

# Многомерные и простые методы диагностики и мониторинга кавитации

## Multidimensional and Simple Techniques for Cavitation Diagnostics and Monitoring

Бранко Баич

Korto Cavitation Services. [www.korto.com](http://www.korto.com)

Branko Bajic

Korto Cavitation Services. [www.korto.com](http://www.korto.com)

*Последствия кавитационной эрозии лучше всего оцениваются непосредственно во время ремонта. Однако, чтобы установить, какой режим эксплуатации вызывает кавитацию, и выяснить роль различных деталей турбины в этом процессе, следует провести виброакустические испытания или мониторинг. На основании примера большой радиально-осевой турбины на плотине Гранд-Кули в США, представлен многомерный вибро-акустический метод диагностики и мониторинга кавитации в сравнении с простыми техниками. Обсуждается роль модельных кавитационных испытаний и испытаний на прототипе.*

### 1. Введение

В связи с тесной зависимостью кавитационных явлений от мелких деталей конструкции турбины, номинально идентичные турбины, работающие в идентичных условиях могут иметь значительно разные кавитационные характеристики. Тот факт, что на основании модельных испытаний невозможно предсказать эти различия, требует проведения испытаний кавитации турбины в масштабах прототипа. Тогда как итоговые последствия кавитации в форме накопившейся эрозии могут быть оценены

*The consequences of cavitation erosion are best assessed directly, during an overhaul. However, in order to find out from which operating points they stem and clarify the role various turbine parts play in cavitation, one must apply vibro-acoustic measurements or monitoring. Based on the example of the large Francis turbines at the Grand Coulee Dam in the USA, the multidimensional vibro-acoustic technique for cavitation diagnostics and monitoring is presented and compared to simple techniques*

### 1. Introduction

Due to the strong dependence of cavitation on the fine details of turbine geometry, turbines declared as identical, even when operated in identical conditions, may have substantially different cavitation characteristics. The fact that model tests cannot predict these differences makes a prototype-scale inspection of turbine cavitation necessary. While the final consequence of cavitation in the form of accumulated erosion can be assessed by direct inspection in an overhaul, on-line tests on prototype turbines are necessary in order to discover the origin of the deterioration effects and to answer questions such as which operation points contribute most, and which turbine parts cause the effects? Such tests in the form of permanent monitoring

непосредственным инспектированием во время ремонта, испытания прототипов турбин в режиме on-line являются необходимыми для определения источника, вызывающего эрозию и отвечают на такие вопросы, как – какие рабочие точки больше всего влияют на эрозию? какие детали турбины вызывают ее? – такие испытания в форме непрерывного мониторинга необходимы для прослеживания эффектов действия времени и обнаружения изменений, связанных с неполадками.

Кавитацию на прототипе турбины не можно видеть. Поэтому, единственным практичным методом проведения испытаний на прототипе и мониторинга является использование подходящих вибро-акустических датчиков, установленных на турбине и прослушивания кавитационного шума, или оценивание последствий кавитации, таких как вибрации деталей турбины. В зависимости от количества датчиков и методов, используемых для анализа получаемых от них сигналов, различают два класса техник вибро-акустической диагностики и мониторинга кавитации, происходящих в турбине: многомерная и простые.

В настоящем докладе представлена многомерная техника<sup>1</sup> Корта в сравнении с двумя простыми техниками, выполненными в системах мониторинга кавитации производства двух компаний США. Сравнение основано на испытаниях<sup>2</sup>, проведенных на больших радиально-осевых турбинах Третьей гидроэлектростанции плотины Гранд-Кули, владельцем которой является агентство УСБР министерства внутренних дел США (Рис. 1).

## 2. Многомерная техника

С целью предотвращения самых худших последствий кавитационных явлений, сильно нагруженные гребные винты позади крупногабаритных корпусов судов иногда конструируются с расчетом на работу в условиях полного кавитационного течения. Ничего подобного не практикуется в гидротурбинах. В случае с гидротурбинами, кавитационные явления либо не

### Сноски

**1:** *Краткое описание:* Международный журнал по гидроэнергетике и строительству плотин [International Water Power & Dam Construction Journal], Май 2001, Февраль 2003, Ноябрь 2004

*Предварительная теория:* Журнал по гидротехнике Американского общества инженеров-механиков [Journal of Fluids Engineering of the American Society of Mechanical Engineers], Декабрь 2002

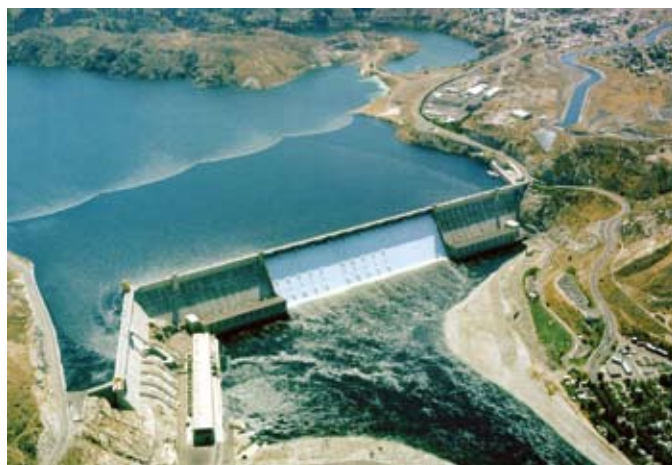
*Физические основы:* Журнал гидравлических исследований Международной ассоциации по гидравлике и исследованиям [Journal of Hydraulic Research of the International Association of Hydraulic Engineering and Research], Январь 2003

*Также смотри:* [www.korto.com/Letter.pdf](http://www.korto.com/Letter.pdf) и [www.korto.com/downloads/white\\_papers/Korto\\_Cavitation\\_diagnostics\\_and\\_monitoring.pdf](http://www.korto.com/downloads/white_papers/Korto_Cavitation_diagnostics_and_monitoring.pdf)

**2:** Гранд-Кули G-20, Многомерное кавитационное испытание. Сравнение трех методов мониторинга кавитации. Korto Cavitation Services, Отчет GC082103, Том 1 и 2, Май 2008

are essential in order to follow aging effects and detect changes due to incidents.

Cavitation in a prototype turbine can hardly be seen. Thus, the only practical manner to perform prototype-scale cavitation tests and monitoring is to use suitable vibro-acoustic sensors installed on suitable locations on a turbine and listen to cavitation noise or assess its consequences, such as the vibrations of turbine parts. Depending on the number of sensors and the methods used to analyze the signals they deliver, two classes of vibro-acoustic techniques for turbine cavitation diagnostics and monitoring can be distinguished: multidimensional and simple techniques.



**Рис. 1:** Плотины Гранд-Кули на реке Колумбия в штате Вашингтон (США): 6809 МВт установленной мощности генерирования, 3x605 МВт и 3x805 МВт на Третьей ГЭС

**Fig. 1:** Grand Coulee Dam on the Columbia River in Washington state, USA: 6809 MW of installed generating capacity, 3x605 MW and 3x805 MW in the Third Powerplant

In this paper, Korto's multidimensional technique<sup>1</sup> is presented and is compared to two simple techniques implemented in cavitation monitoring systems manufactured by two US companies. The comparison is based on the tests<sup>2</sup> performed on the large Francis turbines at the Third Powerplant of the Grand Coulee Dam owned by the US Bureau of Reclamation (Fig. 1).

