

УДК 519.248:658.518.5  
DOI: 10.15827/0236-235X.123.620-625

Дата подачи статьи: 20.11.17  
2018. Т. 31. № 3. С. 620–625

## **Система статистического анализа и контроля стабильности вибраций гидроагрегата**

*В.Н. Клячкин*<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, *v\_kl@mail.ru*

*Ю.Е. Кувайскова*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

*А.В. Иванова*<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup> *Ульяновский государственный технический университет, кафедра прикладной математики и информатики, г. Ульяновск, 432027, Россия*

Система вибромониторинга гидроагрегата включает показания распределенной сети интеллектуальных датчиков относительной и абсолютной вибраций, а также датчиков измерения скорости вращения вала. Эти датчики предназначены для работы в составе системы управления гидроагрегатом. Датчики объединяются в единую локальную сеть для передачи данных о параметрах вибраций в систему управления.

В режиме работы в сети при условии стационарной работы агрегата для оценки стабильности вибраций могут быть использованы алгоритмы многомерного статистического контроля, аналогичные применяемым при контроле многопараметрических технологических процессов. Такой подход обеспечивает раннее выявление нарушений процесса статистическими методами и своевременное принятие управляющих воздействий.

На основе проведенного исследования и анализа результатов вибромониторинга гидроагрегата на Краснополянской ГЭС разработана программная система, обеспечивающая контроль стабильности вибраций. Система включает три подсистемы: для визуализации и группировки показателей, для контроля независимых и коррелированных групп показателей по критериям стабильности среднего уровня и для рассеяния соответствующих процессов. Для контроля независимых показателей используются карты Шухарта для средних значений и стандартных отклонений. При контроле коррелированных показателей применяются карты Хотеллинга для мониторинга среднего уровня процесса и карта обобщенной дисперсии для мониторинга многомерного рассеяния.

Система позволяет своевременно выявлять возможные нарушения и обеспечивает предотвращение выхода контролируемых показателей за пределы допустимых значений.

**Ключевые слова:** *вибрации, статистический контроль, карта Хотеллинга, обобщенная дисперсия, диагностика нарушений.*

Аварийные ситуации на гидроагрегатах могут привести к перебоям в производстве электроэнергии и нанести вред персоналу и окружающей среде. Причиной подобных происшествий часто являются вибрации. Одно из направлений повышения эффективности управления гидроагрегатом и исключения таких ситуаций связано с возможностью раннего предупреждения о предполагаемой аварии путем прогнозирования состояния агрегата по множеству его характеристик, в частности, по вибрациям.

Система вибромониторинга гидроагрегата включает контролируемые характеристики – показания распределенной сети интеллектуальных датчиков относительной и абсолютной вибраций, а также датчиков измерения скорости вращения вала [1]. Эти датчики предназначены для работы в составе системы управления гидроагрегатом. Датчики объединяются в единую локальную сеть для передачи данных о параметрах вибраций в систему управления.

Характеристики вибраций в различных зонах гидроагрегата могут быть взаимосвязаны и образуют систему временных рядов. Можно построить соответствующие математические модели как в режиме запуска агрегата, так и в режиме работы в сети. На базе этих моделей возможны прогнозирование изменений характеристик агрегата и обнаружение нарушений процесса до того, как контроли-

руемые параметры превысили предельные значения [2, 3].

