

Контроль влияния внешних факторов, воздействующих на функционирование электромеханических систем

Е. В. ТУМАКОВА

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: tumakova_ekaterina91@mail.ru

Рассмотрена возможность применения математического моделирования для создания системы диагностики электромеханических систем на базе фазохронометрического метода. Приведены результаты математического моделирования воздействия гидродинамического момента на главный циркуляционный насосный агрегат.

Ключевые слова: фазохронометрический метод, электромеханические системы, математическое моделирование, оценка технического состояния.

Ability to apply mathematical modeling to create a system of diagnosis of electromechanical systems based phasechronometric method considered. Results of mathematical modeling of the impact of hydrodynamic torque at the MCPU given.

Key words: phasechronometric method, electromechanical systems, mathematical simulation, technical condition assessment.

Диагностика технического состояния электромеханических систем актуальна для различных областей современной промышленности, таких как атомная энергетика, нефте- и газоперекачка, теплоснабжение, водоснабжение и др. Возможности современных широко применяемых методов оценки технического состояния объектов определяются используемыми физическими эффектами (виброакустическими, тепловыми, электродинамическими), проявляющимися в процессе эксплуатации, а рабочий цикл должен соответствовать установленным параметрам (параметрическая диагностика). В настоящее время часто применяют амплитудные методы, среди которых ведущее положение занимает вибродиагностика [1—6].

Для эффективного решения проблем, возникающих при создании и использовании электромеханических систем, необходимы методы и средства диагностики, имеющие единый принцип представления метрологического и информационного сопровождения исследуемых объектов на всех этапах жизненного цикла. Такую возможность обеспечивает фазохронометрический метод, разработанный в МГТУ им. Н. Э. Баумана [7—11]. Его применение открывает широкие возможности, так как исследование фазы позволяет иначе оценить состояние объекта, а хронометрия позволяет повысить точность. Продолжительная работоспособность электромеханической системы возможна лишь при оперативной оценке её технического состояния, для чего измерительный контроль требуется сочетать с математическим моделированием.

В качестве объекта исследования выбрали главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА) реакторной установки с теплоносителем свинец-висмут. В 1950—1970 гг. были созданы и успешно эксплуатировались центробежные насосы в составе реакторных установок со свинцово-висмутым теплоносителем на отечественных серийных атомных подводных лодках. В последние годы интерес к теплоноси-

телям на основе свинца возобновился и начались проектировки реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым (БРЕСТ) и свинцово-висмутым (СВБР-75/100) теплоносителями [12]. В ГЦНА реакторных контуров и механизмах перегрузки ядерного топлива имеются рабочие узлы с элементами, находящимися в относительном движении в среде жидкого металла при рабочих температурах 400—550 °С. Работоспособность и надёжность зубчатых зацеплений, а также подшипниковых опор скольжения определяют из физико-химических характеристик теплоносителя, в среде которого они функционируют [12].

Главный циркуляционный насосный агрегат представляет систему из осевого насоса и электродвигателя. Упрощённая схема испытательного стенда ГЦНА, используемая при математическом моделировании, содержит асинхронный электродвигатель, соединительную муфту и корпус насоса, включающий подшипники качения и скольжения, вал и рабочее колесо.

Для связи математической модели с практическими результатами применительно к вращающемуся ротору электромеханических систем разработали модель валопровода, состоящую из дифференциальных уравнений, описывающих электромеханическую систему из двух сосредоточенных масс в виде дисков, соединённых упругим валом:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + k_{12} (\ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2) + q(\theta_1 - \theta_2) = M_2 - M_1; \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + k_{12} (\ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_1) + q(\theta_2 - \theta_1) = 0; \\ m_j \ddot{x}_j + c_1 \dot{x}_j + q_1 x_j + c(\dot{x}_j + \dot{\theta}_2 y_j) = q_1 e_1 \cos \theta_1 + q_2 e_2 \cos \theta_2; \\ m_j \ddot{y}_j + c_1 \dot{y}_j + q_2 y_j + c(\dot{y}_j + \dot{\theta}_2 x_j) = \\ = q_1 e_1 \sin \theta_1 - q_2 e_2 \sin \theta_2 - m_j g n_y, \end{cases}$$

