоупругие бесконтактные датчики крутящего момента

Для технологического контроля и автоматизации многих рабочих машин требуется измерять крутящие моменты на вращающихся валах. Решение этой задачи усложняется необходимостью передачи результата измерения с подвижного вала в неподвижное измерительное устройство.

Из большого числа различных средств измерения крутящего момента [1-3] наиболее просто решают указанные задачи бесконтактные магнитоупругие преобразователи (БМП) крутящего момента (рис. 1), включающие в себя первичный бесконтактный магнитоупругий преобразователь и выходную схему.

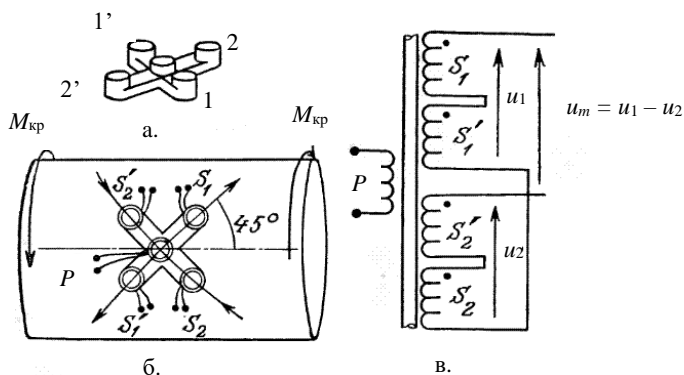


Рис. 1. Магнитоупругий бесконтактный датчик крутящего момента: форма стержней магнитопровода обмоток (а); силовая схема (б); электрическая схема (в)

Действие БМП основано на магнитоупругом эффекте, проявляющемся в изменении магнитной проницаемости чувствительного ферромагнитного элемента под воздействием механических напряжений. В большинстве конструкций БМП чувствительным элементом (ЧЭ) служит участок контролируемого вала, механические напряжения в котором возникают при приложении к валу крутящего момента [4-7].

Для того, чтобы воспринять изменения магнитной проницаемости материала вала, в нем с помощью возбуждающего электромагнита создается переменное электромагнитное поле. При изменении магнитной проницаемости вала электромагнитное поле в нем деформируется: изменяются ЭДС, индуцируемые в катушках измерительных электромагнитов БМП. Разность этих ЭДС пропорциональна величине приложенного момента. Возбуждающий (ВЭ) и измерительные электромагниты (ИЭ) устанавливаются неподвижно относительно вращающегося вала (рис. 1) [1-3,8].

Всякое усилие, приложенное к ферромагнитному материалу, вызывает изменение его магнитной проницаемости μ , которая растет в областях растяжения материала и убывает в областях сжатия. Если на ферромагнитный цилиндрический вал действует момент, ось которого совпадает с осью вала, то возникающие напряжения определяют на его поверхности два взаимно перпендикулярных направления под углом $\pm 45^\circ$ к оси вала, вдоль

которых изменение магнитных проницаемостей μ_1 и μ_2 максимально и противоположно по знаку (рис. 1).

Для выявления этих изменений используется стержневой магнитопровод крестообразной формы (рис. 1, а), несущий первичную обмотку P и две пары соединенных последовательно вторичных обмоток S_1 и S'_1 , S_2 и S'_2 (рис. 1, б). Это обеспечивает взаимодействие между первичной и вторичными обмотками. Если момент на валу отсутствует, то магнитные проницаемости ферромагнитного вала $\mu_1 = \mu_2$, и напряжения измерительных обмоток электромагнитов БМП $u_1 = u_2$, $u_m = 0$. В примере, приведенном на (рис. 1), магнитные проницаемости ферромагнитного вала $\mu_1 > \mu_2$, и напряжения измерительных обмоток электромагнитов БМП $u_1 > u_2$, $u_m > 0$.

По расположению полюсов ИЭ относительно соседних полюсов ВЭ преобразователи подразделяются на симметричные и несимметричные. По числу полюсов ВЭ преобразователи разделяются на двухполюсные – крестовые или перекрестные и многополюсные – кольцевые [2,3,9-15].