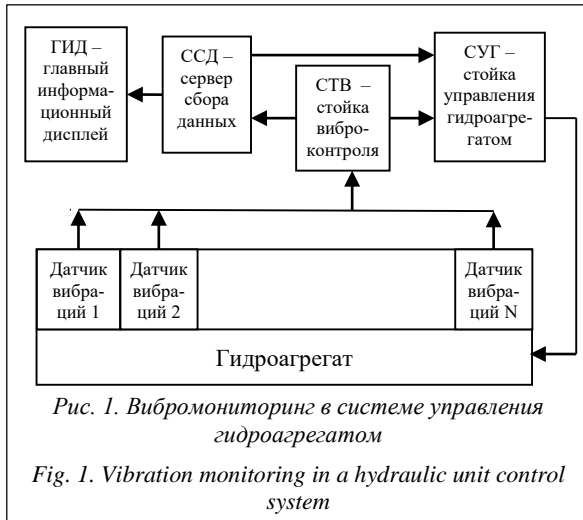
В режиме работы в сети при условии стационарной работы агрегата для оценки стабильности процесса могут быть использованы алгоритмы многомерного статистического контроля, аналогичные применяемым при контроле многопараметрических технологических процессов [4, 5]. Такой подход обеспечивает раннее выявление нарушений процесса статистическими методами и своевременное принятие управляющих воздействий.

### **Постановка задачи**

Для обработки информации и разработки методики анализа и контроля стабильности вибраций использовались результаты записи показателей в системе управления гидроагрегатом на Краснополянской ГЭС (Краснодарский край) в режиме работы в сети, при котором контролируемые показатели должны быть стабильными. Проводился мониторинг биения валов и вибраций гидроагрегата с периодичностью два измерения в секунду. Процесс определяется десятью показателями:  $X_1$ – $X_2$  – вибрации нижнего генераторного подшипника верхнего бьефа и на правом берегу;  $X_3$ – $X_4$  – соответствующие вибрации верхнего генераторного подшипника;  $X_5$ – $X_6$  – бой вала гидротурбины, нижний бьеф и правый берег соответственно;  $X_7$ – $X_8$  – бой

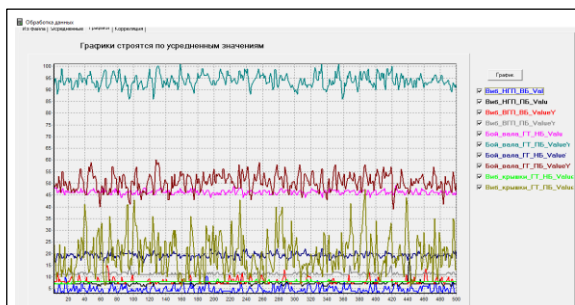
вала гидрогенератора;  $X_9$ – $X_{10}$  – вибрации крышки гидротурбины.

На рисунке 1 показана схема системы управления гидроагрегатом. Данные по вибрациям от гидроагрегата поступают через стойку виброконтроля на сервер сбора данных и в виде дискретного сигнала в режиме реального времени на стойку управления гидроагрегатом, с помощью которой изменяется нагрузка или происходит останов агрегата.



Для выявления участков установившейся (стационарной) работы гидроагрегата вибрации усреднялись по времени и визуализировались. На рисунке 2 в качестве примера показаны вибрации при усреднении данных по 10 сек. Начальная часть участка стабильной работы (25–30 усредненных данных) используется для оценки характеристик процесса: среднего уровня, рассеяния, корреляций, положения контрольных границ.

Статистический контроль многопараметрического процесса предполагает выделение из множества контролируемых показателей групп коррелированных параметров: для них необходимо применение многомерных методов, основанных на алгоритме Хотеллинга [5, 6]. Кроме того, статистический контроль ориентирован на нормально распределенные данные, однако, имея в виду большой объем измерений и усреднение данных, в условиях



рассматриваемой задачи это обстоятельство может не учитываться.

### Предварительный анализ данных

Для анализа взаимосвязей между контролируемыми показателями строилась корреляционная матрица и проверялась значимость корреляций по критерию Стьюдента. Корреляционная матрица показана на рисунке 3, значимые корреляции выделены жирным шрифтом. Имеют место значимая отрицательная корреляция  $r = -0,81$  между показателями  $X_5$  и  $X_7$  (боем валов гидрогенератора и гидротурбины на нижнем боефе) и положительная корреляция  $r = 0,61$  между  $X_6$  и  $X_8$  (аналогичными показателями на правом берегу). Следует отметить, что корреляции зависят от того, как проводится усреднение данных (на рисунке приведены данные при усреднении по 10 сек.).

