

УДК 621.586

Е.Ю. Анишев

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА
НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДАХ**

ОАО «ОКБМ Африкантов»

В статье даны отдельные примеры анализа крутильных колебаний крупных агрегатов ГЦН, а также стендов испытания узлов.

Ключевые слова: датчик момента, тензорезистор, стенд, резонанс, крутильные колебания, шаговые двигатели.

Первый опыт использования бесконтактного датчика момента для исследования главных циркуляционных насосов атомных станций (ГЦН АЭС) был осуществлен в начале 80-х годов XX в., когда потребовалось провести тензометрирование валопроводов ГЦН в условиях III блока БАЭС типа БН-600 с целью обнаружения резонансных зон крутильных колебаний [1].

ГЦН АЭС представляют собой вертикальную многомассовую конструкцию значительной длины и веса. К тому же на валу приводного электродвигателя располагается инерционный накопитель – маховик, обеспечивающий замедленное снижение частоты вращения и расхода теплоносителя главных контуров в переходных режимах станции при перерывах питания или полном обесточивании насосов. Такая конструкция ГЦН склонна к возникновению крутильных колебаний и деформаций собственно валопроводов насосного агрегата, а также узлов их соединения. Возможность появления резонансов крутильных колебаний валов усугубляется тем, что насосы главных контуров реакторов на быстрых нейтронах имеют системы плавного регулирования частоты вращения.

В настоящее время ясно, что в таких условиях важное значение приобретает диагностика крутильных колебаний с целью контроля резонансных явлений в валопроводах во всем диапазоне регулирования частоты вращения ГЦН. Тогда использовалась импортная бесконтактная тензометрическая система типа «Assurex-1200».

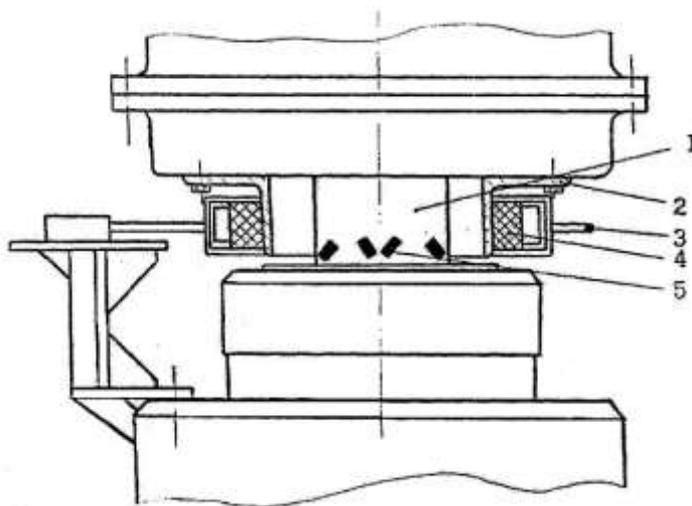


Рис. 1. Тензометрический имитатор полумуфты для исследования крутильных деформаций валопровода:

1 - вал-имитатор, 2 - крепежный стакан, 3 - приемная антенна,
4 - измерительно-передающее устройство, 5 - тензорезисторы

Исследования проводились с применением тензометрического имитатора полумуфты 1 (рис. 1, рис. 2), установленного в доработанный узел насоса. Для измерения деформаций кручения тензорезисторы 5 устанавливаются на вал-имитатор в направлении главных напряжений. Измерительно-передающее устройство 4 системы устанавливалось на диаметре стакана 2, прикрепленного к имитатору 1, а приемная антенна 3 закреплялась на корпусе насоса. Питание тензометрического моста 1 и передача измерительной информации осуществлялись вращающимся измерительно-передающим устройством 2 с антенной 3 по радиоканалу 4 радиоприемного устройства, с которого информация передавалась на быстродействующий самопишущий прибор 6. Для контроля работы передающего и приемного устройств применялся осциллограф 7. На рис. 3 резонансная зона крутильных деформаций валопровода ГЦН в зоне частоты вращения 947 об/мин, где амплитуда деформаций вала резко возрастает [2].