II. Выходные схемы магнитоупругих датчиков крутящего момента

Любому крутящему моменту M , приложенному к контролируемому валу, соответствует механическое напряжение σ на поверхности ЧЭ – вала [3,8]. Поэтому, для каждого значения σ ЭДС катушки ИЭ определяется через соответствующую величину магнитного потока $\Phi_{и}$ по известному соотношению:

$$E_{и} = 2 \cdot \pi \cdot f_{в} \cdot \Phi_{и} \cdot N_{и}, \quad (1)$$

где $2 \cdot \pi \cdot f_{в} = \omega_{в}$ – угловая частота переменного электромагнитного поля в ЧЭ; $N_{и}$ – число витков катушки ИЭ.

Магнитный поток, проходящий через полюс ВЭ при частоте возбуждения $f_{в}$, числе витков катушки ВЭ и напряжении на катушке $U_{к}$, обусловлено напряжением питания $U_{в}$ и схемой соединения катушек, определяется как:

$$\Phi_{и} \approx \frac{U_{к}}{2 \cdot \pi \cdot f_{в} \cdot N_{в}}. \quad (2)$$

Магнитный поток, проходящий через полюс ИЭ много меньше магнитного потока в зазоре, т.е., $\Phi_{и} \ll \Phi_{з}$. Магнитный поток $\Phi_{з}$ в зазоре однозначно связан с потоком в вале $\Phi_{в} = k_N \cdot \Phi_{в}$. Значения коэффициента k_N принимаются: в кольцевом БМП $k_N = 2$, в крестовом $k_N = 1$. Магнитный поток в полюсе ВЭ:

$$\dot{\Phi}_n = \dot{\Phi}_z + k_N \cdot \dot{\Phi}_p, \quad (3)$$

где Φ_p – поток рассеяния, который не проходит в поверхность ЧЭ – вала.

При приложении к контролируемому валу крутящего момента M величина магнитного потока Φ_n изменяется обратно пропорционально магнитному сопротивлению зазора между поверхностью ЧЭ – вала и полюсом ИЭ и магнитному сопротивлению полюса ИЭ [2,3].

Особенностью БМП крутящего момента является получение информации в виде переменного напряжения, которое используется далее в выходных схемах, реализующих его выпрямление, фильтрацию и усиление. Получение информации в виде переменного напряжения в выходных схемах БМП влечет за собой ряд недостатков. При изменении крутящего момента в БМП происходит изменение фазы выходных напряжений измерительных электромагнитов $U_{\text{вых}}$, что вызвано изменением магнитных потоков (рис. 2).

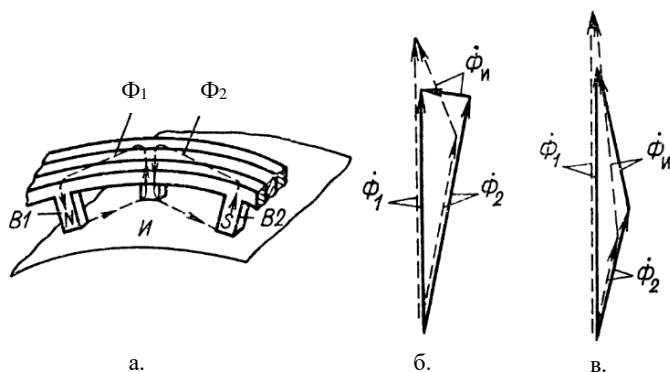


Рис. 2. Магнитные потоки через измерительный полюс магнитоупругого преобразователя: внешний вид БМП (а); векторная диаграмма для симметричного БМП (б); для несимметричного БМП (в)

Поток Φ_n через измерительный полюс И равен разности потоков Φ_1 и Φ_2 , создаваемых порознь полюсами возбуждения В1 и В2 кольцевого преобразователя (рис. 2, а). При несимметрии магнитной цепи преобразователя потоки Φ_1 и Φ_2 отличаются не только по величине, но и по фазе (рис. 2, б). При наличии момента на валу происходит изменение указанных потоков, например, Φ_1 увеличивается, а Φ_2 уменьшается, при этом, как видно из (рис. 2, б), изменяется не только амплитуда, но и фаза результирующего потока Φ_n [2,3].

В выходных схемах БМП на выпрямительных диодных мостах переменного тока частотой 50 Гц сравниваются выпрямленные напряжения измерительных обмоток $U_{и1}$ и $U_{и2}$ кольцевого БМП (рис. 3) [2,3].