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$X_1$	1									
$X_2$	-0,01	1								
$X_3$	-0,14	-0,03	1							
$X_4$	-0,18	-0,01	0,10	1						
$X_5$	-0,01	-0,02	0,15	-0,17	1					
$X_6$	0,03	0,38	-0,02	0,10	0,12	1				
$X_7$	-0,07	0,10	-0,20	0,35	<b>-0,81</b>	-0,07	1			
$X_8$	0,03	0,44	-0,12	0,22	-0,13	<b>0,61</b>	0,31	1		
$X_9$	-0,06	0,14	0,05	0,18	-0,24	0,09	0,31	0,20	1	
$X_{10}$	-0,01	0,04	-0,08	0,18	-0,10	0,05	0,22	0,09	0,21	1

*Рис. 3. Корреляционная матрица (выделены значимые корреляции)*

*Fig. 3. A correlation matrix (significant correlations are highlighted)*

Анализ корреляционной матрицы показывает, что контролируемые показатели можно разделить на две группы.

1. Независимые показатели  $X_1$ – $X_4$  и  $X_9$ – $X_{10}$ . Для контроля этих шести показателей могут быть использованы стандартные карты Шухарта для средних значений и стандартных отклонений.

2. Парно коррелированные показатели  $X_5$ – $X_7$ ,  $X_6$ – $X_8$ . Эти две пары показателей следует контролировать по стабильности среднего уровня с использованием карт Хотеллинга, а по контролю рассеяния – карт обобщенной дисперсии.

### Статистический контроль независимых показателей

Контрольные карты Шухарта для показателя  $X_1$  (вибрации нижнего генераторного подшипника верхнего боефа), построенные в системе Statistica на этапе анализа для 30 выборок [7], показаны на рисунке 4. Видно, что процесс стабилен: нет выходов контролируемых значений за границы ни на одной из карт. Полученные значения среднего уровня процесса, среднего размаха и контрольных границ могут быть использованы для дальнейшего мони-