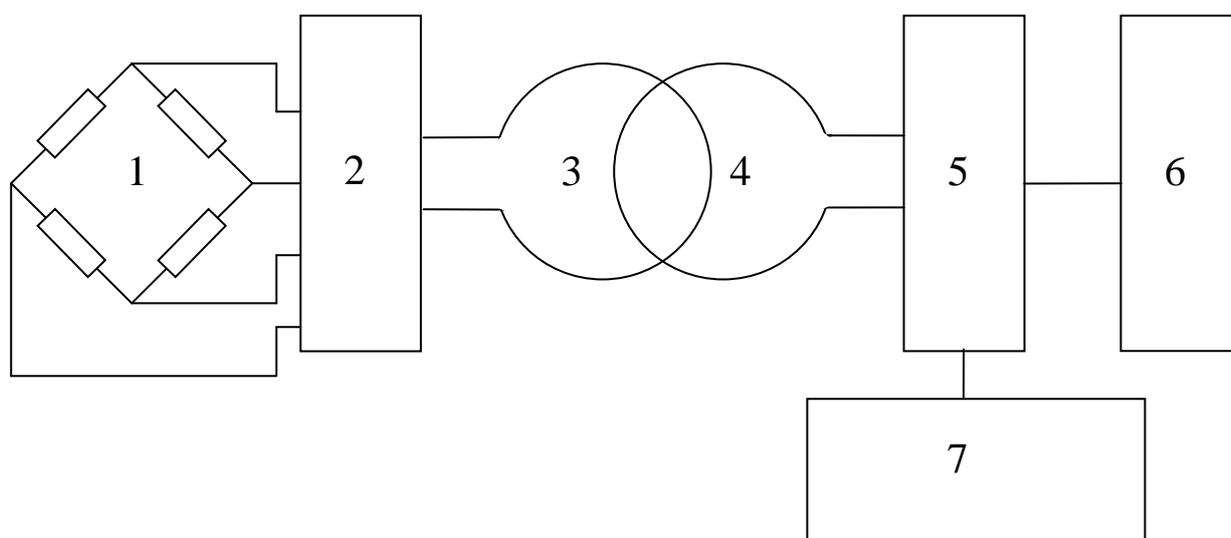


Рис. 2. Измерительная система для бесконтактного измерения крутящего момента:

1 - тензометрический мост, 2 - измерительное передающее устройство, 3, 4 - передающая и приемная антенны, 5 - радиоприемное устройство, 6 - самопишущий прибор, 7 - осциллограф

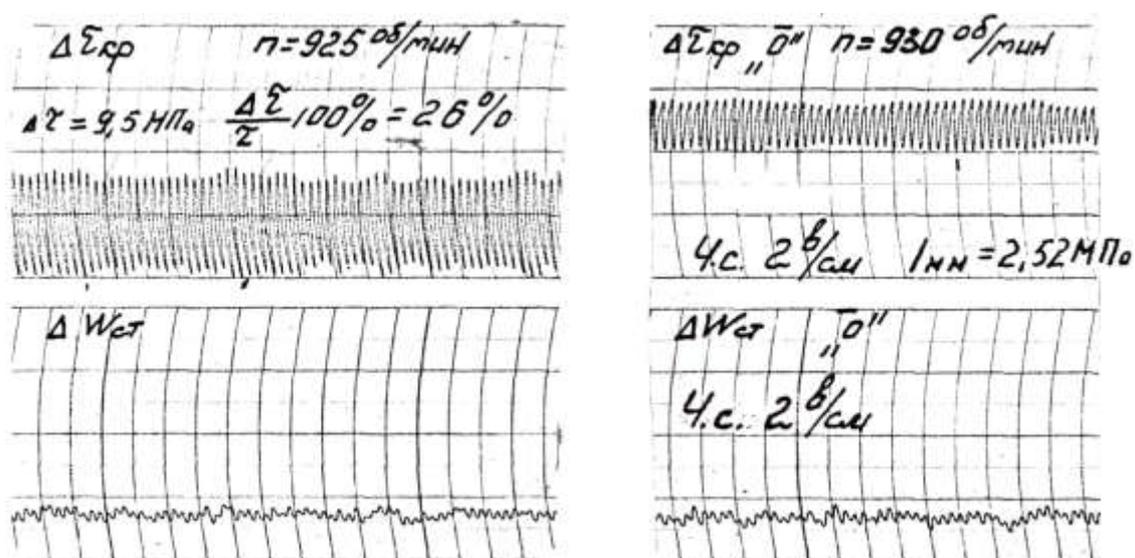


Рис. 3. Осциллограммы динамических усилий кручения в вале насоса и пульсаций мощности в цепи статора электродвигателя при регулировании частоты вращения системой асинхронно-вентильного каскада

Эти мероприятия позволили оперативно установить причины возникших резонансов, доработать валы ГЦН и найти практические решения, обеспечивающие длительный ресурс эксплуатации насосов блока БН-600.

