

# Магнитоупругие преобразователи в СЭУ

Н.Е. ЖАДОБИН, д.т.н., профессор

А.И. ЛЕБЕДЕВ, инженер

**Автоматизация судовых энергетических установок (СЭУ) требует создания надежных устройств, позволяющих осуществлять непрерывный автоматический контроль основных величин: частоты вращения, крутящего момента, упора, крутильных и продольных колебаний. В Государственной морской академии им. адмирала С.О. Макарова разработаны магнитоупругие датчики крутящего момента и упора, отличающиеся простотой конструкции, бесконтактным съемом информации, большим значением выходного сигнала, точностью измерений, стабильностью характеристик, малой инерционностью, высокой надежностью [3]. Ниже рассмотрены вопросы, связанные с их применением в СЭУ.**

В магнитоупругих преобразователях (МУП) используется магнитоупругий эффект, который проявляется в той или иной степени у всех ферромагнитных материалов. Магнитоупругий эффект заключается в изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием механических напряжений.

На рис. 1 показана конструкция трансформаторного МУП, состоящего из двух взаимно перпендикулярных П-образных сердечников, на каждом из полюсов которых расположены катушки. Принцип действия ТМУП рассмотрен в [1].

К трансформаторным преобразователям следует отнести кольцевой магнитоупругий преобразователь (тордуктор), который применяют в датчиках крутящего момента. Кольцевой магнитоупругий преобразователь крутящего момента (КМУП) представляет собой единую конструкцию, состоящую из элементарных МУП, расположенных вокруг вала. Установка КМУП крутящего момента позволяет значительно уменьшить влияние магнитной неоднородности материала вала и его биений. Внешне КМУП напоминает электрическую машину с яв-

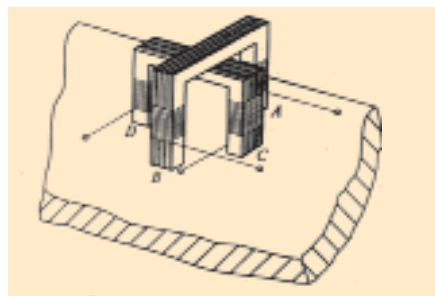


Рис. 1. Трансформаторный МУП с одной парой измерительных полюсов

но выраженными полюсами на статоре с участком вала вместо ротора.

Выражение для ЭДС трансформаторного МУП имеет следующий вид [1, 2]:

$$e = -\frac{i\omega\Phi_m W_m}{2\pi R_{\mu z}} \sqrt{\frac{i\gamma\omega}{\mu_s}} \ln \frac{[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)\sin(\frac{\pi}{4} - 2\varphi)}]^2 + 4\lambda}{[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)\sin(\frac{\pi}{4} + 2\varphi)}]^2 + 4\lambda} \cdot e^{i\omega t}$$

где

$\omega$  — угловая частота сети;

$\gamma$  — электрическая проводимость материала вала;

$\lambda = \mu_y / \mu_x$ ;

$\mu_y, \mu_x$  — значения магнитных проницаемостей материала вала вдоль действия главных нормальных напряжений;

$\mu_z = \sqrt{\mu_x \mu_y}$  — эквивалентное значение магнитной проницаемости;

$\varphi$  — угол между координатными осями  $X_1, Y_1$ , связанными с магнитопроводом преобразователя, и главными осями анизотропии  $X, Y$ , совпадающими с направлением главных нормальных напряжений;

$\Phi_m$  — амплитудное значение магнитного потока, втекающего в контролируемый участок вала через полюса обмотки возбуждения.

Приведенная зависимость изменяется по периодическому закону в функции угла и имеет экстремальные значения при  $\varphi = \pi/4 \pm n \pi/2$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

При  $\varphi = 45^\circ$  ЭДС преобразователя имеет максимальное значение и равна:

$$e = \frac{\Phi_m W_m}{2\pi R_{\mu z}} \sqrt{\frac{i\gamma\omega}{\mu_s}} e^{i\omega t} \ln \lambda$$

При измерении крутящего момента полюса измерительной обмотки С и D располагаются вдоль образующей вала, а полюса обмотки возбуждения А и В — по окружности вала.

Линии, соединяющие центры проекций полюсов А, В, С, D, направлены под углом  $45^\circ$  к образующей вала, то есть совпадают с направлением главных нормальных напряжений, возникающих под действием крутящего момента.