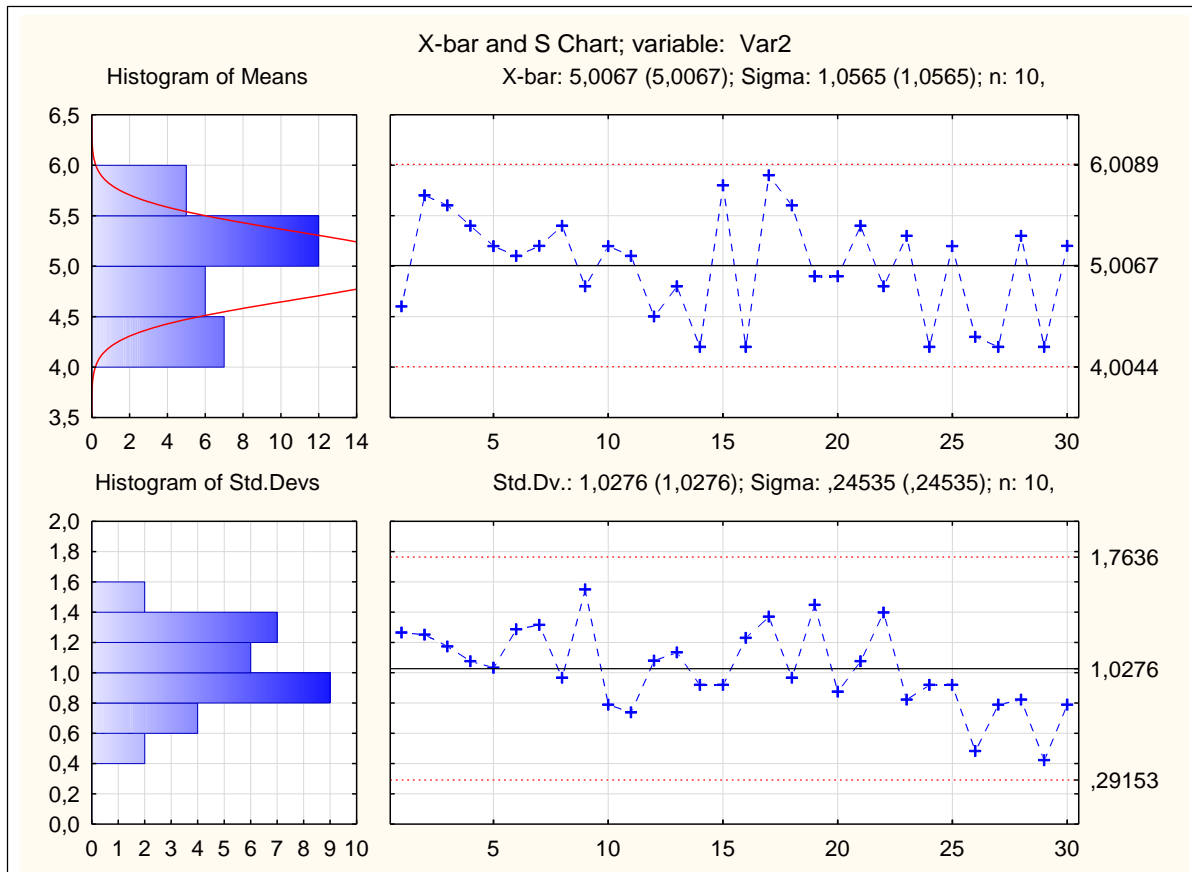


Рис. 4. Карты Шухарта для средних значений и стандартных отклонений по показателю  $X_1$

Fig. 4. Stewhart charts for mean values and standard deviations in terms of  $X_1$

торинга процесса по этому показателю. Подобные карты были построены и для других независимых показателей.

При мониторинге процесса для оценки стабильности вибраций, кроме выходов точек за границы соответствующих доверительных интервалов, использовались и другие критерии, связанные с наличием так называемых неслучайных структур: наличие 9 точек подряд по одну сторону от центральной линии, 6 возрастающих или убывающих точек подряд (тренд), 14 попеременно возрастающих и убывающих точек и других [4].

**Многомерный контроль среднего уровня процесса**

Статистический контроль коррелированных показателей, как и независимых, может проводиться по среднему уровню вибраций и их рассеянию. Для контроля среднего уровня многопараметрического процесса используется алгоритм Хотеллинга, а многомерное рассеяние характеризуется обобщенной дисперсией – определителем ковариационной матрицы [6, 8].

На этапе анализа процесса в условиях его стабильности по результатам исследования 30 выборок для каждой группы коррелированных показателей (в рассматриваемом процессе таких групп

две:  $X_5-X_7$  и  $X_6-X_8$ ) оцениваются следующие показатели:

– вектор средних  $\mu_0 = (\mu_1, \dots, \mu_p)^T$ ,

$$\mu_j = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n x_{ijt}, \quad (1)$$

где  $p$  – количество контролируемых показателей;  $m$  – количество выборок;  $n$  – объем выборки;  $x_{ijt}$  – результат  $i$ -го наблюдения по  $j$ -му показателю в  $t$ -й выборке;

– ковариационная матрица, компоненты которой  $s_{jk} = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ijt} - \mu_j)(x_{ikt} - \mu_k)$ , (2)

$j, k = 1, \dots, p$

(определитель этой матрицы используется как оценка целевой обобщенной дисперсии  $|\Sigma_0|$ );

– контрольные границы для карт Хотеллинга и обобщенной дисперсии.