### Footnotes

**1:** *Brief description:* International Water Power & Dam Construction Journal, May 2001, Feb. 2003, Nov. 2004.

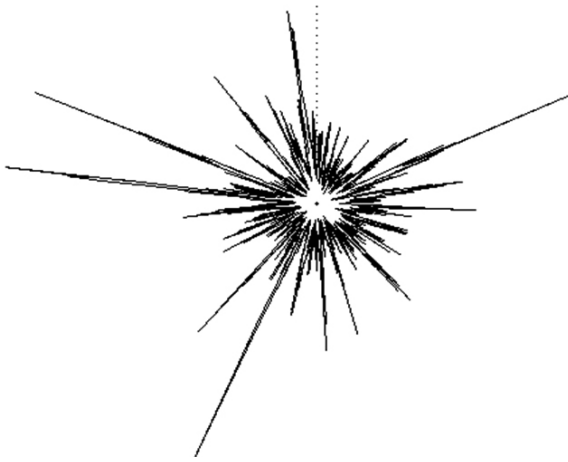
*Introductory theory:* Journal of Fluids Engineering of the American Society of Mechanical Engineers, Dec. 2002

*Physical background:* Journal of Hydraulic Research of the International Association of Hydraulic Engineering and Research, Jan. 2003

See also: [www.korto.com/Letter.pdf](http://www.korto.com/Letter.pdf) and [www.korto.com/downloads/white\\_papers/Korto\\_Cavitation\\_diagnostics\\_and\\_monitoring.pdf](http://www.korto.com/downloads/white_papers/Korto_Cavitation_diagnostics_and_monitoring.pdf)

**2:** Grand Coulee G-20, Multidimensional Cavitation Test, Comparison of Three Cavitation Monitoring Techniques, Korto Cavitation Services, Report GC082103, Vol. 1 and 2, May 2008



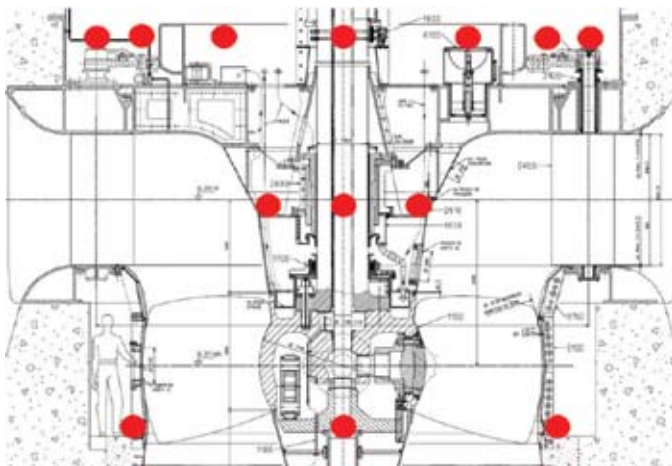


**Рис. 2:** Полярное представление стандартной зависимости краткосрочной средней интенсивности кавитации (радиальная координата) от мгновенного углового положения рабочего колеса (угловая координата)

**Fig. 2:** Polar representation of the typical dependence of the short-time mean cavitation intensity (radial coordinate) on the runner's instantaneous angular position (angular coordinate)

допускаются, или с целью сокращения расходов на земляные работы, они допускаются, но значительно ослабляются. Поэтому, типская турбина обычно работает почти на пороге кавитации. Как следствие этому, вариации в потоке позади статорных колонн и направляющих лопаток могут включать и выключать кавитационные явления на рабочих лопатках, когда они проходят через спутную струю. Это приводит к ситуации, показанной на Рис. 2.

Что касается кавитации, в турбине не существует две абсолютно одинаковые направляющие лопатки и две абсолютно одинаковые рабочие лопатки. Это значит,

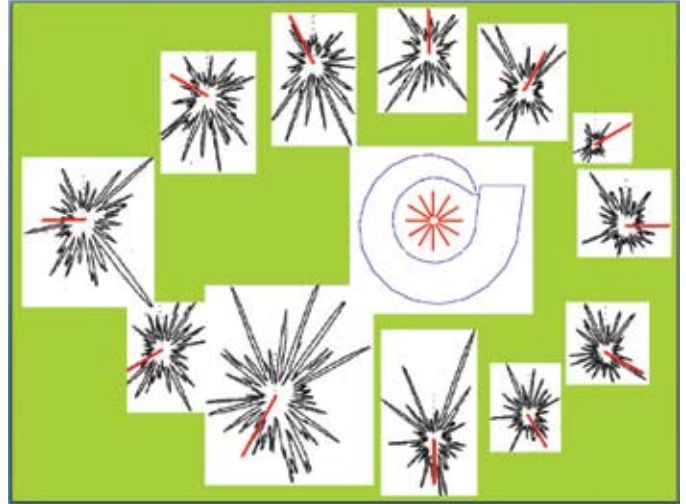


**Рис. 4:** Пример сенсорной системы, используемой в многомерных диагностических испытаниях кавитации

**Fig. 4:** An example of the sensory system in a multidimensional diagnostic cavitation test

## 2. Multidimensional Technique

In order to avoid the worst consequences of cavitation, heavily loaded screw propellers behind bulky ship hulls are sometimes designed to operate in a fully developed cavitation flow. Nothing like this is practiced in hydro turbines. Here, cavitation is avoided or, in order to make the excavation works less expensive, it is accepted but is made rather weak. Thus, a typical turbine is usually operated close to the cavitation threshold. As a consequence, variations in the flow behind the stay vanes and guide



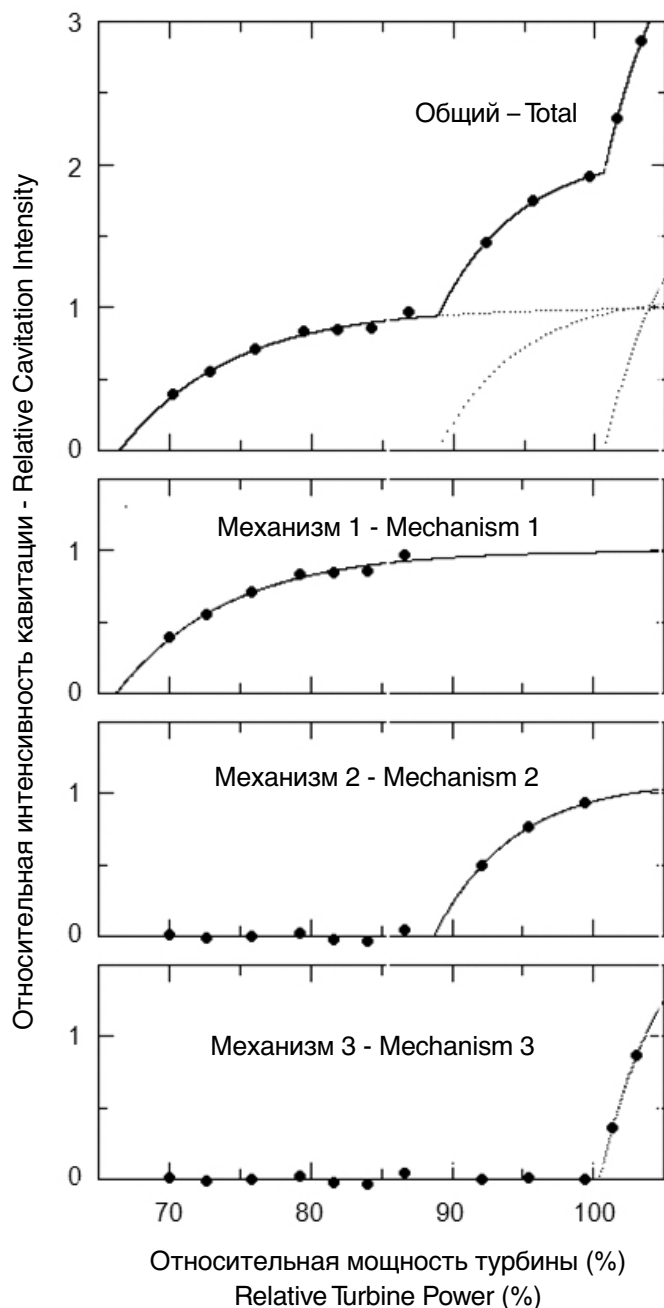
**Рис. 3:** Кривые, такие как на Рис. 2, встречающиеся на лопастно-поворотной турбине в 12 различных точках, распределенных по окружности. Как среднее значение интенсивности кавитации, так и формы кривых имеют значительные различия.