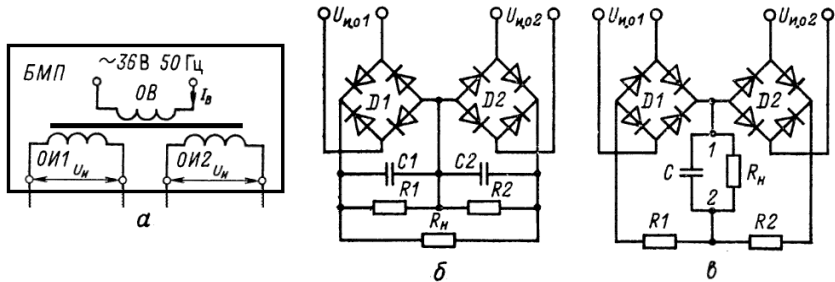


Рис. 3. Измерительные схемы:

электрическая схема обмоток возбуждающих и измерительных электромагнитов БМП (а); электрическая схема сравнения напряжений (б); электрическая схема сравнения токов (в)

В первом случае (рис. 3, б) напряжения измерительных обмоток выпрямляются диодными мостами $D1$ и $D2$, сглаживаются емкостным фильтром $C1$, $C2$ и подаются на балластные резисторы $R1$, $R2$. Нагрузка R_n включается на разность выпрямленных напряжений.

Во втором случае при приложении к валу момента потенциалы точек 1 и 2 (рис. 3, в) изменяются, и, следовательно, изменяется и напряжение на нагрузке R_n . Пульсации выходного напряжения сглаживаются емкостным фильтром. Нуль выходного напряжения при $M = 0$ устанавливается подбором сопротивлений резисторов $R1$, $R2$, а амплитуда – выбором R_n .

При отсутствии момента нагрузки среднее значение выходных напряжений $U_{вых} = U_{и1} - U_{и2}$ равно нулю (рис. 4, а). При приложении момента появляется пропорциональная ему постоянная составляющая напряжения $U_{вых}$ (рис. 4, б).

Сдвиг по фазе между $U_{и1}$ и $U_{и2}$ приводит к появлению пульсаций выходного сигнала, величина которых остается постоянной при изменении момента на валу. При приложении крутящего момента $U_{и1}$ и $U_{и2}$ изменяются по амплитуде лишь на несколько процентов, поэтому величина указанных пульсаций по амплитуде может в несколько раз превышать величину полезного сигнала (постоянную составляющую $U_{вых}$).

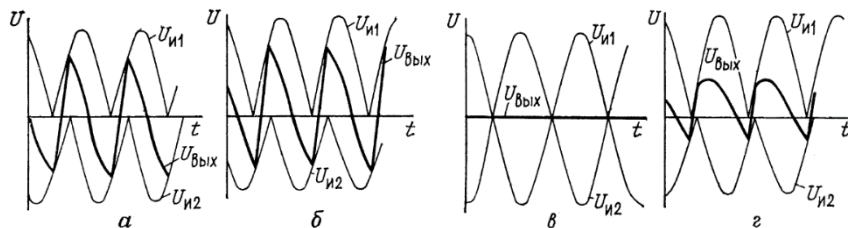


Рис. 4. Сравнение напряжений измерительных обмоток кольцевого БМП: при отсутствии момента и с фазовым сдвигом УИП (а); при приложении момента и с фазовым сдвигом УИП (б); при отсутствии момента и без фазового сдвига УИП (в); при приложении момента и без фазового сдвига УИП (г)

При отсутствии сдвига по фазе и $M = 0$ пульсации $U_{\text{вых}}$ отсутствуют (рис. 4, в). Приложение к валу момента вызывает появление пульсаций выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ ИО кольцевого БМП на частоте $2 \cdot \omega_{\text{в}}$ (рис. 4, г). Таким образом, одним из эффективных методов снижения пульсаций выходного напряжения ИЭ является устранение сдвига по фазе между напряжениями $U_{\text{и1}}$ и $U_{\text{и2}}$. Так как ток при разной полярности $U_{\text{и}}$ проходит через разные диоды выпрямительного моста, то из-за разброса характеристик диодов возможно неравенство амплитуд полуволн выпрямленного напряжения [2,3]. Это обстоятельство приводит к модуляции указанных выше пульсаций $U_{\text{вых}}$ даже при отсутствии первоначального сдвига по фазе между $U_{\text{и1}}$ и $U_{\text{и2}}$. Поэтому при реализации выходных схем датчиков БМП необходимо добиваться равенства амплитуд полуволн выпрямленных напряжений каждой измерительной обмотки.