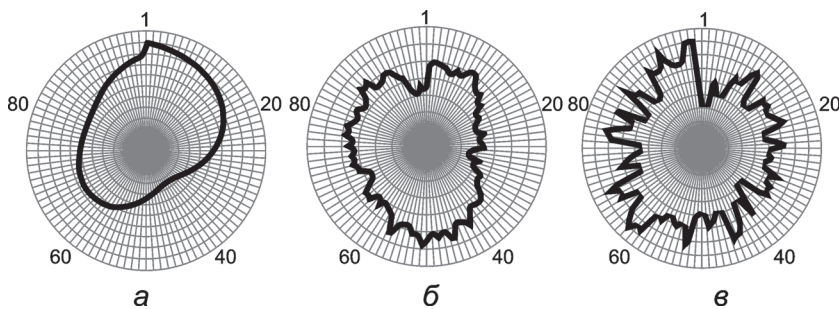


Рис. 1. Влияние гидродинамического момента на вариации интервалов времени при вращающем моменте электродвигателя $M = 0; 1000; 10000 \text{ Н} \cdot \text{м}$, соответственно а, б, в

Таблица 1

Изменение интервалов времени от гидродинамического момента

Результаты, полученные с хронограмм	Гидродинамический момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$					
	0	500	1000	2000	4000	10000
Приращения интервалов времени, мкс максимальное минимальное	175,7 173,9	182,1 179,3	189,6 184,7	204,6 195,5	233,7 217,1	321,3 281,9
Амплитуда приращения интервалов времени, мкс	0,9	1,4	2,4	4,5	8,3	19,7

где J_1, J_2 — моменты инерции электродвигателя и валопровода насоса, $j = 1, 2$; θ_1, θ_2 — углы поворота вала электродвигателя и валопровода насоса; M_1, M_2 — движущий момент электродвигателя и момент сопротивления валопровода насоса; q — крутильная жёсткость соединительной муфты;

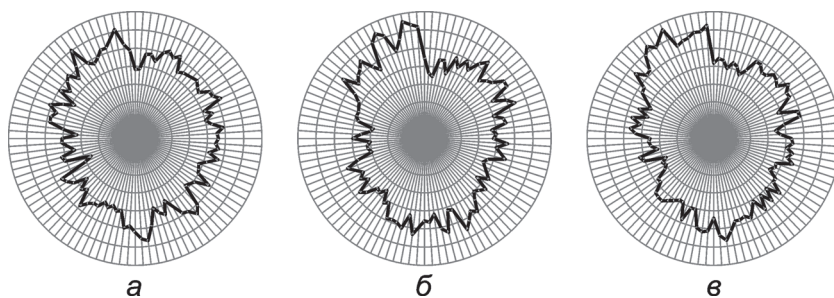


Рис. 2. Влияние кинематической вязкости ν на вариации интервалов времени:
а, б, в — $\nu = 0,05 \cdot 10^{-6}; 0,01 \cdot 10^{-6}; 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, соответственно

Таблица 2

Изменение интервалов времени от кинематической вязкости

Результаты, полученные с хронограмм	Кинематическая вязкость, $10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$					
	0,05	0,08	0,10	0,20	0,30	0,50
Приращения интервалов времени, мкс максимальное минимальное	198,1 195,9	198,1 195,8	198,2 196,0	197,9 196,0	197,8 196,0	197,9 195,9
Амплитуда приращения интервалов времени, мкс	1,1	1,15	1,1	0,95	0,9	1

k_{12} — коэффициент затухания при крутильных колебаниях; c, c_1 — коэффициенты внутреннего и внешнего трения при изгибных колебаниях, соответственно; q_1, q_2 — жёсткость вала электродвигателя и валопровода насоса; x, y — координаты центра тяжести валопровода насоса в неподвижной системе координат; e_1, e_2 — эксцентриситеты вала электродвигателя и валопровода насоса; m_j — сосредоточенные массы вала электродвигателя ($j = 1$) и валопровода насоса ($j = 2$); g — ускорение свободного падения; n_y — нормальная перегрузка (влияние продольной составляющей перегрузки в данном случае считается пренебрежимо малым).