В настоящее время серийно выпускаются бесконтактные датчики крутящего момента. Датчик T10FM предназначен для измерения статического и динамического моментов в широком диапазоне измерения момента и частоты вращения (от 15 до 80 кНм, до 8000 об/мин.). Предел основной допускаемой погрешности измерения $\pm 0,1\%$. Датчик T20WN допускает измерение момента в диапазоне 0,1 до 200 Нм с точностью $\pm 0,2\%$ при частоте вращения до 10000 об/мин (рис. 4).



Рис. 4. Датчики крутящего момента для механизмов различной мощности:
а – датчик T20WN; б – датчик T10FM

Датчики совместно с комплектной измерительной системой, поставляемой с программным обеспечением, могут стать гибкой измерительной системой с возможностью значительного расширения числа каналов. В зависимости от поставленных задач измерения могут производиться с частотой опроса свыше 2000 измерений в секунду для многоканальных модулей и до 19200 для одноканальных модулей.

Упомянутые датчики момента и вторичная аппаратура к ним имеют метрологические сертификаты об утверждении типа средств измерений. Система зарегистрирована в государственном реестре средств измерений и допущена к применению в Российской Федерации.

Измерения производятся тензорезисторами, установленными на компенсационной муфте. Для датчика T10FM осуществляется бесконтактная передача сигнала на неподвижную антенну с последующей его обработкой во вторичном измерительном модуле. Через эту же антенну производится бесконтактная подача питания на вращающуюся систему измерения.

Муфта с тензодатчиками и системой передачи сигнала устанавливается между валами электродвигателя и насоса. Использование датчика момента особенно актуально, когда электроприводы насосов комплектуются системами плавного регулирования частоты вращения. При испытаниях ГЦН 1-го и 2-го контуров на полномасштабном насосном стенде для испытаний собственно насосов и комплектных регулируемых электроприводов предполагается использование датчика момента в двух направлениях:

- 1) измерение статического момента на различных частотах вращения для определения мощности на валу и КПД ГЦН, что является сдаточным параметром по ГОСТ;
- 2) определение возможных крутильных резонансов в валах насосного агрегата с помощью осциллографирования амплитуд деформации вала.

Задачу 1 без использования датчика момента решить затруднительно, так как точное

измерение мощности, потребляемой двигателем и учет потерь в двигателе, и преобразователе частоты невозможны ввиду сильных искажений форм тока и напряжений.

Задача 2 также весьма актуальна ввиду достаточно сложной архитектуры создания электромагнитного момента преобразователем частоты и наличия многих других факторов, влияющих на амплитуду и частоту момента с возможностью появления резонансов.

Чтобы представить сложность вычисления мощности собственно насоса, рассмотрим алгоритм расчета потерь в электродвигателе и преобразователе частоты (ПЧ), которые необходимо вычесть из мощности, потребляемой насосным агрегатом и преобразователем частоты из питающей сети. Можно считать, что мощность, потребляемая из сети синусоидальна, т.к. она менее всего подвержена искажению из-за наличия преобразователя частоты. В связи с этим эта мощность может быть измерена достаточно точно традиционными методами и приборами.

Потери мощности в ПЧ имеют постоянную составляющую – это затраты на вентиляцию преобразователя и питание его цепей управления. Следующая составляющая потерь ПЧ – это потери, зависящие от несущей частоты частотно-импульсного модулятора (ШИМ) и мощности ПЧ. Эти зависимости приводятся в руководствах по эксплуатации ПЧ некоторыми иностранными фирмами, выпускающими преобразователи частоты (например, Vacon, ABB). Очевидно, что эти данные по потерям в ПЧ метрологически не аттестованы и носят справочный характер (рис. 5).