**Fig. 3:** Curves such as those in Fig. 2 found in a Kaplan turbine in 12 different circumferentially distributed locations. Both the mean cavitation intensity and the forms of the curves differ substantially.

vanes may be turning cavitation on and off on the runner blades as these pass through their wake. This results in the situation illustrated in Fig. 2.

As far as cavitation is concerned, no two truly equal guide vanes and no two truly equal runner blades can be found in a turbine. This means that, instead of thinking about cavitation in the turbine as a whole,  $V \times B$  independent cavitation processes may be expected to function in it, where  $V$  and  $B$  are the number of guide vanes and the number of runner blades, respectively. Data on these cavitation processes are to be sought in the curves like those in Fig. 2. There, different peaks describe the interaction of different guide vanes and different runner blades.

Checking dependences like these in different locations in a turbine, one finds strong differences (Fig. 3). They are consequences of variations in the guide vanes' shape and setting and of irregularities in the spiral casing shape; even if these irregularities do not affect efficiency, they may have a strong impact on cavitation. Obviously, by



**Рис. 5:** Три механизма кавитации, установленные на турбине, с отличиями порога кавитации

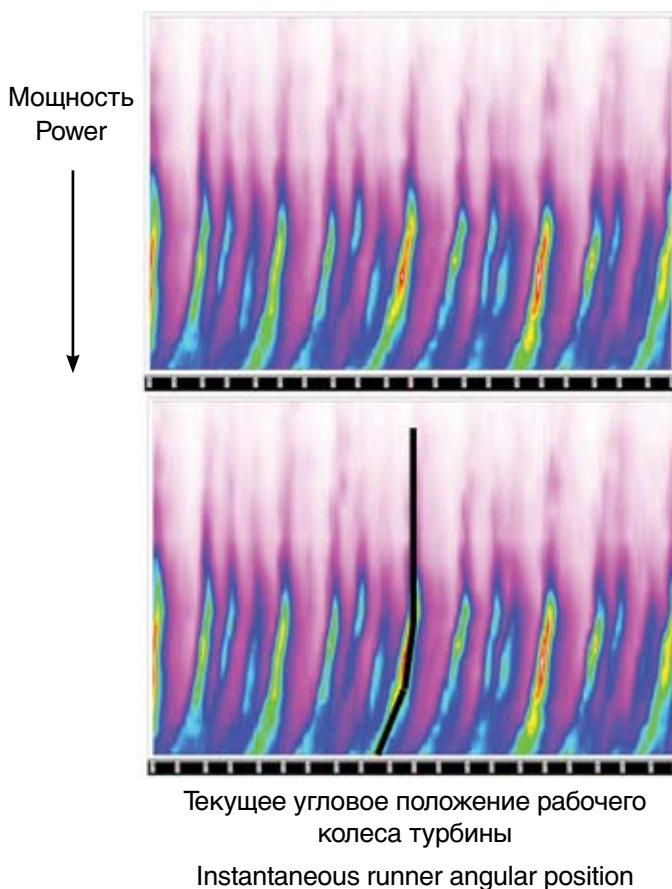
**Fig. 5:** Three cavitation mechanisms found in a turbine differ in cavitation threshold

что вместо того, чтобы размышлять о кавитации в турбинах в целом, следует предположить наличие  $V \times B$  независимых кавитационных процессов, где  $V$  – количество направляющих лопаток, а  $B$  – количество рабочих лопаток. Данные этих кавитационных процессов показаны кривыми, изображенными на Рис. 2, где различные островершинные кривые показывают взаимодействие различных направляющих лопаток и различных рабочих лопаток.

При проверке таких зависимостей в различных точках турбины, обнаруживаются сильные различия (Рис. 3).

means of a vibro-acoustical sensor in one location only, an arbitrary result is obtained, both concerning the estimation of the mean cavitation intensity and the information on the cavitation processes. In the multidimensional technique, a rather high number of sensors is used. A typical configuration for a diagnostic test is illustrated in Fig. 4; for permanent monitoring, the number of sensors is reduced.

In most cases, several types of cavitation appear in a turbine in the same or different operation conditions; an example is shown in Fig. 5. The same cavitation type can also appear in different locations within the turbine.



