

УДК 681.518

А. С. ГОЛЬЦОВ, А. В. САВЧИЦ, О. В. ЗУЕВА

*Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Россия*

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЛАВНОГО ЗОЛОТНИКА И СЕРВОМОТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТКРЫТИЕМ НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ГИДРОТУРБИНЫ

*В статье представлена методика диагностирования технического состояния наиболее важных узлов системы управления открытием направляющего аппарата гидротурбины – главного золотника и сервомотора. Приведена методика, позволяющая обнаруживать и диагностировать неисправности в данных узлах на основе анализа диагностических коэффициентов, получаемых из их математических моделей. Приведены диагностические модели главного золотника и сервомотора, а также диагностические коэффициенты, полученные на их основе. Показаны контрольные карты диагностических коэффициентов главного золотника и сервомотора при отсутствии неисправностей и их наличии.*

**Ключевые слова:** диагностирование, техническое состояние, главный золотник, сервомотор, направляющий аппарат, контрольные карты, математические модели.

### Введение

Гидроэлектростанции являются стратегически важными объектами любой страны, требующими особого контроля и своевременного обслуживания. Выход из строя одного гидроагрегата (ГА), в лучшем случае, может привести к длительному ремонту и сокращению прибыли от продажи электроэнергии, а в худшем – к серьезной аварии техногенного характера. Примером такой аварии можно считать аварию на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 году.

В последние несколько лет в процессе внедрения на ГЭС подсистем группового регулирования мощности новыми руководящими документами были установлены жесткие требования к безотказной работе ГА и к времени, затрачиваемому на устранение неисправностей. Поэтому стало уделяться большое внимание проблемам диагностирования технического состояния узлов гидроагрегатов.

На данный момент готовых подсистем для диагностирования технического состояния узлов ГА представлено мало и их стоимость очень высока.

В мировой практике существует большое количество методов диагностирования, которые принято подразделять на методы обнаружения неисправностей и методы диагностирования неисправностей [1 - 3]. Большая часть этих методов либо сложна в реализации, либо требует наличия большого количества экспериментальной информации. Часто необходимую экспериментальную информацию невозможно получить, так как необходимые датчики не устанавливаются на анализируемом узле ГА.

Таким образом, становится актуальной задача, связанная с разработкой методов и систем диагностирования технического состояния узлов ГА в режиме реального времени, использующих только существующие штатные датчики [4].

### 1. Методика диагностирования технического состояния узлов ГА

В рассматриваемой работе для диагностирования неисправностей были выбраны главный золотник (ГЗ) и сервомотор (СМ) системы управления открытием направляющего аппарата (НА).

Сервомотор является силовым органом, который осуществляет открытие НА. Перемещением штока поршня сервомотора управляет ГЗ. Он осуществляет изменение величины и знака скорости сервомотора от нуля до его максимального значения за счет регулирования расхода жидкости, поступающей в сервомотор [5].

Основная трудность заключается в получении диагностических признаков и применении методов, которые позволят обнаруживать неисправности в диагностируемых узлах ГА.

Для целей диагностирования хорошо зарекомендовал себя метод, основанный на анализе диагностических коэффициентов (ДК), которые можно получить из математических моделей диагностируемого оборудования [1]. Но он используется только для обнаружения возникающих отклонений текущих значений ДК от значений ДК исправных узлов. Поэтому его следует совмещать с другими методами, которые позволят определить тип и место

неисправности. Для этих целей подходят контрольные карты Шухарта, которые позволяют анализировать полученные ДК статистическими методами [5, 6]. Но классические карты Шухарта предназначены для анализа в статических режимах, поэтому в работе предлагается использовать контрольные карты индивидуальных значений.

Выбор карт индивидуальных значений обусловлен тем, что диагностические коэффициенты должны формироваться в реальном времени. Но возможность формирования рациональных подгрупп с определенной выборкой в каждой подгруппе может привести к ложным срабатываниям диагностического анализа.