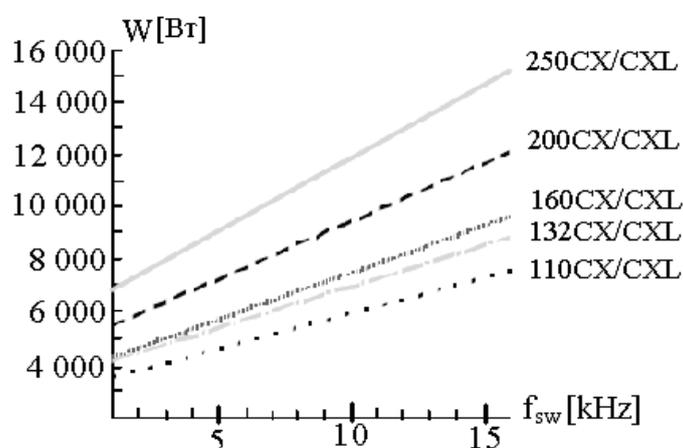


Рис. 5. Зависимость потерь в ПЧ от несущей частоты ШИМ инвертора для разных преобразователей частоты фирмы «Vacon» при напряжении сети 400 В и 500 В

Потери мощности в приводном электродвигателе определяются по классической диаграмме распределения потерь в электрической машине. При регулировании частоты вращения механизма необходимо иметь расчетные или экспериментальные зависимости механических, а также электрических потерь в активных частях машины для различных частоты и напряжения.

В результате можно констатировать, что такая методика весьма затратна, так как требует большого объема расчетных и экспериментальных работ, и не может иметь достаточную точность ввиду большого числа переменных составляющих.

Некоторые современные преобразователи имеют канал, предназначенный для определения среднего и мгновенного значений моментов, вычисленных на основании параметров схемы замещения электрической машины и измерения электрических величин с помощью внутренних датчиков ПЧ. Но канал имеет только информационное значение и метрологически не аттестован. К тому же канал фиксирует вращательный расчетный момент, создаваемый самим электроприводом. Этот момент неэквивалентен величине крутильной деформации валопровода механизма, являющейся реакцией на вычисленный момент электропривода. Он не регистрирует возможные механические резонансные явления, зависящие от собствен-

ных частот частей валопроводов и жесткости связей в узлах их соединения. Тензометрирование вала непосредственным быстродействующим датчиком в этом случае наиболее эффективно.

До принятия решения о приобретении системы измерения момента и выбора варианта муфты целесообразно проработать конструктивно совместимость муфты с валами электродвигателя и насоса, методику ее монтажа, а также возможность унификации муфты для разных ГЦН с мощностями одного порядка.

Использование муфты с датчиком крутящего момента должно качественно изменить результаты испытаний ГЦН как в стационарных, так и в переходных режимах работы. Так как датчик момента является достаточно чувствительным элементом и может непрерывно передавать визуальную информацию непосредственно с вала насоса, то система непрерывного измерения момента служит индикатором качества сборки насосного агрегата, включая его узлы уплотнения и подшипники.

С помощью датчика можно также измерять начальный момент страгивания насоса при нулевой частоте вращения. Особый интерес представляют результаты испытаний в квазистационарных режимах, где только с помощью быстродействующей моментной муфты можно увидеть деформации валопроводов, в том числе, возможные резонансы крутильных колебаний. Причем деформации валопроводов могут быть зафиксированы как крутильные, так и изгибные (в зависимости от мест расположения тензорезисторов на валопроводе).

Использование датчика момента для исследования квазистационарных режимов хорошо иллюстрируется на примере стенда испытаний шаговых электродвигателей. Применение быстродействующего датчика момента позволяет не только снять традиционные статические рабочие характеристики шагового двигателя, но и благодаря регистрации быстрой динамики всех переходных процессов, включая режимы пуска, торможения, генераторных режимов, дает возможность проанализировать и найти оптимальную форму электромагнитного момента, повысить плавность хода и минимизировать потери (рис. 6).