Положение контрольной границы карты Хотеллинга определяется формулой

$$T_{kp}^2 = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{1-\alpha}(p, mn-m-p+1), \quad (3)$$

где  $F_{1-\alpha}(k_1, k_2)$  – квантиль  $F$ -распределения Фишера с числами степеней свободы в числителе  $k_1$ , в знаменателе –  $k_2$  порядка  $1 - \alpha$ ,  $\alpha$  – значение уровня значимости (вероятность ложной тревоги).

Верхняя и нижняя контрольные границы карты обобщенной дисперсии:

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = \Sigma_0 | (b_1 \pm 3\sqrt{b_2}) . \quad (4)$$

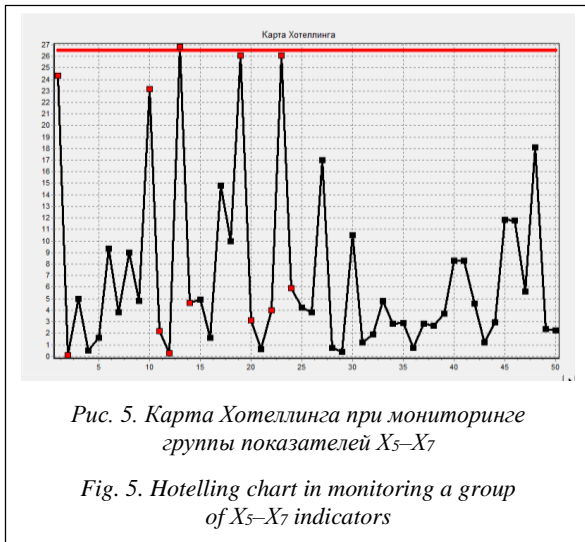
Коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  вычисляются по формулам:

$$b_1 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{j=1}^p (n-j), \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{j=1}^p (n-j) \left[ \prod_{k=1}^p (n-k+2) - \prod_{k=1}^p (n-k) \right]. \quad (6)$$

Если значение на нижней границе окажется меньше нуля, она принимается равной нулю.

Найденные характеристики используются при последующем мониторинге вибраций. На рисунке 5 показана карта Хотеллинга при мониторинге группы показателей  $X_5-X_7$ : на данном этапе наблюдений имеет место выброс за контрольную границу в выборке 13.

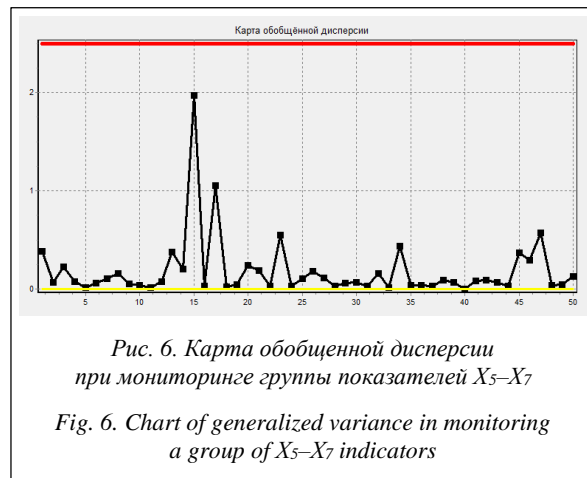


Возможные нарушения процесса анализировались также на наличие неслучайных структур (тренд, цикличность, приближение к оси абсцисс или контрольной границе, резкие скачки), а также с использованием предупреждающей границы [9]. Были выявлены резкие скачки в выборках 1-2, 10-11, 12-13-14, 19-20 и 22-23-24, свидетельствующие о возможном нарушении процесса.

Заметим, что эти скачки, как и выход точки за контрольную границу, свидетельствуют о нарушении статистической стабильности среднего уровня процесса по группе показателей  $X_5-X_7$ , но не о выходе соответствующих характеристик за пределы допустимых значений. Принятие необходимых мер управленческого воздействия обеспечит стабилизацию процесса.