Следует отметить, что для гидроприводов существуют апробированные методы диагностики, основанные на определении числовых значений параметров их математических моделей, и определены диагностические признаки, позволяющие судить о возможном развитии неисправностей [2, 3].

### 1.1. Математические модели главного золотника и сервомотора

Для определения числовых значений диагностических коэффициентов используются уравнения движения штоков ГЗ и СМ [7, 9]:

$$X_z(t) = a_1 \cdot \dot{X}_z(t) \cdot \text{sign}(\dot{X}_z(t)) + a_2 \cdot \ddot{X}_z(t) + a_3 \cdot U(t), \quad (1)$$

$$X_{CM}(t) = r_1 \cdot \ddot{X}_{CM}(t) + r_2 \cdot \dot{X}_{CM}(t) + r_3 \cdot X_{CM}(t) + (r_4 + r_5 \cdot P_C(t)) \cdot \text{sign}(\dot{X}_{CM}(t)) + r_6 \cdot \dot{X}_z(t), \quad (2)$$

где  $X_z(t)$ ,  $X_{CM}(t)$  – перемещения штоков ГЗ и СМ соответственно;

$\dot{X}_z(t)$ ,  $\dot{X}_{CM}(t)$  – скорости штоков ГЗ и СМ;

$\ddot{X}_z(t)$ ,  $\ddot{X}_{CM}(t)$  – скорость изменения ускорения штока СМ;

$U(t)$  – воздействие на шток ГЗ, формируемое регулятором;

$\ddot{X}_{CM}(t)$  – ускорения штоков ГЗ и СМ;

$P_C(t)$  – сила, действующая на шток сервомотора от лопаток направляющего аппарата;

$a_i$ ,  $r_j$  – параметры, числовые значения которых изменяются при возникновении и развитии неисправности и, поэтому, содержат необходимую информацию о техническом состоянии ГЗ и СМ.

Текущие значения переменных  $X_z(t_j)$ ,

$X_{CM}(t_j)$ ,  $U(t_j)$  и  $P_C(t_j)$  в дискретные моменты времени  $t_j$  измеряют штатными датчиками положения, установленными на ГЗ и сервомоторе. Производные этих переменных по времени вычисляют численным методом.

Числовые значения параметров  $a_i$ ,  $r_j$  математических моделей (1) и (2) главных золотников и сервомоторов заведомо исправных ГА были определены методом наименьших квадратов по результатам измерений переменных  $X_z(t_j)$ ,  $X_{CM}(t_j)$ ,  $U(t_j)$  и  $P_C(t_j)$ , выполненных при пусках и остановках ГА.

Адекватность математических моделей исправных ГА была проверена по экспериментальным данным, полученным при натурных энергетических испытаниях этих ГА. Во всех экспериментах погрешность определения перемещений штоков ГЗ и СМ по уравнениям (1) и (2) была меньше 7% (для диагностики технического состояния ГЗ и СМ допустимо применять модели с погрешностью до 12% [10]). Результаты такой проверки математических моделей ГЗ и СМ гидроагрегата №16 Волжской ГЭС приведены на рис. 1 и 2.

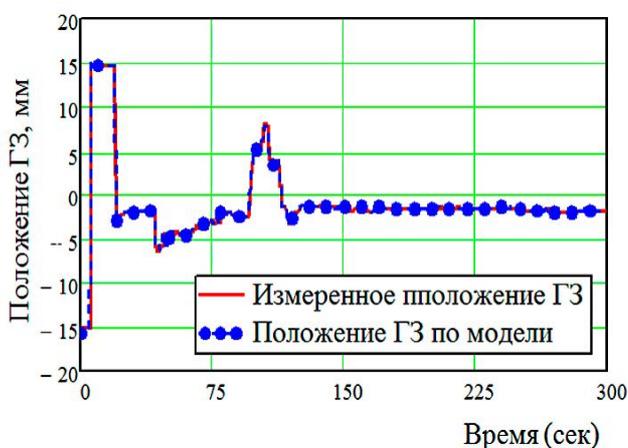


Рис. 1. Изменение положения штока ГЗ ГА № 16 Волжской ГЭС

### 1.2. Диагностические коэффициенты

При диагностике технического состояния ГЗ и СМ числовые значения параметров  $a_i$ ,  $r_j$  математических моделей (1) и (2) определяют в режиме реального времени по алгоритму рекуррентного метода наименьших квадратов и пересчитывают в диагностические коэффициенты по следующим формулам.