**Рис. 6:** Различные участки – следы взаимодействия различных пар направляющих/рабочих лопаток

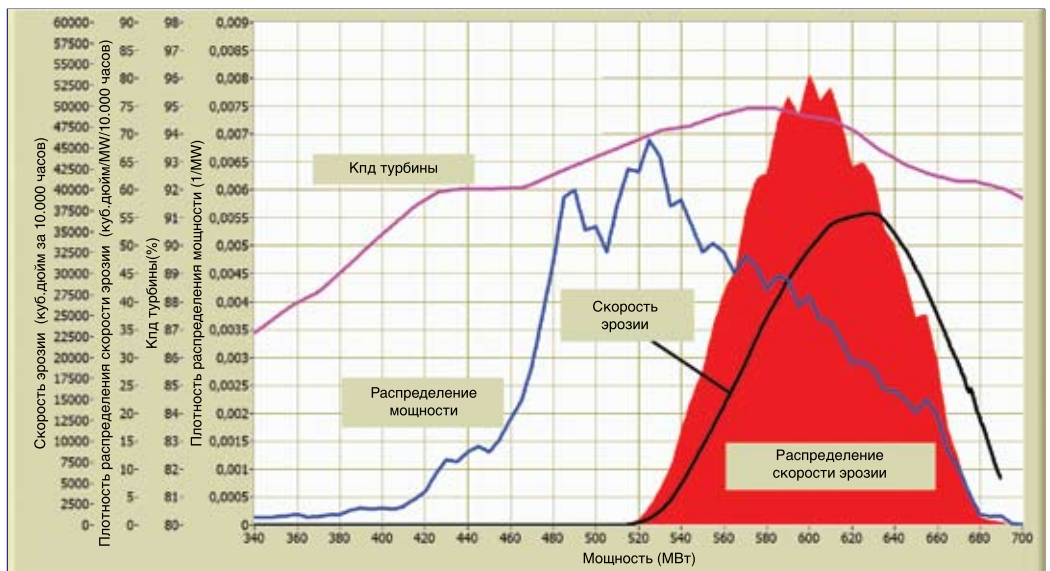
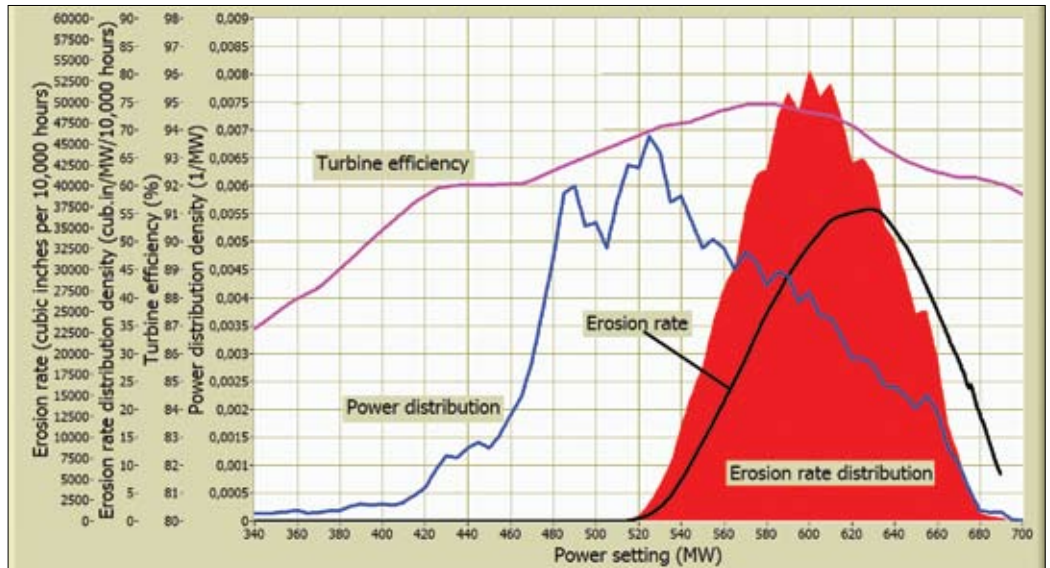
**Fig. 6:** Different patches are the traces of the interaction of different guide-vane/runner-blade pairs.

Being generated in different flow segments, such different cavitation mechanisms are generally independent and should be dealt with as such. Furthermore, each of these mechanisms differs in details on each guide-vane/runner-blade pair. Denoting the number of cavitation mechanisms found in a turbine under consideration by  $M$ , one thus has  $M \times V \times B$  different processes to assess; for a typical Francis turbine, this may amount to 1,000. With the multidimensional technique, identification of different cavitation mechanisms is done by means of various signal and data analysis tools; one of them is illustrated in Fig. 6.



Эти различия являются последствиями различий в форме и установке направляющих лопаток и последствиями нарушения правильности формы спирали; даже если эти нарушения не влияют на эффективность работы, они могут оказывать сильное влияние на кавитацию. Очевидно, что на основании использования виброакустического датчика только в одном месте получают произвольный результат как для оценки средней интенсивности кавитации, так и в отношении информации о кавитационных процессах. При проведении многомерной техники используется довольно большое количество датчиков. Типовая конфигурация диагностического испытания показана на Рис. 4; при постоянном мониторинге количество датчиков сокращается.

В большинстве случаев, несколько типов кавитации появляются в турбине при одинаковых или различных условиях работы; пример показан на Рис. 5. Кроме того, одинаковый тип кавитации может появиться в различных точках турбины. Так как подобные кавитационные механизмы, созданные в различных сегментах потока, обычно независимы, они должны рассматриваться как таковые. Более того, каждый из этих механизмов отличается в деталях на каждой отдельной паре направляющих/рабочих лопаток. Обозначив количество кавитационных механизмов, установленных на турбине литерой М, нам придется оценить МхVхВ различных кавитационных процессов; для типовой радиально-осевой турбины, количество процессов может достигать 1000. При использовании многомерной техники, определение различных кавитационных механизмов выполняется посредством использования различных средств анализа сигналов и данных, один из которых показан на Рис. 6, где интенсивность кавитации представлена цветом и где три черные линии указывают на



**Рис. 7:** Оценка скорости эрозии, полученная для радиально-осевой турбины G-20 на плотине Гранд-Кули посредством многомерной техники, вместе с кривой КПД  
**Fig. 7:** Erosion-rate estimate derived for Grand Coulee Dam Francis turbine G-20 by means of the multidimensional technique, together with the efficiency curve

Here, cavitation intensity is presented by the color, and the three black lines point to the three cavitation mechanisms found in this particular turbine.

In the multidimensional technique for turbine cavitation diagnostics and monitoring, a huge quantity of high-frequency data (up to 1 or 2 MHz from each sensor, acquired over at least 100 runner revolutions) acquired by means of a sufficiently high number of sensors distributed over a turbine is subjected to rather complex signal and data processing, which resolves all MxVxB processes, and combines this set of data into more compact final information. In the case of permanent monitoring, the resulting data are reduced to a scalar and vector format comparable to that used in vibration monitoring; these cavitation data are sent to the central unit of a plant

три кавитационная механизма, обнаружена на этой турбине.

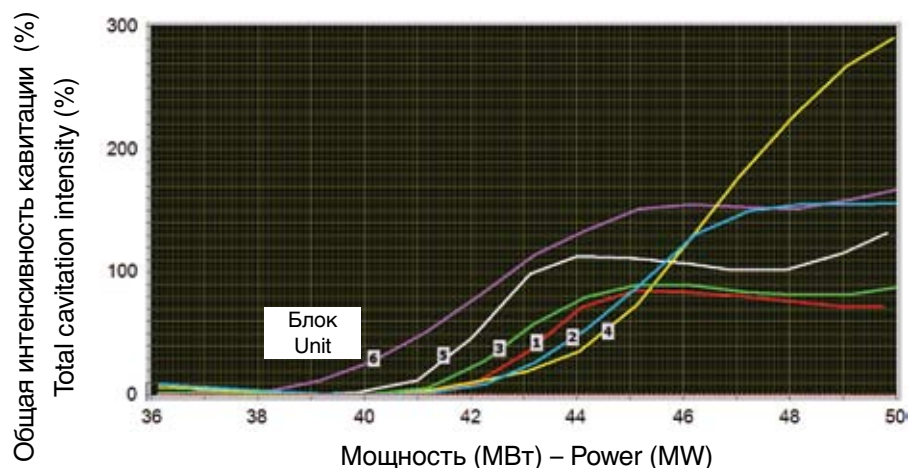
В многомерной технике диагностики и мониторинга кавитации, большое количество высокочастотных данных (до 1 или 2 мегагерц от каждого датчика, в минимально 100 вращений) полученных из достаточно высокого количества датчиков, распределенных по турбине, подвергается сложной обработке сигналов и данных, что разрешает все  $M \times V \times B$  процессы, и объединяет этот набор данных в более компактную конечательную информацию. В случае с непрерывным мониторингом, полученные данные сокращаются до скалярного и векторного форматов, сопоставимых с форматом, используемым в текущем контроле вибраций; эти кавитационные данные направляют на центральный блок системы мониторинга станции для регистрации, анализа тенденции и дальнейших анализов. Важной специфичной задачей здесь является регистрация накопленной интенсивности кавитации, что может быть использовано для оценки текущего развития кавитационной эрозии и организации мероприятий по техническому обслуживанию в зависимости от состояния. Количество и местоположение датчиков и детали алгоритма мониторинга обычно определяются при предварительным диагностическим испытаниям кавитации. С учетом того факта, что кавитационные явления имеют свои особенности на каждой отдельной турбине, использование стандартных систем мониторинга не рекомендуется.