Одновременно проводился и мониторинг многомерного рассеяния по этим же группам показате-

лей. На рисунке 6 показана карта обобщенной дисперсии, полученная для той же группы показателей  $X_5-X_7$  в то же время, что и карта Хотеллинга (рис. 5). Эта карта свидетельствует о стабильности процесса по критерию многомерного рассеяния.

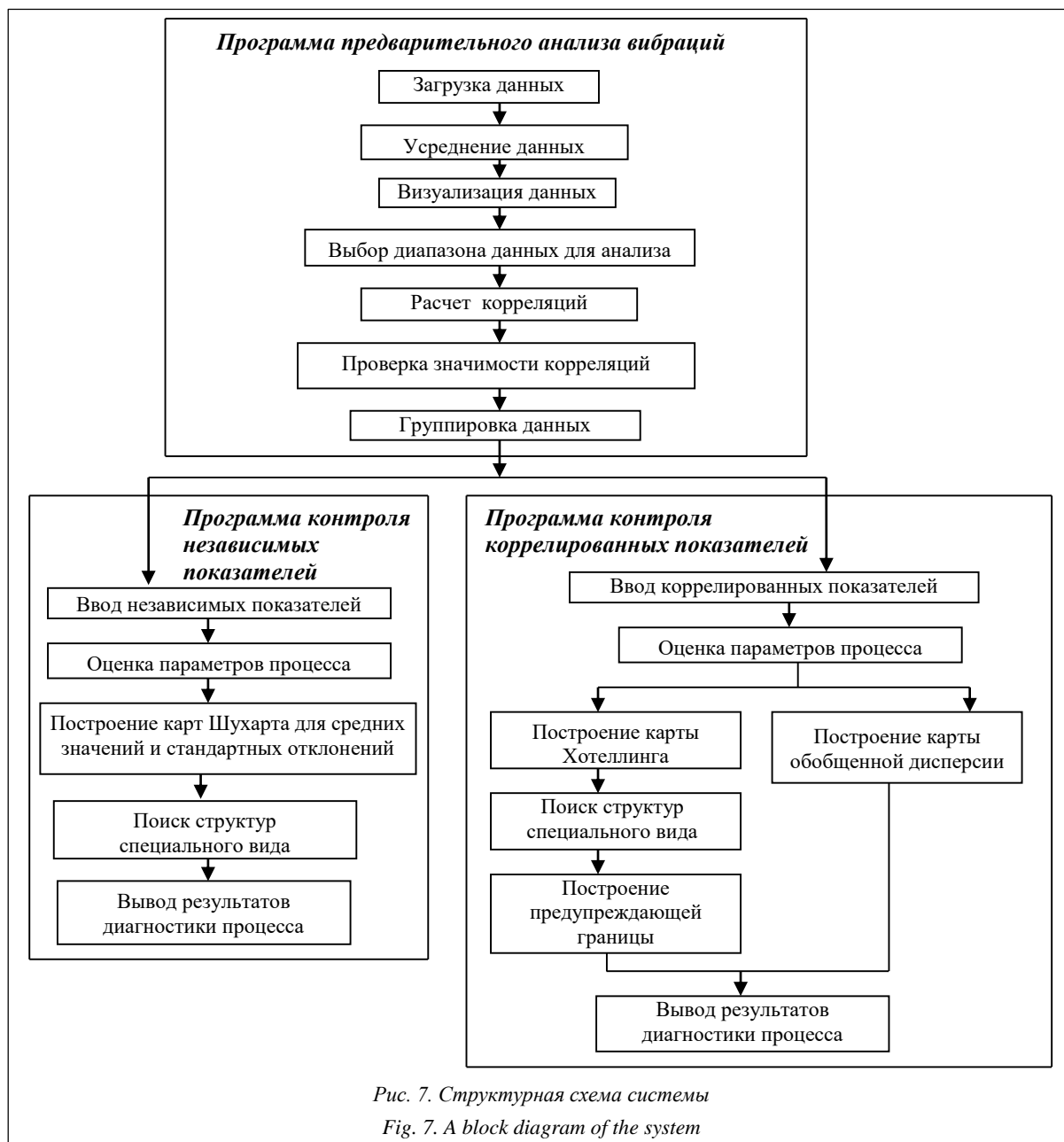


### Структура системы статистического анализа и контроля стабильности вибраций гидроагрегата

Система (структурная схема представлена на рисунке 7) предназначена для анализа и контроля вибраций гидроагрегата при его стационарной работе в сети с целью своевременного выявления нарушений стабильности и предотвращения выхода вибраций за допустимые границы. Система включает три программы.

Программа для предварительного анализа показаний интеллектуальных датчиков контроля вибраций дает возможность усреднить и визуализировать показания, оценить коррелированность между показаниями различных датчиков и разделить их на группы независимых и коррелированных с целью дальнейшего статистического контроля. Интерфейс программы на этапе усреднения данных (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-3/2018-3-dop/19.jpg>), графики вибраций (рис. 2) построены в этой же программе.

Программа контроля стабильности вибраций по независимым показателям предназначена для анализа и мониторинга процесса с использованием карт Шухарта для средних значений и стандартных отклонений. На этапе анализа по представленной выборке результатов наблюдений оцениваются среднее значение и среднее стандартное отклонение, определяется положение центральных линий и контрольных границ на картах, которые в дальнейшем используются при мониторинге процесса. На этапе мониторинга также выявляются неслучайные структуры, появление которых может свидетельствовать о нарушении стабильности процесса.