Коэффициент «гидравлической пружины»:

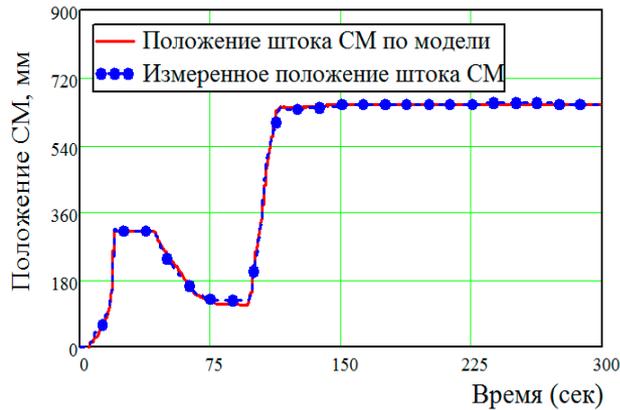


Рис. 2. Изменение положения штока сервомотора ГА № 16 Волжской ГЭС

$$C_{ГП} = \frac{m}{a_2}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса штока золотника.

Коэффициент контактного трения:

$$\mu = \frac{\rho \cdot \nu \cdot l \cdot h}{a_1 \cdot \varepsilon \cdot C_{ГП}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность гидравлической жидкости;

$\nu$  – кинематическая вязкость;

$l$  – длина дросселирующего окна;

$h$  – ширина дросселирующего окна;

$\varepsilon$  – зазор между золотниковой парой и цилиндрическим каналом.

Коэффициент усиления:

$$b = -a_3 \cdot C_{ГП}. \quad (5)$$

Диагностические признаки неисправностей золотника, приводящих к изменению числовых значений диагностических коэффициентов, приведены в таблице 1 [2, 3].

Таблица 1

Диагностические признаки главного золотника

Коэффициент	Возможная неисправность
$C_{ГП}$	Наличие утечек в ГЗ за счет механического износа уплотнений или золотниковой пары.
$\mu$	Наличие залипания или перекоса ГЗ, а также образование задиров, налипания металлической крошки на кромках золотниковых пар или присутствие примесей.
$b$	Указывает на возможные проблемы с катушкой управления, а так же с потерей скорости перемещения ГЗ из-за наличия воздуха или воды в гидравлической жидкости.

Коэффициент жесткости нагрузки:

$$K = -\frac{1}{r_5}. \quad (6)$$

Сила трения:

$$F_{ТР} = -r_4 \cdot K. \quad (7)$$

Коэффициент утечек:

$$K_C = -\frac{m_{П} \cdot V}{4\beta \cdot K \cdot r_1}, \quad (8)$$

где  $m_{П}$  – масса поршня;

$V$  – объем масла в сервомоторе;

$\beta$  – модуль объемной упругости.

Коэффициент расхода золотника:

$$K_P = -\frac{r_6 \cdot K \cdot K_C}{A_{П}}, \quad (9)$$

где  $A_{П}$  – площадь поршня.

Коэффициент вязкого трения:

$$\mu_{П} = -\frac{4\beta \cdot K_C \cdot (r_2 \cdot K + m_{П})}{V}. \quad (10)$$

Диагностические признаки неисправностей золотника, приводящие к изменению числовых значений диагностических коэффициентов, приведены в таблице 2 [2, 3].