В большинстве случаев БМП питаются напряжением с частотой 50 Гц [2,3]. При двухполупериодном выпрямлении возникает задача фильтрации пульсаций с четными гармониками ($2 \cdot \omega_{\text{в}}$, $4 \cdot \omega_{\text{в}}$ и т. д.). Обеспечить указанный частотный диапазон можно с помощью двух избирательных фильтров, пропускающих частоты $\omega_{\text{в}}$ двух ИО, и фильтра, ослабляющего все остальные высокочастотные помехи [3].

К прочим недостаткам классических БМП относятся: необходимость применения фазовращателя для устранения начального сдвига по фазе между напряжениями ИО БМП [2,3] и возрастание погрешности от колебания питающего напряжения [2,3,8,12].

Указанные недостатки выходных схем БМП не обеспечивают необходимой точности и разрешающей способности при измерении крутящих моментов на вращающихся валах промышленных установок и машин. Поэтому повышающиеся требования, предъявляемые к БМП, диктуют применение при их создании новейших методов анализа и синтеза, а также более совершенных конструкций измерительных систем.

Устранить указанные недостатки, присущие выходным схемам БМП, можно посредством компенсации фазовых сдвигов и пульсаций напряжений, регистрация которых осуществляется следующими методами [4-7]:

- 1) измерение фазовых сдвигов за один период исследуемого напряжения с помощью широкополосной частотной модуляции (ЧМ) генераторов качающейся частоты (ГКЧ), основанной на сравнении опорной частоты и смещенной частоты волн ГКЧ в смесителе, выделяющего нулевую разностную частоту $F_{60}(t)$ [4-7];
- 2) измерение пиковых значений переменных напряжений ИО БМП за один период исследуемого напряжения с помощью широкополосной частотной модуляции генераторов качающейся частоты, основанной на сравнении опорных частот и смещенных частот волн ГКЧ в смесителях, выделяющих нулевые разностные частоты $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, и с последующим вычислением их разности $F_{60}(t)$, пропорциональной результирующей ЭДС измерительной катушки $F_i(t)$ БМП [7].

III. Измерение пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП с помощью широкополосной частотной модуляции ГКЧ

Структурная схема устройства измерения пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП приведена на (рис. 5) [4-7,9]. Измерение пиковых значений переменных напряжений ИО БМП основана на применении двухканальной измерительной системы с двумя опорными генераторами СВЧ качающейся частоты (ГКЧ_о), частота модуляции (ЧМ) которых изменяется по синусоидальному гармоническому закону, двумя линиями задержки (ЛЗ1) и (ЛЗ2) и двумя смесителями 1 и 2, на входы которых поступают два частотно-модулированных сигнала СВЧ от ГКЧ_о, прямой и задержанный на время $t_s = \text{const}$ относительно прямых сигналов от ГКЧ_о.

В качестве линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2 широкополосных частотно-модулированных сигналов СВЧ от каждого ГКЧ_о в блоке измерения применены двухметровые отрезки коаксиального кабеля типа РК-50-4-11 с входным и выходным сопротивлениями в 50 Ом для формирования в линиях задержки режима бегущих волн. При данных длинах линий задержек время задержки широкополосных частотно-модулированных сигналов СВЧ составляет около 0,007 мкс.

При этом частоты опорных сигналов (f_o) и смещенных (f_c) меняются во времени по гармоническому закону. В результате смещения (сложения) в смесителях 1 и 2 двух прямых и задержанных колебаний ГКЧ_о на выходе

смесителей образуются биения (рис. 6). Средняя частота $f_0 \gg \Delta f_m$, где Δf_m – девиация частоты (полоса качания) [4,5,7].