Программа контроля стабильности вибраций по коррелированным показателям предназначена для анализа и мониторинга с применением карты Хотеллинга для среднего уровня многомерного процесса и карты обобщенной дисперсии. При этом на этапе анализа оцениваются соответствующие характеристики по формулам (1)–(6), используемые при мониторинге коррелированных показателей. При мониторинге процесса также выявляются структуры специального вида, кроме того, используется предупреждающая граница для выявления нарушений по карте Хотеллинга [9]. Интерфейс программы на этапах выбора параметров и расчетов по алгоритмам Хотеллинга и обобщенной дисперсии представлен на рисунках (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-3/2018-3-dop/20.jpg>, <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-3/2018-3-dop/21.jpg>), а построенные в программе контрольные карты – на рисунках 5 и 6.

Особенности разработанной программы по сравнению с существующими состоят, во-первых, в комплексном подходе к мониторингу стабильности вибраций гидроагрегата (от предварительного анализа данных до заключения о наличии или отсутствия нарушения стабильности). Во-вторых, программа дает возможность оперативной обработки файлов электронных таблиц, в которых сохраняется информация датчиков контроля вибраций (просмотр усредненных данных, группировка данных). Наконец, программа контроля стабильности вибраций по коррелированным показателям разработана на основе ранее предложенной системы [9] с существенным дополнением: предварительные исследования показали, что аварийные си-

туации, связанные с нестабильностью вибраций, чаще определяются не изменением среднего уровня вибраций, а увеличением их разброса, поэтому необходим контроль рассеяния по обобщенной дисперсии.

### Заключение

На основе проведенного исследования и анализа результатов вибромониторинга гидроагрегата на Краснополянской ГЭС разработана программная система, обеспечивающая контроль стабильности вибраций. Система включает три подсистемы: для визуализации и группировки показателей, а также контроля независимых и коррелированных групп показателей по критериям стабильности среднего уровня и рассеяния соответствующих процессов. Система позволяет своевременно выявить возможные нарушения и обеспечить предотвращение выхода контролируемых показателей за пределы допустимых значений.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-732002.*