### 3. Выводы

Вторая стадия многомерного процесса обработки данных – поэтапный синтез – приводит к различным описаниям зависимости кавитации от параметров работы турбины (два уровня воды, открытие направляющего аппарата, открытие рабочего колеса для поворотных лопастных турбин, поток через турбину и мощность):

»  $M \times V \times B$  характеристики пар направляющей/рабочей лопатки, определяющие компоненты интенсивности кавитации для каждого из  $M$  механизмов кавитации на каждой из  $B$  рабочих лопаток, с учетом воздействия каждой из  $V$  направляющих лопаток и положения позади спирали.

»  $M \times B$  характеристики рабочих лопаток, определяющие интенсивность кавитации на каждой лопатке, усредненную по окружности и, следовательно, являющуюся средним значением для



**Рис. 8:** Сравнение 6 номинально идентичных радиально-осевых турбин на ГЭС Бурфелл, Исландия, показывает различия в высоте порога кавитации и в интенсивности развитой кавитации

**Fig. 8:** Comparison of 6 nominally identical Francis turbines in Landsvirkjun's Burfell HPP, Iceland, reveals differences in the cavitation-threshold height and in the intensity of the developed cavitation

monitoring system for logging, trending, and further analysis. An important specific issue here is logging the accumulated cavitation intensity. This may be used to assess the running state of cavitation-erosion development and to organize condition-based maintenance. The number and location of the sensors and the details of the monitoring algorithm are usually determined in an introductory diagnostic on-site cavitation test. Due to the fact that cavitation in every turbine has its particularities, the use of an off-the-shelf monitoring system is not recommended.

### 3. Results

The second phase of multidimensional data processing – a step-by-step synthesis – results in various descriptions of the cavitation dependence on turbine operation parameters (two water levels, distributor, and, for Kaplan turbines, runner opening, discharge, power):

»  $M \times V \times B$  characteristics of the guide-vane/runner-blade pairs specifying, for each of the  $M$  cavitation mechanisms, the components of the cavitation intensity on each of the  $B$  runner blades as influenced by each of the  $V$  guide vanes and by the position behind the spiral casing;

»  $M \times B$  characteristics of the runner blades specifying the cavitation intensity on each blade averaged circumferentially, thus being a mean over all the guide vanes and all the positions behind the spiral casing;

»  $M \times V$  cavitation characteristics of the guide vanes; these generally do not describe any cavitation on the vanes but specify the mean influence each vane has on the runner blade cavitation;

»  $M$  and, finally, one global cavitation characteristic specifying the mean cavitation intensity in the turbine.



всех направляющих лопаток и всех позиций позади спирали.

» MxV кавитационные характеристики направляющих лопаток; эти характеристики, обычно не описывают кавитацию на направляющих лопатках, но определяют среднее значение влияния каждой направляющей лопатки на кавитационные процессы на рабочих лопатках.

» M и, наконец, одна глобальная характеристика, определяющая среднее значение интенсивности кавитационных процессов в турбине.

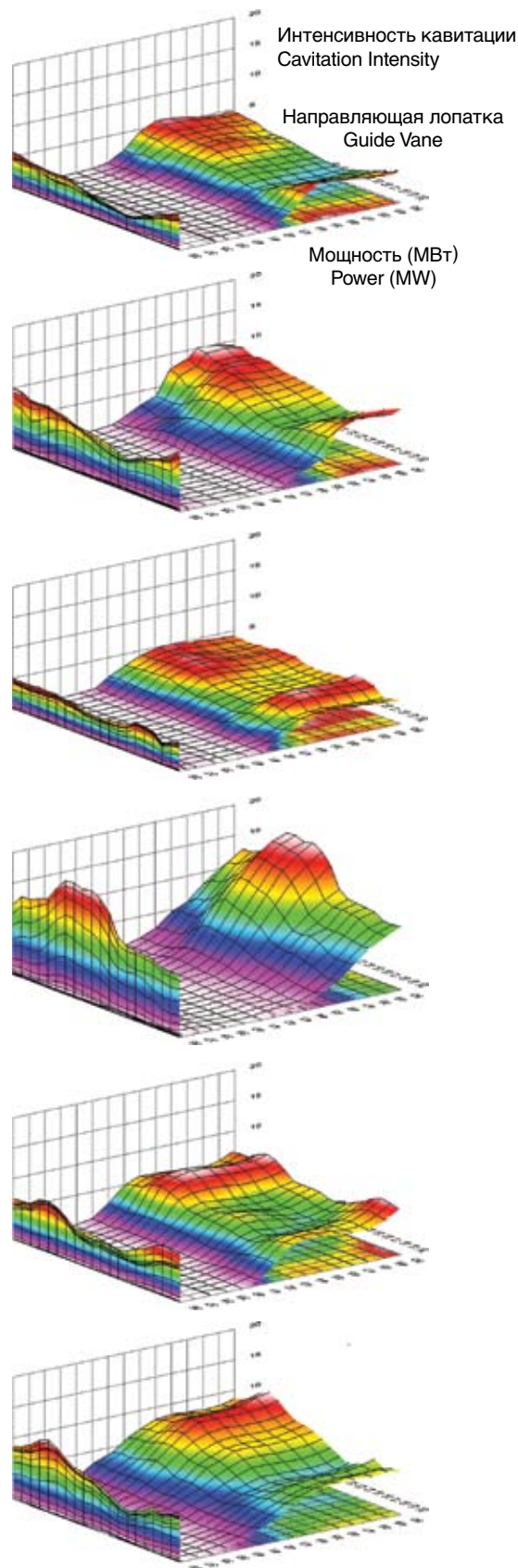
Некоторые примеры глобальных характеристик показаны на рисунках 7 и 8, а примеры характеристик направляющих лопаток – на Рис. 9. Эти данные могут быть использованы для оптимизации работы турбины (Рис. 7 – предотвращение диапазонов нагрузки с высокой интенсивностью кавитации) и оптимизации работы станции (рисунки 8 и 9 – меньшая нагрузка на блоки с более сильной кавитацией при сохранении требуемой производительности).

Используются различные специализированные формы кавитационных характеристик турбин, например такие, которые проверяют другие характеристики турбин, такие как комбинаторная связь в поворотно-лопастных турбинах (Рис. 10), или ясно показывают влияние спирали (Рис. 11). На Рис. 11 показано, что кавитация в испытываемой турбине в основном появляется на довольно узком угловом сегменте спирали. Также видно, что между двумя самыми высокими значениями мощности начинается резкий подъем интенсивности, что указывает на новый механизм кавитации. Характеристики кавитационных процессов, изображенные на рисунках 10 и 11, показывают возможности совершенствования турбины.