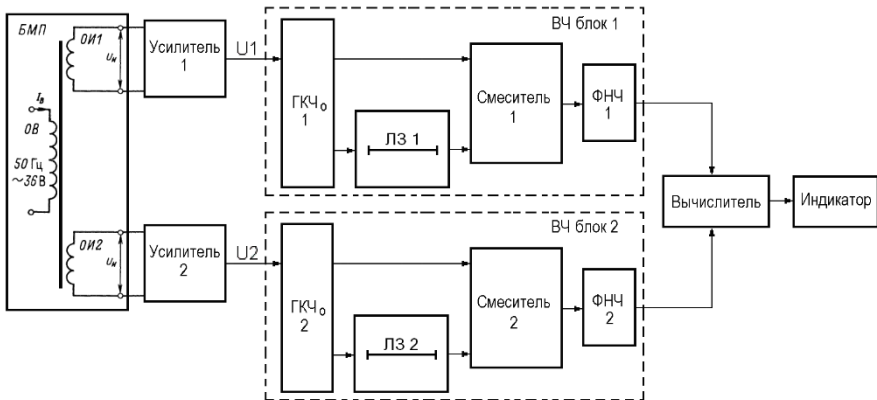


Рис. 5. Измеритель пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП

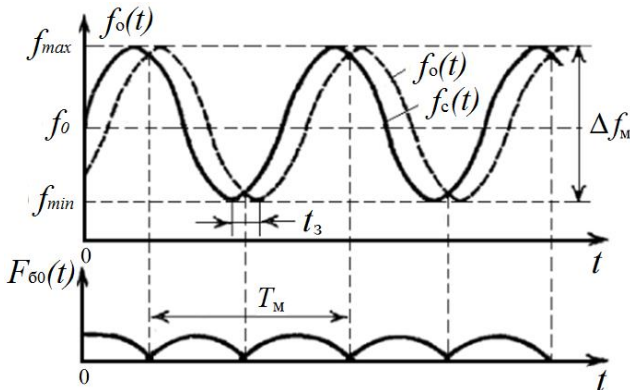


Рис. 6. Изменение частот опорных и смещенных ЧМ сигналов и частот биений в выходной измерительной системе БМП

Частота смещенных во времени сигналов от ИО БМП под действием крутящего момента изменяются таким же образом во времени, что и частоты опорных сигналов, но со сдвигом на время запаздывания $t_3 = \text{const}$ относительно частот опорных сигналов. При этом сдвиг фаз сигналов ГКЧ_о остается постоянным $\Delta\phi = \omega_b \cdot t_3 = \text{const}$, где $2 \cdot \pi \cdot f_b = \omega_b$ – угловая частота переменного электромагнитного поля в ЧЭ (рис. 6).

В результате смещения опорных и задержанных ЧМ колебаний ГКЧ_о образуются биения с частотами $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$. Приращения частот опорных генераторов качающейся частоты ГКЧ_о (разностная частота биений) определяется из (рис. 6), и равны:

$$F_{60}(t) = t_3 \cdot t g \alpha = t_3 \cdot \frac{df_o}{dt} = \frac{df_o}{\omega_b} \cdot \Delta \phi, \quad (4)$$

то есть пропорциональна постоянному сдвигу фаз частотно-модулированных напряжений в результате их запаздывания на время $t_3 = \text{const}$ [4-7,9].

Мгновенные частоты биений равны абсолютным значениям разностей мгновенных значений частот опорного и смещенного частотно-модулированных сигналов генераторов качающейся частоты ГКЧ_о (рис. 6):

$$|F_{60}(t)| = |f_o(t) - f_c(t)|. \quad (5)$$

Средняя частота биений $F_{60}(t)$, которая в течение большей части периода модуляции $T_b = T_m$ остается постоянной, является основной.

Ее значение, как видно из (рис. 6) и формулы (4), равно:

$$F_{60}(t) = \beta \cdot t_3, \quad (6)$$

где: $\beta = df_o / dt = 2 \cdot \Delta f_m \cdot F_m$ – скорость изменения частот генераторов качающейся частоты ГКЧ_о ($\Delta f_m = 20 \div 50$ МГц – девиация частот при несущих частотах ГКЧ $f_o = 200$ МГц, а $f_b = F_m = 50$ Гц – частота модуляции – частота переменного питающего напряжения БМП). Тогда, основная частота биений с учетом (4) будет равна:

$$F_{60}(t) = 2 \cdot \Delta f_m \cdot F_m \cdot t_3, \quad (7)$$

причем на практике девиация частоты Δf_m составляет несколько десятков мегагерц, а $f_m = F_m = 50$ Гц – десятки герц.