Таблица 2

Диагностические признаки сервомотора

Коэффициент	Возможная неисправность
$K$	Наличие неисправностей в механизме открытия НА (заедание регулирующего кольца или звеньев кулисного механизма).
$F_{ТР}$	Наличие перекоса оси сервомотора, налипания металлической крошки на поршень или наличие примесей в гидравлической жидкости.
$K_P$	Возможные утечки гидравлической жидкости в питающей линии между золотником и сервомотором.
$\mu_{П}$	Наличие включений воздуха или воды в гидравлической жидкости, а также чрезмерное повышение ее температуры.
$K_C$	Перетечки гидравлической жидкости между полостями сервомотора из-за износа манжет на поршне и уплотнений стакана.

### 1.3. Контрольные карты

Получаемые из математических моделей диагностические коэффициенты анализируются с использованием контрольных карт Шухарта. Ввиду того, что диагностирование должно осуществляться в режиме реального времени были использованы карты для индивидуальных значений [6, 7], предназначенные для таких случаев.

Контрольные карты представляют собой графические средства анализа с использованием статистических данных. Если наносимая на график статистика превышает контрольный предел, это говорит о том, что процесс находится «вне (статистического) контроля». Пересечение контрольного предела указывает на наличие какой-либо неполадки [6].

Расчет контрольных границ был выполнен согласно ГОСТ Р 50779.42 – 99 [11].

Предварительно были получены базовые контрольные карты для заведомо исправного главного золотника и сервомотора. Они были приняты в качестве базовых (эталонных) карт. Карты были составлены для двух сезонов – летнего и зимнего, так как эксплуатационные характеристики сильно разнятся и это будет сказываться на правильности диагностического анализа. При этом были учтены переходные процессы: контрольные пределы были передвинуты на максимальное значение диагностического коэффициента в переходном процессе.

## 2. Апробация методики диагностики

Последующий анализ заключался в сравнении текущих значений диагностических коэффициентов с базовыми контрольными картами.

Для анализа использовались данные, полученные с главного золотника и сервомотора однотипных гидроагрегатов, но с разным сроком эксплуатации [12–14].

Так, в качестве примера, на рис. 3 представлена базовая контрольная карта ДК  $C_{ГП}$  главного золотника, а на рис. 4 контрольная карта этого же ДК главного золотника, находящегося в эксплуатации с 2009 года.

На контрольной карте ГЗ, приведенной на рис. 4, наблюдается уменьшение значения диагностического коэффициента  $C_{ГП}$  относительно базовых контрольных границ. Переход коэффициента за контрольные границы указывает на возможное развитие или образование утечек в ГЗ.

На рисунке 5 представлена базовая контрольная карта ДК  $\mu_{П}$  сервомотора, на рисунке 6 контрольная карта этого же ДК сервомотора, находящегося в эксплуатации с 2009 года.

На контрольной карте диагностического коэффициента  $\mu_{П}$  (рис. 6) хорошо видно превышение допустимых контрольных пределов, что говорит о возможном развитии неисправностей связанных с наличием в гидравлической жидкости посторонних включений (газ, вода, металлическая стружка), износом уплотнений или перекосом штока сервомотора.

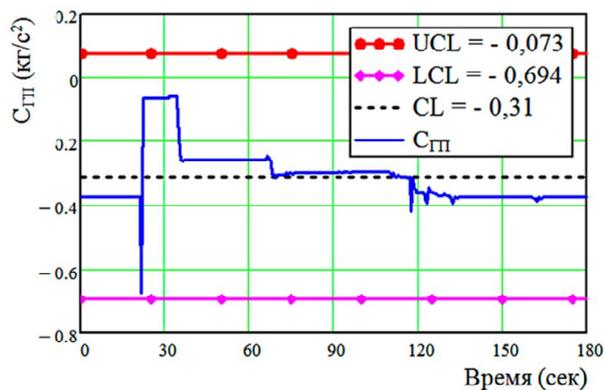


Рис. 3. Базовая контрольная карта индивидуальных значений ДК  $C_{ГП}$  главного золотника