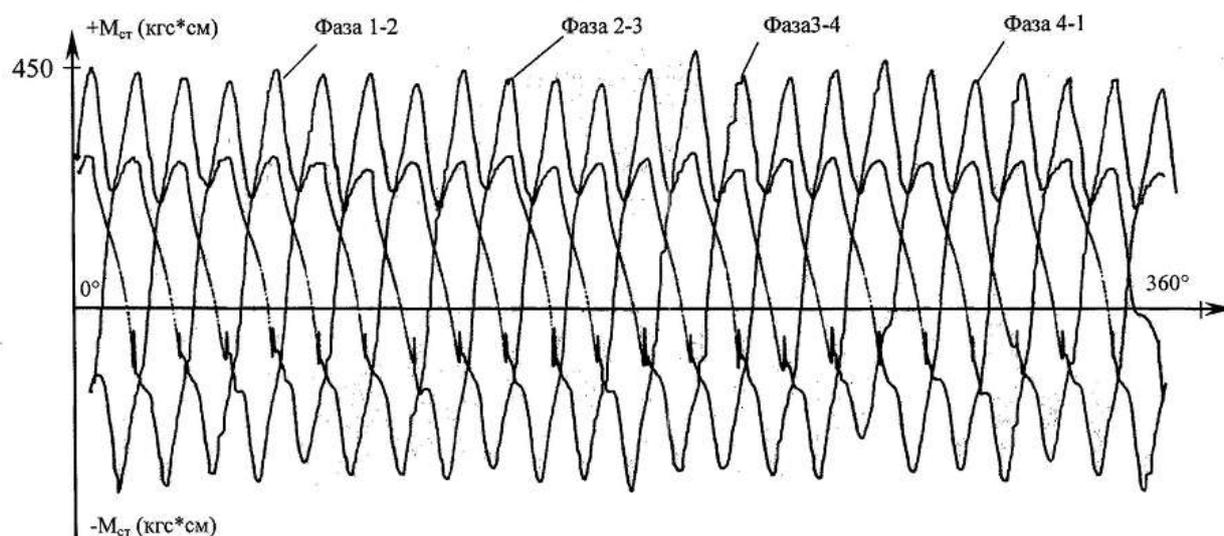


Рис. 6. Зависимость статического момента от угла поворота ротора на 360° при питании фаз (снято с использованием датчика момента)

На стенде используется датчик T20WN/50NM, предназначенный для более низких значений момента (1-50 нм).

Датчики такого же типа используются при проведении моделирования на испытательных стендах для решения задач исследования и оптимизации гидравлических трасс и возду-

ходов. Очевидно, что здесь нужны очень чувствительные датчики, рассчитанные на небольшие моменты (от 1 до 10 нм).

С использованием таких датчиков исследовались проблемы оптимизации конструкции и внедрения маховика герметичного электронасоса. Задача эксперимента заключалась в минимизации момента трения и механических потерь.

Не менее целесообразно внедрение датчиков момента при испытаниях подшипниковых узлов и уплотнений насосов и газодувков, когда происходит поиск материалов и узлов трения с точки зрения минимизации потерь и оценки надежности во всех возможных режимах, имитирующих рабочие и аварийные режимы установок. Датчики Т10FM с диапазоном измеряемых моментов уже внедрены на стенде испытания уплотнений ГЦН 1,2 БН-800, намечено их применение на стендах испытаний газовых уплотнений, резервных подшипников по установке ГТ-МГР.

Таким образом, целесообразность внедрения датчиков момента на испытательных стендах очевидна, но в то же время необходимо учитывать, что внедрение датчиков момента затратно и требует повышенной квалификации персонала испытателей.

В связи с этим имеет смысл иметь единый информационный банк имеющихся на предприятии датчиков момента. Целесообразно разработать метрологическую методику поверки и установку для её проведения, так как поверка датчиков момента в метрологических центрах весьма дорогая. В заключение следует отметить, что датчики момента могут стать хорошим инструментом на различных испытательных стендах атомной отрасли.

Библиографический список

1. **Анишев, Е.Ю.** Расчет пульсаций электромагнитного момента и крутильных колебаний электропривода насосного агрегата по схеме асинхронного вентильного каскада / Е.Ю. Анишев, В.В. Юдин // Электротехническая промышленность. Серия «Электропривод». 1984. Вып. 1 (123). С. 8–11.
2. **Анишев, Е.Ю.** Вопросы прочности насосного агрегата РУ АЭС БН-600 / Е.Ю. Анишев, Ф.М. Митенков, В.М. Чистяков // Научно-технический сборник XXIII Международного совещания по проблемам прочности двигателей. Россия. М. апрель 2002. С. 6–7.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2010*

E.Y. Anishev

EXPERIENCE OF APPLICATION OF CONTACTLESS A TORQUE TRANSDUCER ON TEST BENCH

The article presents separate examples analysis of the torsion fluctuations of the large components, and also test bench of the units.

Key words: a torque transducer, the strain gage, bench, resonance, torsion fluctuations, step motors.