Для измерения упора магнитопровод преобразователя следует повернуть на  $45^\circ$ .

Как показали аналитические и экспериментальные исследования, взаимное влияние крутящего момента и упора на выходной сигнал ТМУП отсутствует [3].

Судовые энергетические установки с поршневыми двигателями отличаются непостоянством крутящего момента. В зоне резонансных оборотов двигателя дополнительные механические напряжения будут изменяться по гармоническому закону с частотой, равной частоте собственных колебаний системы.

Магнитоупругий преобразователь крутящего момента реагирует на главные нормальные напряжения, возникающие в контролируемом участке вала, поэтому выходной сигнал МУП при однородном в магнитном отношении материале вала будет изменяться в соответствии с законом изменения механического напряжения.

Дополнительные и случайные составляющие механического напряжения вызовут амплитудную модуляцию выходного сигнала МУП.

При применении элементного магнитоупругого преобразователя (ЭМУП) следует учитывать сильное влияние магнитной неоднородности материала вала на его выходной сигнал. Из-за магнитной неоднородности материала вала выходной сигнал МУП зависит от положения вала. При вращении вала возникает дополнительная модуляция выходного сигнала. Магнитная неоднородность материала вала вызывает появление модулирующей (мультипликативной) помехи, которая приводит к искажению полезного сигнала.

В [1] приводится выражение для выходного сигнала датчика, состоящего из нескольких ЭМУП, симметрично расположенных по окружности контролируемого участка вала, при последовательном соединении измерительных обмоток.

Искаженная составляющая выходного сигнала датчика равна нулю при

$$m \neq nz, \quad (1)$$

где

$m$  — гармоническая составляющая выходного сигнала, вызванная магнитной неоднородностью вала;

$z$  — число ЭМУП;

$n = 1, 2, 3...$

Таким образом, установка симметрично расположенных преобразователей позволяет скомпенсировать гармонические составляющие, вызванные магнитной неоднородностью материала вала, за исключением гармоник, кратных числу преобразователей.

Выражение (1) имеет универсальный характер. В частности, оно может быть использовано для определения порядка крутильных колебаний. Порядок крутильных колебаний определяется следующей формулой:

$$m = nz,$$

где

$m$  — порядок крутильных колебаний;

$n = 1, 2, 3...$  для двухтактных двигателей;

$n = 0,5; 1; 1,5; 2...$  для четырехтактных двигателей;

$z$  — число цилиндров.

В настоящее время порядок крутильных колебаний традиционно определяется в результате анализа фазовых диаграмм [4].

Полученный вывод справедлив и при учете случайной составляющей крутящего момента. Кольцевой МУП крутящего момента состоит из нескольких ЭМУП, поэтому при большом числе пар полюсов выходной сигнал КМУП практически не зависит от магнитной неоднородности материала вала. Разработка многочисленных систем с ЭМУП [3] показала, что датчик крутящего момента, состоящий из двух противоположно расположенных ЭМУП, эквивалентен датчику с КМУП.

На рис. 2 представлены осциллограммы, полученные во время испытаний магнитоупругого датчика крутящего момента при работе дизеля в зоне резонансной частоты вращения. На осциллограммах записаны следующие величины: напряжение питания —  $U_c$ , выходное напряжение датчика —  $U_d$ , положение рейки топливных насосов —  $\lambda$ , угол поворота лопастей винта —  $\phi$ , частота вращения вала —  $n$ .

Как видно из рис. 2, наиболее сильно крутильные колебания проявляются при минимальном значении среднего крутящего момента. С ростом угла поворота лопастей

винта, а следовательно, и среднего значения крутящего момента, происходит уменьшение влияния крутильных колебаний.

При сильно развитых крутильных колебаниях (рис. 2а) наблюдается изменение фазы выходного напряжения датчика на  $180^\circ$ , что свидетельствует о превышении механических напряжений от крутильных колебаний над напряжениями от среднего крутящего момента. Увеличение угла поворота лопастей винта (рис. 2б) вначале приводит к уменьшению колебаний амплитуды выходного напряжения датчика. При дальнейшем росте угла поворота лопастей винта фаза выходного напряжения остается постоянной, а колебания амплитуды уменьшаются (рис. 2в). При больших углах поворота лопастей ВРШ изменения амплитуды выходного напряжения незначительны (рис. 2г).

На рис. 3 изображены огибающие амплитуды выходного напряжения датчика, построенные на основе осциллограмм, приведенных на рис. 2а, в, г.