С помощью рассмотренной математической модели можно получить углы поворота вала электродвигателя и валопровода ГЦНА, а также изгибные колебания валопровода вдоль поперечной оси. Результатами эксперимента являются расчёты и формирование рядов интервалов времени, соответствующих длительности оборота вала. Это позволяет сравнивать результаты вычислений с экспериментальными данными (интервалами времени), полученными фазохронометрическими системами.

На вариации как регистрируемых углов, так и интервалов времени могут влиять различные факторы, такие как гидродинамический и номинальный моменты двигателя, температура эвтектики, её плотность, кинематическая и динамическая вязкость и пр. [13]:

$$\theta = F(M_r, p_0, \nu, M_{\text{ном}}, E, T, t),$$

где θ — угол поворота вала электродвигателя или валопровода насоса; M_r — гидродинамический момент; p_0 — плотность эвтектики; ν — кинематическая вязкость эвтектики;

$M_{\text{ном}}$ — номинальный момент электродвигателя по паспорту; E — совокупность электрических параметров электродвигателя; T — температура эвтектики; t — время.

Имитационное математическое моделирование провели на примере гидродинамического момента и кинематической вязкости. Для различных гидродинамических моментов были получены результаты, представленные на рис. 1 и в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что с увеличением гидродинамического момента амплитуда приращений интервалов времени увеличивается.

Результаты для кинематической вязкости представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Проведённый вычислительный эксперимент показал, что влияние изменяющихся внешних факторов отражается на функционировании исследуемого объекта в вариациях периодов вращения от единицы до десятков микросекунд, что возможно только при использовании прецизионных средств измерений [14]. Разработанная структурная схема измерительного комплекса для систем диагностики представлена на рис. 3 и включает следующие блоки: формирования измерительного импульса, измерения интервалов времени и кодирования, обработки информации. Аналоговый сигнал с датчика по экранированному кабелю передаётся на блок формирования измерительного импульса, где проходит че-

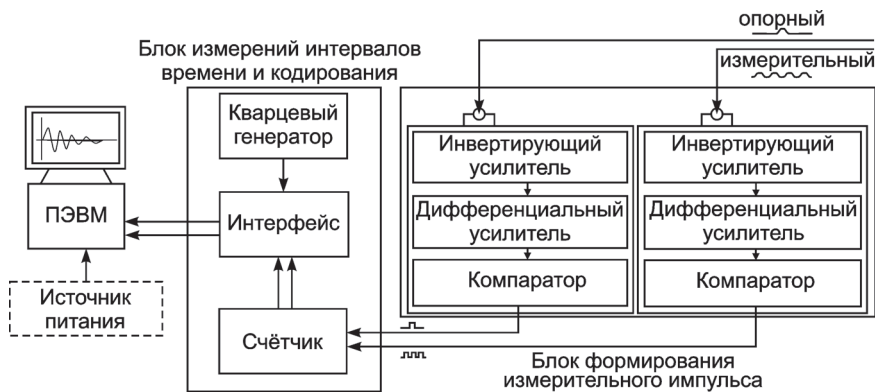


Рис. 3. Структурная схема измерительного канала

рез инвертирующий и дифференциальный усилители, а также компаратор. На выходе из этого блока сигнал имеет прямоугольный вид (впадины и выступы). Далее измерительный импульс подаётся на блок измерения интервалов времени и кодирования, где проходит через счётчик и интерфейс. На выходе сигнал имеет цифровой вид, удобный для его передачи на ПЭВМ. Тип датчика, предлагаемый для работы в измерительном комплексе, — индуктивный. Такие датчики обладают низкой стоимостью и невысокими требованиями к обслуживанию, а также имеют простую конструкцию, высокое быстродействие и точность [15, 16].