IV. Реализация измерителя пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП с помощью широкополосной частотной модуляции ГКЧ

Измеритель пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП реализован следующим образом (рис. 5).

С измерительных обмоток БМП ОИ1 и ОИ2 снимают сдвинутые по фазе под действием крутящего момента друг относительно друга напряжения $U_{и1}$ и $U_{и2}$ с $f_m = F_m = 50$ Гц [2,3,7].

Напряжения $U_{и1}$ и $U_{и2}$ с измерительных обмоток ОИ1 и ОИ2 БМП частотой $F_m = 50$ Гц являются модулирующими напряжениями и через усилители 1 и 2 поступают на модуляционные входы первого ГКЧ_о и второго ГКЧ_о для обеспечения широкополосной частотной модуляции. Сохранившие фазовый сдвиг, сформированные ЧМ сигналы, а именно, опорные сигналы (с ГКЧ_о 1 и ГКЧ_о 2) с частотами $f_o(t)$ и сдвинутые сигналы, за счёт постоянных задержек, с частотами $f_c(t)$ подаются на смесители 1 и 2. К выходам смесителей 1 и 2 подключены фильтры низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2 с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{\delta 0 \max}$, соединенные с входом вычислителя. Вычислитель вычисляет разность $\Delta F_{50}(t)$ частот биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, поступающих с фильтров низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2, которые пропорциональны результирующим ЭДС измерительных катушек $E_{и}(t)$ БМП [2,4,7].

$$|\Delta F_{60}(t)| = |F_{60.1}(t) - F_{60.2}(t)|, \quad (8)$$

Далее разность частот биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, поступает на вход индикатора.

Применение измерителя пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП за один период исследуемого напряжения с широкополосной частотной модуляции позволяет обойти такой недостаток как несимметрия магнитной цепи БМП крутящего момента [4-8, 14]. При несимметрии магнитной цепи преобразователя возникающий сдвиг по фазе между напряжениями $U_{и1}$ и $U_{и2}$ измерительных обмоток БМП при крутящем моменте на валу $M = 0$ не проявляется, так как при выделении частот биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$ влияние данного фазового сдвига измерительных обмоток БМП ликвидируется априори.

Ликвидация влияния возникающего фазового сдвига между напряжениями измерительных обмоток БМП при $M = 0$ достигается путем применения в выходной схеме БМП двух отдельных измерительных каналов измерения напряжений ИО БМП [7]. Ликвидируется также и влияние фазовых сдвигов между напряжениями $U_{и1}$ и $U_{и2}$ измерительных обмоток БМП при действующих крутящих моментах, при $M \neq 0$.

Поэтому выделяемые смесителями протектированные преобразованные сигналы биений $u_{пр.с.1}$ и $u_{пр.с.2}$ с частотами биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, поступающие с фильтров низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2 на вычислитель, пропорциональны результирующим ЭДС измерительных катушек $E_{и}(t)$ и не подвержены фазовым сдвигам из-за не симметрии магнитной цепи БМП и действующих крутящих моментах, когда $M \neq 0$ [2,3,7].

Хотя преобразованные сигналы биений $u_{\text{пр.с.1}}$ и $u_{\text{пр.с.2}}$ и несут информацию обо всех фазовых сдвигах между напряжениями $U_{\text{н1}}$ и $U_{\text{н2}}$ измерительных обмоток БМП, вычислитель подсчитывает только средние частоты биений за периоды модуляции $T_{\text{в}} = T_{\text{м}} \text{ГКЧ}_0$ и вычисляет их разность $|\Delta F_{60}(t)| = |\Delta F_{60.1}(t) - \Delta F_{60.2}(t)|$.

Вычислитель преобразует разность частот биений $\Delta F_{60}(t)$ в значения деформации кручения упругого вала. Результат вычисления деформации кручения упругого вала в виде угловых единиц закрутки вала или в значениях торсионных моментов индицируется цифровым индикатором [4-7].

В. Заключение

В работе применен новый подход в построении измерительных выходных схем БМП, основанный на новых технических решениях и методах, и реализованный с применением измерителя фазовых сдвигов сигналов СВЧ генераторов качающейся частоты с широкополосной частотной модуляцией и смешения сигналов СВЧ в смесителях на нулевой промежуточной частоте. Изложенные построения измерительных выходных схем БМП могут найти практическое применение при измерении и контроле торсионных моментов при диагностике и оценке остаточного ресурса рабочих валов энергоемких машин – прессов, компрессоров, насосов атомных электростанций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским научным фондом (проект №15-19-10026).