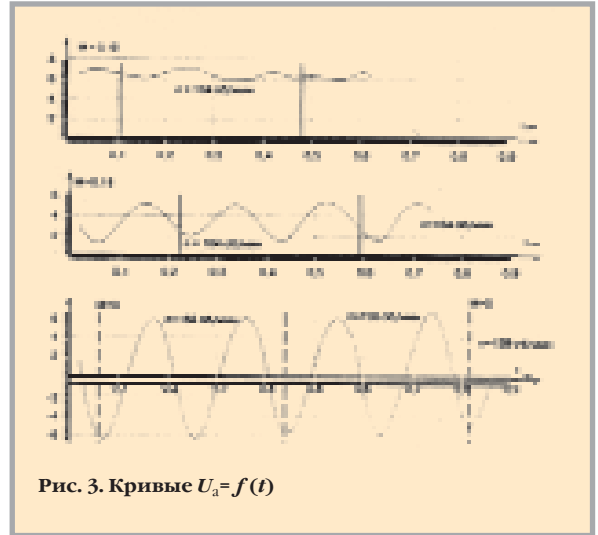


Рис. 3. Кривые  $U_a = f(t)$

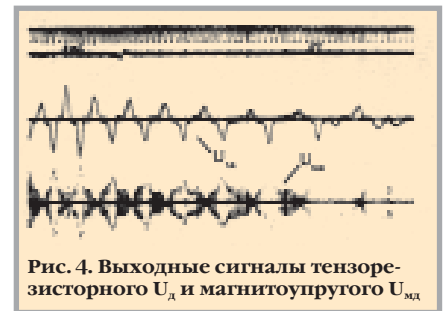


Рис. 4. Выходные сигналы тензорезисторного  $U_{тд}$  и магнитоупругого  $U_{мд}$

При их построении изменение фазы выходного напряжения учитывалось изменением знака амплитуды.

На рис. 3а, б видно, что огибающие изменяются по гармоническому закону. Одному обороту вала соответствуют два периода изменения огибающей, что говорит о наличии крутильных колебаний второго порядка.

Испытания проводились на траулере типа «Лесков» с главным восьмицилиндровым двухтактным дизелем 8ТД48 Зульцер и четырехлопастным гребным винтом.

Крутильные колебания второго порядка объясняются тем, что при малых нагрузках основным источником периодических моментов с половинной лопастной частотой является четырехлопастный гребной винт. С разворотом лопастей гребного винта усиливается его демпфирующее усилие, что приводит к исчезновению крутильных колебаний при той же частоте вращения вала.

На рис. 4 показана осциллограмма, полученная во время испытаний магнитоупругого датчика на валу быстроходного дизеля. На осциллограмме записаны выходные сигналы с тензорезисторного  $U_{тд}$  и магнитоупругого  $U_{мд}$  датчиков крутящего момента.

На рис. 5, 6 приведены осциллограммы, на которых представлены

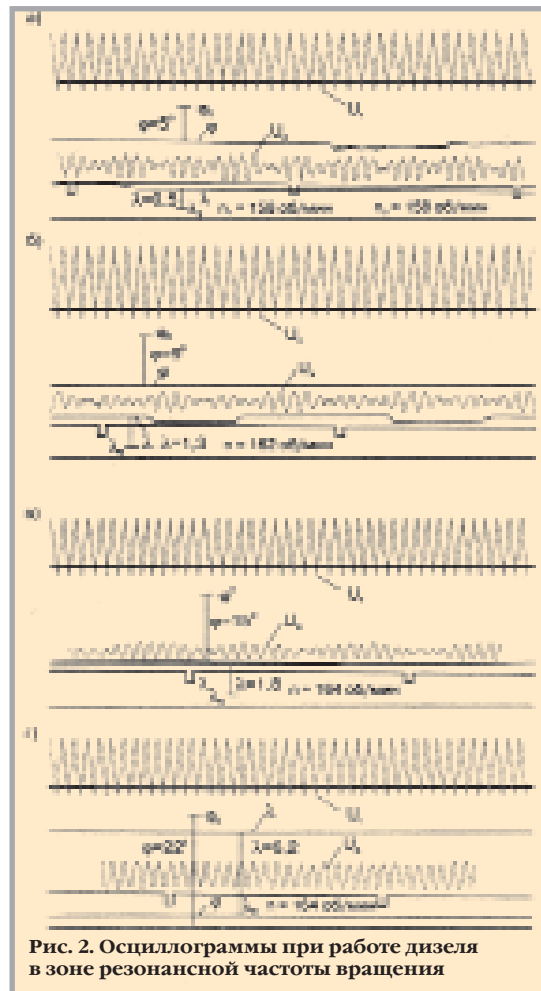
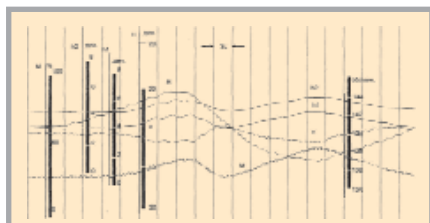