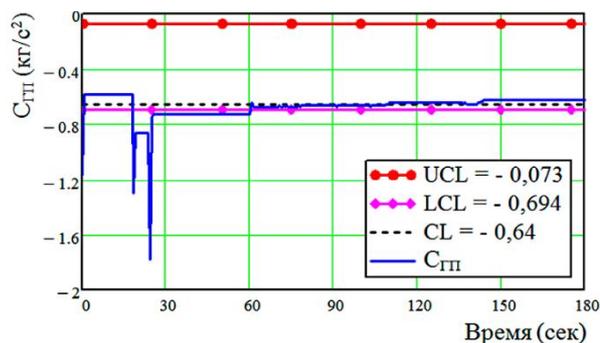


Рис. 4. Контрольная карта индивидуальных значений ДК  $C_{ГП}$  главного золотника ГА №9

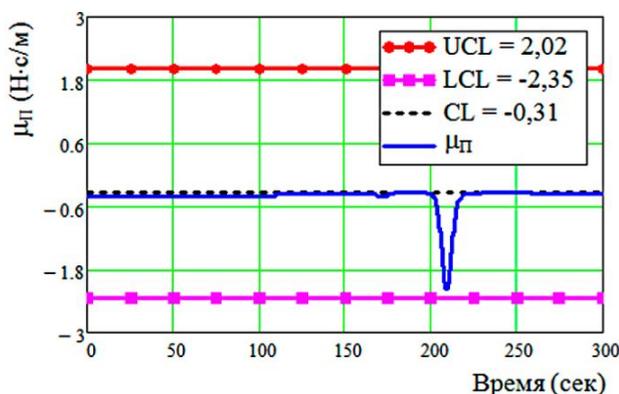


Рис. 5. Базовая контрольная карта индивидуальных значений ДК  $\mu_{П}$  сервомотора

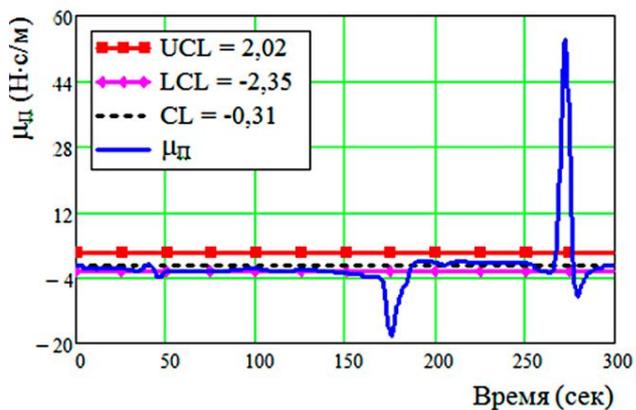


Рис. 6. Контрольная карта индивидуальных значений ДК $\mu_D$  сервомотора ГА №22

### Заключение

Предложенная методика диагностирования технического состояния главного золотника и сервомотора системы управления открытием НА позволяет заблаговременно определять развитие неисправностей в анализируемых узлах. Для повышения точности диагностирования необходимо накапливать базу данных, которая будет содержать информацию об изменении значений диагностических коэффициентов. Также данную методику можно распространить на другие узлы гидроагрегата и дополнить модулем прогнозирования развития неисправности.