© Гордеев Б.А., 2019
© Охулков С.Н., 2019
© Кралин А.А., 2019
© Ермолаев А.И., 2019

Библиографический список

- [1] Иванов Г.М., Новиков В.И., Хмелев В.В., Ермак В.Н. Датчики крутящего момента в системах электроприводов // Электротехническая промышленность. Электропривод. Обзорн. информ. 1987. № 3 (19). М.: Информэлектро, 1987. – 48 с.
- [2] Рыбальченко Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
- [3] Левинтов С.Д., Борисов А.М. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.
- [4] 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.
- [5] Охулков С.Н., Охулков Е.Н. Способ определения крутящего момента, Пат. 2196309 РФ, заявл. 24.04.00; опубл. 10.01.03.

- [6] Гордеев Б.А., Бугайский В.В., Ерофеев В.И., Охулков С.Н. Частотный метод измерения деформации кручения на вращающихся валах машин и механизмов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2006. № 16. С. 62-69.
- [7] Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Дарьенков А.Б., Плехов А.С., Бугайский В.В. Способы снижения погрешностей магнитоупругих датчиков крутящего момента вращающихся валов машин // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. / под ред. В.И. Ерофеева, В.Н. Перевезенцева, С.И. Смирнова. Н. Новгород: Интелсервис, 2014. Т. 23, №1. С. 142-167.
- [8] Бруммель Х.Г., Майер К.У., Линнерт У., Остермайер Й., Пфайфер У. Магнитоупругий датчик крутящего момента, Пат. 2591587 РФ; заявл. 11.04.12; опубл. 20.07.16.
- [9] Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоиздат., 1989. – 208 с.
- [10] Парфенова М.М., Пчелинцева В.Н. Современное состояние и перспективы развития преобразователей крутящего момента. М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1980. – 30 с.
- [11] Костомаров А.С., Могучев М.В., Микитченко А.Я. Датчики обратных связей для электропривода // Вестник ОГУ. 2001. № 3. С. 117-121.
- [12] Andreescu R., Spellman B., Furlani E.P. Residual strain effects on a non-contact magnetoelastic torque transducer // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2010. № 32 (3). P. 183-193.
- [13] Andreescu R., Spellman B., Furlani E.P. Analysis of a non-contact magnetoelastic torque transducer // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. № 320 (12). P. 1827-1833.
- [14] Garshelis I.J., Conto C.R. A magnetoelastic torque transducer utilizing a ring divided into two oppositely polarized circumferential regions // Journal of Applied Physics. 1996. № 79 (8). P. 4756-4758.
- [15] Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

B.A. Gordeyev^{1,2}, **S.N. Okhulkov**^{1,2},
A.A. Kralin², **A.I. Ermolaev**^{1,2}

VOLTAGE PEAK MEASUREMENT OF MAGNETOELASTIC TORQUE SENSOR WINDINGS USING ALIGNMENT OSCILLATOR

¹ Mechanical Engineering Research Institute of RAS
Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. To electromechanical complexes automatization it is necessary to develop reliable measuring methods and means of parameters registration: torque, power, axial shaft force, etc. Currently, reliability requirements are met by non-contact magneto-elastic torque converters (MTC), which are actively used on ships. The operational experience of the MTC has shown its high reliability, which is due to the simplicity of the design and the non-contact signal reception method. At the same time, the torque measurement accuracy by MTC does not meet the requirements due to archaic measuring schemes. A new approach of measuring output circuits development of the MTC based on new technical solutions and implemented using a phase-shift meter and a peak voltage meter with broadband alignment oscillator (AO) frequency modulation (FM) at beat frequency is described. The method is to forming high-frequency signals with frequencies proportional to the measured voltages of the measuring windings (MW) of the MTC. These reference signals are compared with the shifted obtained by delaying the reference signal for a small fixed shift time in the mixer block which calculates the difference frequency – beat frequency. It is shown that the difference in the beat frequencies of two AO is proportional to the voltage difference of the MTC MW, therefore, measuring circuits based on the AO can be used to estimate the angle of shafts rotation. Moreover, in such a measuring circuit there is no decrease in accuracy due to high-frequency interference, phase shift of the voltage in the MW and supply voltage fluctuations.