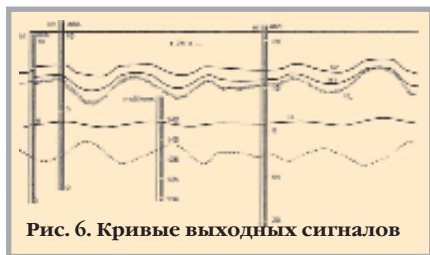
Рис. 2. Осциллограммы при работе дизеля в зоне резонансной частоты вращения



**Рис. 5. Кривые выходных сигналов: магнитоупругого датчика — М, датчиков положения реек топливных насосов  $h_1$ ,  $h_2$ , датчика угла поворота лопастей винта — Н, датчика вращения — n**

кривые выходных сигналов с магнитоупругого датчика крутящего момента —  $U_m$ , с датчиков положения реек топливных насосов —  $h_1$ ,  $h_2$ , с датчика угла поворота лопастей винта — Н и датчика частоты вращения — n.

Осциллограммы получены во время испытаний на т/х «Скульптор Голубкина». Сравнение кривых показывает, что изменение выходного сигнала с МУП проис-



**Рис. 6. Кривые выходных сигналов**

ходит по такому же закону, как и выходные сигналы с реек топливных насосов.

На рис. 6 показана осциллограмма, полученная в ходовом режиме при морском волнении. Из рисунков видно, что при неизменном значении шага винта Н происходят одновременные изменения положений реек топливных насосов, частоты вращения гребного вала и выходного напряжения магнитоупругого датчика.

Выделяя огибающую выходного сигнала с помощью синхронного детектора, можно получить напряжение, постоянная составляющая которого соответствует среднему значению крутящего момента, а переменная составляющая — механическим напряжениям от крутильных колебаний.

Сравнение частоты переменной составляющей с частотой вращения гребного вала позволит определить порядок крутильных колебаний.

При переходе запретных зон развиваются недопустимо большие амплитуды продольных колебаний [5].

Продольные колебания происходят с частотой крутильных колебаний. Продольные колебания приводят к различного рода повреждениям в линии вала.

Время протекания механических процессов в линии вала значительно

больше протекания электромагнитных процессов в трансформаторных МУП.

Малая инерционность трансформаторных МУП позволяет использовать их для измерения знакопеременных усилий, возникающих при крутильных и продольных колебаниях.

Магнитоупругие датчики крутящего момента и упора могут быть использованы для измерения средних, переменных, случайных составляющих крутящего момента и упора, для непрерывного измерения и контроля крутильных и продольных колебаний в эксплуатационных режимах СЭУ.

#### Литература

1. Жадобин Н.Е. Магнитоупругие преобразователи в судовой автоматике. — Л.: Судостроение, 1985.
2. Жадобин Н.Е., Крылов А.П., Малышев В.А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматике. — СПб.: Элмор, 1998.
3. Жадобин Н.Е., Лебедев А.И. Измерение продольных колебаний магнитоупругими преобразователями // Электросистемы. — 2005. — № 1. — С. 16–18.
4. Маслов Г.С. Расчет колебаний валов. — М.: Машиностроение, 1980.
5. Горбунов Е.Я. Крутильные и продольные колебания валопровода в запретной зоне частот вращения двигателя // Морской транспорт. Секция «ТЭФ». — 1988. — Вып. 4 (672). — С. 11–17.

**VII-я специализированная выставка**  
**"ПОРТОВЫЙ ГОРОД. МТК "СЕВЕР-ЮГ-ТРАНЗИТ"**

**г. Астрахань**  
**4-6 октября**

**Выставочная фирма "Парад-Экспо"**  
**Тел./факс (8512) 54-35-25, 28-99-67**  
**www.parad.astranet.ru, parad@astranet.ru**