### Литература

1. Ding, S. X. *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools [Text]* / S. X. Ding. – Berlin : Springer, 2008 – 473 p.
2. Chinniah, Y. A. *Fault detection in the electrohydraulic actuator using extended Kalman filter: thesis for the degree of doctor of philosophy [Text]* / Yuvin Adnarain Chinniah. – Saskatoon, 2004. – 251 p.
3. Iserman, R. *Fault-diagnosis applications. Model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault-tolerant systems [Text]* / R. Iserman. – New York : Springer, 2011. – 354 p.
4. Савчиц, А. В. Система диагностики технического состояния главного золотника и сервомотора электрогидравлического преобразователя системы управления открытием направляющего аппарата гидроагрегата Волжской ГЭС [Электронный ресурс] / С. А. Браганец, А. С. Гольцов, А. В. Савчиц // «Инженерный вестник Дона», 2013, № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1912> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Барлит, В. В. *Гидравлические турбины [Текст]* / В. В. Барлит. – К. : Вища шк., 1977. – 360 с.
6. Химмельблау, Д. *Анализ процессов статистическими методами [Текст]* / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 958 с.
7. Montgomery, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control [Text]* / D.C. Montgomery ; 7th edition. – New York : John Wiley & Sons, 2013. – 754 p.
8. Гамыгин, Н. С. *Гидравлический привод систем управления [Текст]* / Н. С. Гамыгин. – М. : Машиностроение, 1972. – 376 с.
9. Merritt, H. E. *Hydraulic control systems [Text]* / Herbert E. Merritt. – New York : John Wiley & Sons, Inc, 1967. – 368 p.
10. Коновалов, В. И. *Идентификация и диагностика [Текст]* / В. И. Коновалов. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2010. – 156 с.
11. ГОСТ Р 50779.42 – 99 *Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. [Текст]*. – Введ. 15.04.1999. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 36 с.
12. *Технический отчет по натурным энергетическим испытаниям гидроагрегата № 9 Волжской ГЭС [Текст]* / Фирма ОРГРЭС. – М., 2009. – 120 с.
13. *Технический отчет по натурным энергетическим испытаниям гидроагрегата № 16 Волжской ГЭС [Текст]* / Фирма ОРГРЭС. – М., 2013. – 150 с.
14. *Технический отчет по натурным энергетическим испытаниям гидроагрегата № 22 Волжской ГЭС [Текст]* / Фирма ОРГРЭС. – М., 2008. – 110 с.

Поступила в редакцию 3.03.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В. А. Санинский, Волжский политехнический институт, Волжский.

**ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГОЛОВНОГО ЗОЛОТНИКА І СЕРВОМОТОРА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДКРИТТЯМ НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТУ ГІДРОТУРБИНИ***А. С. Гольцов, А. В. Савчиц, О. В. Зуєва*

У статті представлено методику діагностування технічного стану одних з найбільш важливих вузлів системи управління відкриттям направляючого апарату гідротурбіни - головного золотника і сервомотора. Наведено методику, що дозволяє виявляти і діагностувати несправності в даних вузлах на основі аналізу діагностичних коефіцієнтів, одержуваних з їх математичних моделей. Наведено діагностичні моделі головного золотника і сервомотора, а так само діагностичні коефіцієнти, які отримано на їх основі. Показано контрольні карти діагностичних коефіцієнтів головного золотника і сервомотора за відсутності несправностей та їх наявності.

**Ключові слова:** діагностування, технічний стан, головний золотник, сервомотор, направляючий апарат, контрольні карти, математичні моделі.

**DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF THE MAIN SPOOL AND SERVO MOTOR OPENING OF WICKED GATE HYDROUNIT***A. S. Goltsov, A. V. Savchits, O. V. Zuyeva*

The article presents a method of diagnosing a technical condition of some of the most important parts of the system to control the opening of the wicked gate hydro turbine - the main spool and servomotor. The technique, which allows detecting and diagnosing faults in the data nodes, based on the analysis of diagnostic coefficients derived from their mathematical models. The diagnostic model of the main spool and the servomotor as well as diagnostic ratios derived from them. Showing the control chart diagnostic coefficients of the main spool and servomotor with no faults and their availability.

**Keywords:** diagnosis, technical condition, the main spool, servomotor, wicked gate, control chart, mathematical models.

**Гольцов Анатолий Сергеевич** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика, электроника и вычислительная техника», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский, Россия, e-mail: GoltsovAS@mail.ru.

**Савчиц Артем Вячеславович** – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Автоматика, электроника и вычислительная техника», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский, Россия, e-mail: artem-savchic@yandex.ru.

**Зуева Ольга Владимировна** – ассистент кафедры «Автоматика, электроника и вычислительная техника», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский, Россия, e-mail: zuevaolga84@mail.ru.