Keywords: alignment oscillator, beat frequency, elastic shaft, frequency modulation, magnetoelastic converter, output measuring circuit, shaft torsion strain, torque sensor.

References

- [1] G.M. Ivanov, V.I. Novikov, V.V. Khmelev and V.N. Ermak, «Datchiki krutyashchego momenta v sistemakh elektroprivodov (Torque sensors in electric drive systems)», *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Elektroprivod. Obzorn. inform (Electrical industry. Electric drive. Review inform)*, vol. 3, no. 19, P. 48, 1987. Moscow: Informelectro, 1987 (in Russian).
- [2] Yu.I. Rybalchenko, *Magnitoupругiye datchiki krutyashchego momenta (Magnetoelastic Torque Sensors)*. Moscow: Mashinostroenie, 1981 (in Russian).

- [3] S.D. Levintov and A.M. Borisov, *Beskontaktnyye magnitoprugiye datchiki krutyashchego momenta (Contactless magnetoelastic torque sensors)*. Moscow: Energoatomizdat, 1984 (in Russian).
- [4] B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov, A.S. Plekhov, V.V. Bugayskiy and V.P. Gorskov, «Frequency method of measuring of torque moment of rotating shafts», *Vestnik Mashinostroeniya*, vol. 2, pp. 3-7, 2015.
- [5] S.N. Okhulkov and E.N. Okhulkov, «Sposob opredeleniya krutyashchego momenta (Method for determining the torque)», R.F. Patent 2196309, April 24, 2004 (in Russian).
- [6] B.A. Gordeev, V.V. Bugayskiy, V.I. Erofeev and S.N. Okhulkov, «The frequency method of turning deformation measurement on rotors of mechanisms», *Bulletin of VSAWT*, vol. 16, pp. 62-69, 2006.
- [7] B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov, A.B. Darienkov, A.S. Plekhov and V.V. Bugayskiy, «Sposoby snizheniya pogreshnostey magnitoprugikh datchikov krutyashchego momenta vrashchayushchikhsya valov mashin (Methods of reducing errors of magnetoelastic torque sensors of rotating shafts of machines)», *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya (Applied Mechanics and Engineering Technologies)*, V.I. Erofeev, V.N. Perevezentsev, S.I. Smirnov, Novgorod: Intelservis, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 142-167 (in Russian).
- [8] H.G. Brummel, K.U. Maier, U. Linnert, J. Ostmeier and U. Pfeifer, «Magnitoprugiye datchiki krutyashchego momenta (Magnetoelastic torque sensor)», R.F. Patent 2591587, July 20, 2016 (in Russian).
- [9] V.A. Viktorov, B.V. Lunkin and A.S. Sovlukov, *Radiovolnovyye izmereniya parametrov tekhnologicheskikh protsessov (Radio wave measurements of the parameters of technological processes)*. Moscow: Energoizdat, 1989 (in Russian).
- [10] M.M. Parfenova and V.N. Pchelintseva, *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya preobrazovateley krutyashchego momenta (Current status and development prospects of torque converters)*. Moscow: TSNIITEI priborostroyeniya (Central Scientific Research Institute of Instrument Engineering and Instrument Engineering), 1980 (in Russian).
- [11] A.S. Kostomarov, M.V. Moguchev and A.Ya. Mikitchenko, «Sensitive elements of inverse connections for electric drive», *Vestnik of OSU*, vol. 3, pp. 117-121, 2001.
- [12] R. Andreescu, B. Spellman and E.P. Furlani, «Residual strain effects on a non-contact magnetoelastic torque transducer», *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 32, no. 3, pp. 183-193, Apr. 2010.
- [13] R. Andreescu B. Spellman and E.P. Furlani, «Analysis of a non-contact magnetoelastic torque transducer», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 12, pp.1827-1833, June 2008.
- [14] I.J. Garshelis and C.R. Conto, «A magnetoelastic torque transducer utilizing a ring divided into two oppositely polarized circumferential regions», *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 8, pp. 4756-4758, May 1996.
- [15] V.A. Eliseev and A.V. Shinyansky, *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu (Handbook of automated electric drive)*. Moscow: Energoatomizdat, 1983 (in Russian).