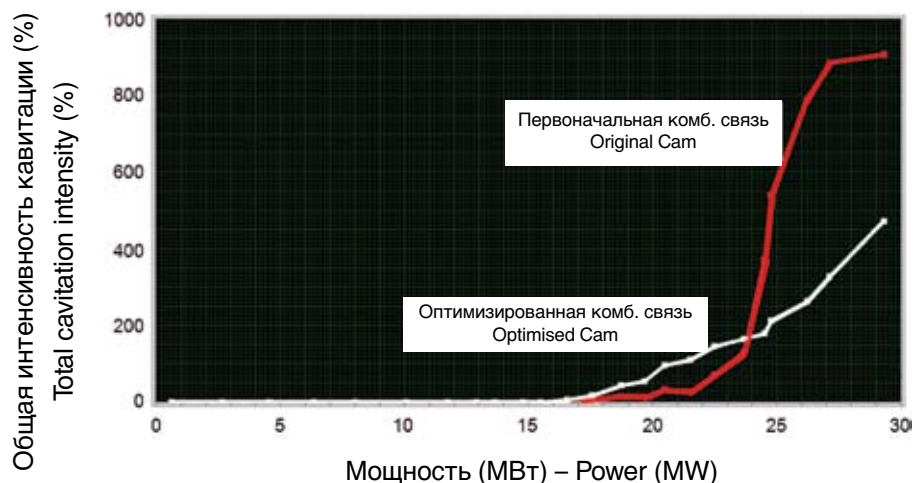
#### 4. Сравнение с простыми методами

Простые методы мониторинга кавитации следуют прямой логике, применяемой в большинстве других замеров в гидроэнергетике: использование датчика, подходящего для оцениваемого количества, и определение среднего значения или другого подходящего значения количества, определяемого датчиком. При мониторинге кавитации такое решение не является оптимальным по двум следующим причинам:

» Результаты, полученные таким мониторингом кавитации сильно зависят от местоположения датчика (различия в амплитудах различных кривых на (Рис. 3). Даже если различия в полученных средних значениях и компенсировались бы калибровкой, различия в форме островершинных кривых,



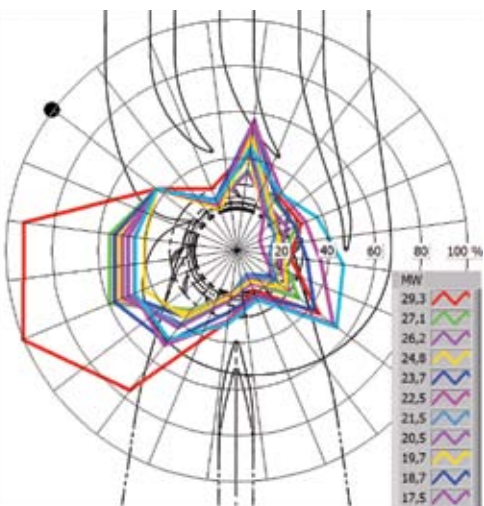
**Рис. 9:** Кавитационные характеристики направляющих лопаток шести турбин в Бурфэлле  
**Fig. 9:** Guide-vane cavitation characteristics of the six Burfell turbines



**Рис. 10:** Кавитация на лопастно-поворотной турбине 1 на ГЭС Кембс, Франция, с двумя версиями комбинаторной связи: первоначальная комбинаторная связь определена в модельных испытаниях, и оптимизированная связь определена на Прототипе. В испытаниях КПД на прототипе рекомендуется включать кавитацию.

**Fig. 10:** Cavitation in Kaplan unit 1 at Electricité de France's Kembs HPP, France, with two versions of cam installed: the original cam designed in a model test and the optimized cam determined in an index test on the prototype. It is recommended to include cavitation in the index test.

которые говорят о взаимодействии различных частей турбины, показывают, что для выбранного местоположения датчика некоторые компоненты кавитационных процессов могут быть скрыты, а некоторые могут быть преувеличены. Поэтому,



**Рис. 11:** Пространственное распределение интенсивности кавитации за спиралью на турбине 1 ГЭС Кембс; интенсивность нормализуется до значения в направлении, отмеченном черной точкой.

**Fig. 11:** Spatial distribution of cavitation intensity behind the spiral casing in Kembs unit 1; the intensity is normalized to the value in the direction denoted by the black dot.

The global characteristics are illustrated in Figs. 7 and 8, and the guide-vane characteristics in Fig. 9. These data can be used for turbine operation optimization (Fig. 7 – avoiding load ranges with high cavitation intensity) and plant operation optimization (Figs. 8 and 9 – loading less the units which cavitate more strongly, while keeping the needed total power production).

Various specialized forms of turbine cavitation characteristics are useful, e.g. those which check other turbine characteristics such as the cam in a Kaplan unit (Fig. 10) or which explicitly describe the spiral-casing influence (Fig. 11). The latter shows that, in the turbine tested, most cavitation appears in a rather narrow angular segment of the spiral. It also shows that between the two highest power values a steep rise of intensity starts; this points to a new cavitation mechanism. Cavitation characteristics like those in Figs. 10

and 11 reveal the possibilities of turbine improvement.

#### 4. Comparison with simple techniques

Simple techniques for cavitation monitoring follow a straightforward logic applied in most other hydropower measurements: using a sensor suitable for the quantity to be assessed, and estimating the mean value or other suitable value of the sensed quantity. For cavitation, this is not optimal for two reasons:

» the results delivered by such cavitation monitors heavily depend on the sensor location (cf. the differences in the amplitudes of different curves in Fig. 3). Even if differences in the obtained mean values were compensated by calibration, differences in the forms of the peaky curves, which describe the interactions of different turbine parts, show that, for a selected sensor location, some cavitation components may be hidden and some others may be overestimated. Thus, readings of the one-sensor monitor may turn out not to be representative and may thus incorporate a high unknown bias error;

» simple signal processing algorithms used in the simple monitors ignore information such as that contained in the patterns in Fig. 3. Thus, such monitors cannot deliver data on cavitation details. If they were used to do so on the only available pattern, the obtained information may be wrong.