### Литература

1. Владиславлев Л.А. Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций. М.: Энергия, 1972. 153 с.
2. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 1. С. 30–34.
3. Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А. Повышение эффективности системы управления техническими объектами при использовании адаптивного динамического регрессионного моделирования временных рядов // Автоматизация процессов управления. 2013. № 4. С. 77–83.
4. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
5. Ryan T.P. Statistical methods for quality improvement. NY, John Wiley and Sons, 2011, 687 p.
6. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. NY, John Wiley and Sons, 2009, 754 p.
7. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных. Для профессионалов. СПб: Питер, 2001. 656 с.
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate statistical process control charts: an overview. Quality and Reliability Eng. Intern., 2007, vol. 23, pp. 517–543.
9. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А. Обнаружение нарушений при многомерном статистическом контроле технологического процесса // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 192–197.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.123.620-625

Received 20.11.17

2018, vol. 31, no. 3, pp. 620–625

### The system of statistical analysis and control of hydraulic unit vibration stability

V.N. Klyachkin<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor, v\_kl@mail.ru

Yu.E. Kuvayskova<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor

A.V. Ivanova<sup>1</sup>, Postgraduate Student

<sup>1</sup> Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

**Abstract.** The system of vibration monitoring of a hydraulic unit includes indications of a distributed network of relative and absolute vibration intelligent sensors, as well as sensors for measuring the shaft rotation speed. These sensors are designed to work as a part of the hydraulic unit control system. The sensors are combined into one local network to transfer data on vibration parameters to the control system.

The network operation mode during stationary operation of the unit can use multivariate statistical control algorithms in order to estimate vibration stability. These algorithms are similar to those used for controlling multiparameter technological processes. Such approach ensures early detection of process abnormalities using statistical methods and timely taking of control actions.

Based on the conducted research and result analysis of vibration monitoring of the hydroelectric unit in the Krasnopolanskaya hydroelectric power station, there is a developed software system that provides monitoring of the vibration stability. The system includes three subsystems: for visualization and grouping indicators, as well as for monitoring independent and correlated groups of indicators by stability criteria of the average level and the scattering the corresponding processes. In order to control independent indicators, the authors use Shewhart charts for mean values and standard deviations. When controlling correlated indicators, Hotelling charts are used to monitor the mean process level and a generalized variance chart for monitoring multidimensional scattering.

The system ensures timely detection of possible abnormalities and prevents overranging of controlled indicators.

**Keywords:** vibration, statistical control, Hotelling chart, generalized variance, diagnosis of violation.

**Acknowledgements.** Work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 16-48-732002.

### References

1. Vladislavlev L.A. *Vibration of hydroelectric units in hydroelectric stations*. Moscow, Energiya Publ., 1972, 153 p.
2. Klyachkin V.N., Kuvayskova Yu.E., Aleshina A.A. Modeling of vibrations of a hydrounit on the basis of adaptive dynamic regressions. *Automation. Modern Technologies*. 2014, no. 1, pp. 30–34 (in Russ.).
3. Kuvayskova Yu.E., Aleshina A.A. Increasing the efficiency of technical object control system with the use of adaptive dynamic regression modeling of the time series. *Automation of Control Processes*. 2013, no. 4, pp. 77–83 (in Russ.).
4. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding Statistical Process Control*. SPC Press, 1992, 406 p. (Russ. ed.: Moscow, AlpinaBiznesBuchs Publ., 2009, 409 p.).
5. Ryan T.P. *Statistical Methods for Quality Improvement*. NY, John Wiley and Sons Publ., 2011, 687 p.
6. Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. NY, John Wiley and Sons, 2009, 754 p.
7. Borovikov V. *STATISTICA: the Art of Data Analysis. For Professionals*. St. Petersburg, Piter Publ., 2001, 656 p.
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview. *Quality and Reliability Engineering Intern*. 2007, vol. 23, pp. 517–543.
9. Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A. Irregularities in multivariate statistical control of a technological process. *Software & Systems*. 2016, no. 3, pp. 192–197 (in Russ.).