Заключение. На примере насосного агрегата рассмотрена возможность применения математического моделирования для создания системы диагностики электромеханических систем на базе фазохронометрического метода, разработана математическая модель. Проведено имитационное математическое моделирование влияния внешних факторов, в том числе — определение фазового угла вращения, в зоне которого происходят изменения. Через исследование параметров, влияющих на рабочий цикл, показана возможность изучения их воздействия на динамику системы (ресурс подшипников скольжения, надёжность работы электродвигателя и др.).

Работа выполнена при государственной поддержке молодых учёных Президентом России (грант № МК-3625.2015.8). Отдельные результаты выполнены в рамках НИР 9.1265.2014/К (код проекта 1265).

Л и т е р а т у р а

1. Вахромеев О. С., Каримов Р. Т., Надеев А. И. Современные методы диагностики электромеханических систем. М.: Машиностроение, 2005.
2. Керенцев Е. В. Анализ методов диагностирования двигателей постоянного тока на автомобиле // Вектор науки ТГУ. 2011. № 3 (17). С. 5—53.
3. Скалзуб В. В., Швеи О. М. Автоматизация мониторинга и управления эксплуатацией парка электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе параметров текущего технического состояния // Наука и прогресс транспорта. 2012. № 40. С. 70—74.
4. Зубренков Б. И., Маслов К. Г. Частотная вибродиагностика асинхронных двигателей шпиндельного исполнения на подшипниках качения. Вопросы электромеханики // Труды ВНИИЭМ. 2009. Т. 108. № 1. С. 19—24.

5. Пугачёва О. Ю., Пугачёв А. К., Соловьёв В. И., Абидова Е. А. Диагностика дизель-генератора 15Д-100 по показателям вибрации // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 2 (11). С. 91—97.

6. Клименко К. А. Способ диагностики трансформатора на наличие короткозамкнутых витков по изменению внешнего переменного магнитного поля // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность! 2013. № 2. С. 258—261.

7. Киселёв М. И., Зройчиков М. А., Пронякин В. И., Чивилев Я. В. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 10—13.

8. Бережко И. А., Гостюхин О. С., Комшин А. С. Информационные измерительные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики // Приборы. 2014. № 5. С. 13—17.

9. Ермаков К. С., Тумакова Е. В. Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 10. С. 171—180.

10. Тумакова Е. В., Комшин А. С. Фазохронометрическая технология информационно-метрологического сопровождения синхронных электромеханических систем // XXVI Межд. инновационно-ориентированная конф. молодых учёных и студентов МИКМУС-2014: Сб. трудов конф. М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2014. С. 215—219.

11. Комшин А. С. Мониторинг оборудования в сфере энергетики — требования безопасности // Стандарты и качество. 2014. № 2. С. 24—27.

12. Дроздов Ю. Н., Безносков А. В., Макаров В. В., Пучков В. Н., Антоненков М. А., Кузнецов Д. В. Исследования узлов трения ядерных установок, работающих в среде тяжёлых высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3 (19). С. 128—136.

13. Тумакова Е. В. Анализ функционирования насосного агрегата на примере математического моделирования // Студенческая весна 2014. Машиностроительные технологии: Труды Всерос. науч.-техн. конф. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.

14. Тумакова Е. В. Исследование влияния внешних факторов на функционирование насосного агрегата // Инженерно-физические проблемы новой техники: Сб. XI Всерос. совещания-семинара. М: НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. С. 305—307.

15. Сальников Я. В. Временимпульсный способ преобразования сигналов с индуктивных датчиков // INTERMATIC — 2014: Материалы межд. науч.-техн. конф. Москва, 2014. С. 165—166.

16. Копытов С. М., Космынин А. В., Ульянов А. В. Способ измерения воздушного зазора бесконтактных подшипников // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 3. С. 40—42.

Дата принятия 2016 г.