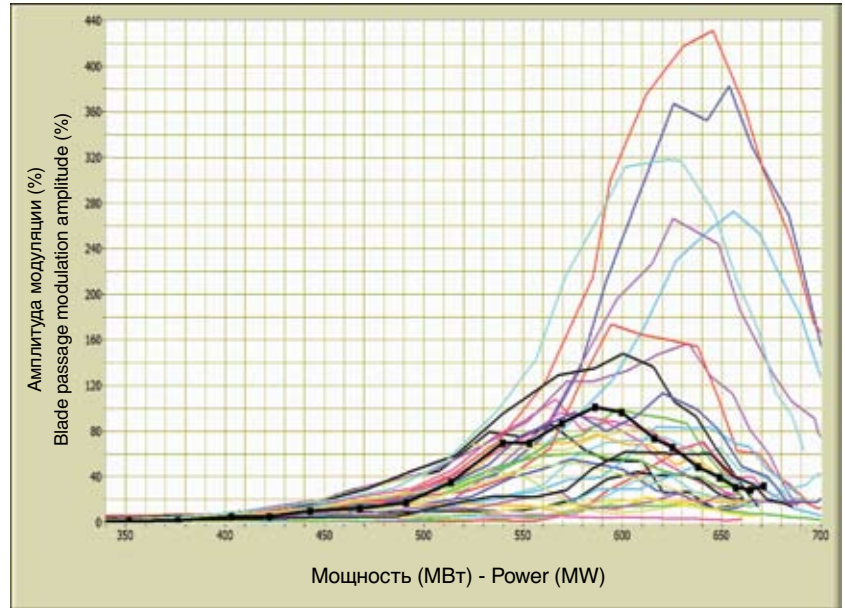
In contrast to this, the multidimensional technique uses signals from sensors in many locations and processes them in an appropriately complex way. This makes the resulting



показания монитора с одним датчиком могут оказаться непредставительными, вследствие чего могут содержать высокий процент неопознанной систематической ошибки.

» Простые алгоритмы обработки сигнала, используемые в простых системах мониторинга кавитации, игнорируют такую информацию, как показано на Рис. 3. Поэтому, такие системы не могут выдавать данные по деталям кавитационного процесса. Если они и будут использоваться таким образом, полученная информация будет неверной.

В отличие от этого, многомерный метод основан на использовании сигналов от ряда датчиков, расположенных во многих местах, с их последующей комплексной обработкой. Это обеспечивает представительность этих данных, приближение оценок средних значений интенсивности кавитации к истинному среднему значению общей интенсивности кавитации, а также позволяет вывести правильные заключения о происходящих кавитационных явлениях.



**Рис. 12:** Показания уровня модуляции на частоте прохождения рабочих лопаток, полученные с 32 направляющих лопаток (различные цвета - различные лопатки). Простой монитор выдает жирную черную кривую с точками.

**Fig. 12:** Readings of the blade-passage-modulation-level obtained on 32 guide vanes (different colors – different vanes). The simple monitor yields as the result the bold black-line curve with dots.

Система мониторинга Monitoring System	Простая Simple	Многомерная Multidimensional
Кол-во датчиков в диагностическом испытании Number of sensors in a good diagnostic test	1 1	1 на каждом вале направляющей лопатки 1 on each guide-vane shaft
Кол-во датчиков при постоянном мониторинге Number of sensors in permanent monitoring	1 1	обычно 6 typically 6
Алгоритм обработки сигнала и данных Signal and data processing algorithm	Простая simple	Многомерная complex
Представляет расчет средней скорости эрозии Delivers mean erosion rate estimate	да yes	да yes
Представляет расчет накопленной эрозии Delivers accumulated erosion estimate	да yes	да yes
Учитывает все места на турбине Represents all locations in a turbine	нет no	да yes
Опознает различные типы кавитац. процессов Recognizes different cavitation types	незначит. negligible	да yes
Предоставляет диагностические данные Delivers diagnostic details (runner blade quality, etc.)	нет no	да yes
Относит. чувств. в обнаруж. эффектов истирания Relative sensitivity in detecting deterioration effects	~1 ~1	~80 ~80
Общая точность и надежность результатов Overall accuracy and reliability of results	низкая low	высокая high

На рисунках 12 и 13 многомерный метод сравнивается с двумя простыми системами мониторинга, установленными на плотине Гранд-Кули<sup>2</sup>: система мониторинга с одним датчиком на одном вале направляющей лопатки с амплитудой модуляции сигнала в качестве вывода (Рис. 12), и система мониторинга с использованием одного датчика на стенке отсасывающей трубы и эффективного значения сигнала в качестве вывода (Рис. 13). На Рис. 12 показано, насколько непредсказуемыми и неточными могут быть результаты, полученные только от одного датчика. В зависимости от местоположения датчика, настройка мощности, при которой оценка интенсивности кавитации достигает своего максимального значения, колеблется в пределах 50 МВт или 100 МВт. Это иллюстрирует ситуацию использования обеих систем мониторинга на основании одного датчика. Вторая простая система мониторинга имеет еще одну дополнительную проблему: полагаясь на данные, полученные от датчика, установленного в месте где преобладают свободные вихревые потоки не вызывающие эрозию, система неправильно интерпретировала двухгодичные показания<sup>3</sup>, что привело к парадоксальным результатам (Рис. 13).

Сравнение двух классов систем мониторинга кавитации показано в таблице.

Высокое отношение чувствительности двух классов мониторинга является результатом того факта, что оценка виброакустического сигнала изначального эффекта старения сравнивается с оценкой суммарной интенсивности кавитации, если получена простым монитором, и с оценкой интенсивности в камере пространственного разрешения, если получена многомерным монитором.

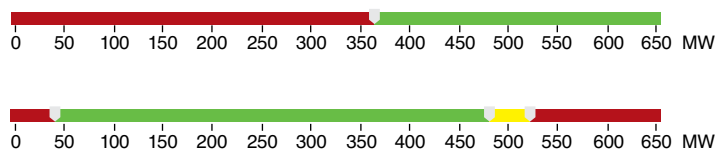
## 5. Модельные испытания в сравнении с испытаниями на прототипе

» При проведении стандартного модельного испытания кавитации получают данные, которые представляют значительно меньшую ценность для практической работы по сравнению с данными, полученными посредством многомерного метода виброакустических исследований (Рис. 14).

### Сноски

3: П.Ж. Вольф, Р.К. Джоунс и П. Мач [Wolff, P.J., Jones, R.K., and March, P.], Оценка результатов мониторинга кавитационных процессов на основании акустической эмиссии [Evaluation of Results from Acoustic Emissions-Based Cavitation Monitor], Гранд-Кули, блок G-24, Сравнительные испытания системы мониторинга кавитации, Сводный отчет, Октябрь 2005, www.wolffwareltd.com/downloads/Grand%20Coulee%20Cavitation%20Report.pdf

## Простая техника мониторинга Simple Monitor

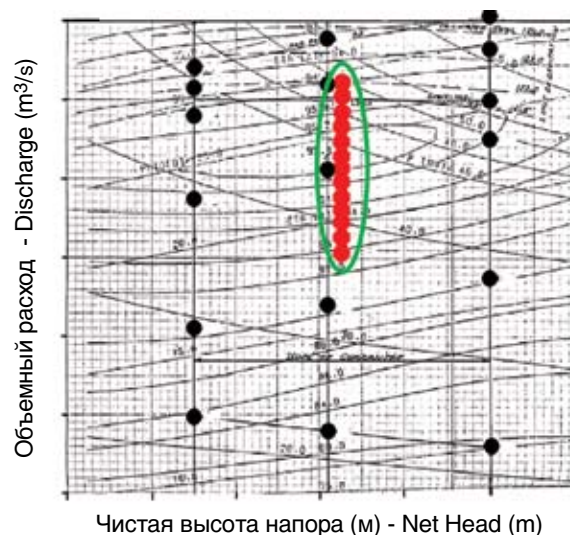


## Многомерная техника мониторинга Multidimensional Monitor

**Рис. 13:** Прогноз кавитации, выполненный на основании простого монитора с использованием одного датчика, установленного на стенке отсасывающей трубы, в сравнении с результатом, полученным многомерным способом (красная – с эрозией, зеленая – без эрозии, желтая – переходный диапазон)

**Fig. 13:** Cavitation prediction made by means of the simple monitor using one sensor installed on the draft tube wall, compared to the multidimensional result (red – erosive operation, green – erosion-free operation, yellow – transition range)

data representative, the mean values of cavitation intensity estimates close to the true mean total intensity values, and the conclusions on the details of the cavitation processes available and correct.



**Рис. 14:** Обычные результаты модельного испытания кавитационных явлений – черные точки, а испытания на прототипе – красные точки; рабочий диапазон – зеленое. Из 17 точек модельных испытаний только две показывают реальное состояние при эксплуатации, тогда как на основании испытания с прототипом получаем полную картину в деталях.

**Fig. 14:** Typical cavitation-related results of a model test – black dots, and a prototype test – red dots; operating range – green. Out of 17 model data points, only two describe the real situation in the exploitation, while the prototype test yields its detailed description.

- » В некоторых случаях не все механизмы кавитации могут быть прослежены при модельном испытании, однако все механизмы могут быть прослушаны и оценены при многомерном виброакустическом испытании на прототипе.
- » Существует сильный масштабный эффект моделирования начальной стадии кавитации, поэтому кавитацию следует проверять на прототипе.
- » В связи с неполным сохранением профиля рабочей лопатки после ремонта эрозионного износа и в связи с различными эффектами истирания во время эксплуатации, кавитационные характеристики турбины меняются со временем; это требует проведения постоянного мониторинга прототипа.

## 6. Заключение

Многомерная техника диагностических испытаний и мониторинга кавитации основана на использовании датчиков, распределенных по турбине, и комплексной обработке данных и сигналов, на основании чего получают надежную оценку интенсивности кавитации и подробности диагностики кавитации. Результаты могут быть использованы для оптимизации эксплуатации турбины или станции с целью сокращения эрозии, организации мероприятий по оптимизации технического обслуживания в зависимости от состояния, связанного с вопросами кавитации, и определения частей турбины, требующих усовершенствования.

Простые техники мониторинга кавитации, основанные на использовании одного датчика и простой обработки сигнала, могут выдавать оценки интенсивности с высоким уровнем систематической ошибки. Эти методы игнорируют большинство информации о кавитации, содержащейся в виброакустических сигналах, и не выдают детали кавитационных процессов.

Модельные испытания не могут заменить кавитационные испытания на прототипе.

In Figs. 12 and 13, the multidimensional technique is compared with the two simple monitors installed at Grand Coulee Dam<sup>2</sup>, the monitor with one sensor on one guide-vane lever and the modulation amplitude as the output (Fig. 12), and the monitor using one sensor on the draft tube wall and the RMS signal value as the output (Fig. 13). Fig. 12 shows how poor and unpredictable the results can be when based on one sensor only. Depending on the sensor location, the power

setting at which the assessment of cavitation intensity reaches its maximum varies by 50 MW or 100 MW. This illustrates the situation with both one-sensor monitors. The second simple monitor has one more problem: relying on a sensor in a location in which non-erosive free-vortex cavitation prevails and interpreting the two-year readings<sup>3</sup> in the wrong way yielded a paradoxical result (Fig. 13).

A comparison of the two classes of cavitation monitors is recapitulated in the table.

The high ratio of the monitoring sensitivities is a consequence of the fact that a vibro-acoustical signature of the initial deteriorating effect is compared to the total cavitation signature in the simple monitor and to the signature stemming from a spatial resolution cell in the multidimensional monitor.

## 5. Model tests vs. prototype tests

» In a typical model cavitation test, many fewer data useful for the practical operation of the prototype are obtained than by means of an in-plant multidimensional vibro-acoustic monitor or in such a test (Fig. 14).

- » In some cases, not all cavitation mechanisms can be seen in a model test, but all of them can be heard and assessed in a multidimensional in-plant vibro-acoustic test.
- » There are strong scale effects in incipient cavitation modelling. Thus, cavitation should be checked on the prototype.
- » Due to the fact that the runner blade profile is not fully preserved in erosion repairs, and since various deterioration effects appear in exploitation, turbine cavitation performance varies in time. This makes continuous monitoring of the prototype necessary.

## 6. Review and Conclusion

The multidimensional technique for cavitation diagnostic tests and monitoring uses sensors distributed over a turbine and conducts complex signal and data processing. It yields reliable estimates of cavitation intensity and delivers diagnostic details on cavitation. This can be used to optimize turbine or plant operation for minimum erosion, organize predictive maintenance related to cavitation, and identify turbine parts which could be improved. Simple cavitation monitoring techniques, based on one sensor and simple signal processing, may deliver intensity estimates with a high bias error. They ignore most of the information on cavitation contained in vibro-acoustic signals and do not yield details of cavitation.

Model tests cannot substitute prototype cavitation tests.

### Footnotes

3: Wolff, P.J., Jones, R.K., and March, P., "Evaluation of Results from Acoustic Emissions-Based Cavitation Monitor, Grand Coulee Unit G-24, Cavitation Monitoring System Comparison Tests, Grand Coulee Project, Final Report", October 2005, [www.wolffwareltd.com/downloads/Grand%20Coulee%20Cavitation%20Report.pdf](http://www.wolffwareltd.com/downloads/Grand%20Coulee%20Cavitation%20Report.pdf)



## Приложение 1 – Стандартная инсталляция системы многомерного мониторинга

Датчики кавитации устанавливаются на валах или плечах направляющих лопастей в надежно защищенных корпусах.

### Appendix 1 – Typical installation of the multidimensional monitoring system

The cavitation sensors are installed on the guide-vane shafts or levers, in robust protection boxes.



Источники данных:

- » (Обычно) 6 датчиков кавитации
- » Триггерный датчик
- » Источники данных о рабочих условиях (верхний и нижний уровни воды, отверстие распределителя, отверстие рабочего колеса для поворотно-лопастных турбин, поток через турбину, мощность)

Выборки случайных сигналов кавитации, репрезентативные в пространстве и времени, подаются на кавитационный процессор, который

реализует алгоритм многомерного мониторинга с целью снижения значительного объема высокочастотных данных до ограниченных по размеру детерминистических данных, характеризующих признаки кавитации. Обычно, общая интенсивность кавитации подается в виде аналогового сигнала, и эти данные, а также подробные сведения о кавитации, публикуются в сети LAN.

Эта система может использоваться независимо или в качестве кавитационного канала в общей системе мониторинга электростанции.

Комплексные системы мониторинга кавитации Корта реализуются в технологии ФПГА/РТ. Ниже приведен обзор внутренней части **многомерного кавитационного процессора Корта типа 7391Р**.

Data sources:

- » (Typically) 6 cavitation sensors
- » Key phasor
- » Sources of operation data (head and tail water level, distributor opening, runner opening for Kaplan units, flow through a turbine, turbine power setting).

The samples of random cavitation signals, representative in space and time, are fed to the **cavitation processor** which implements the multidimensional monitoring algorithm in order to reduce a high volume of high-frequency data to limited-size data on deterministic cavitation signatures. Usually, total cavitation intensity is delivered as an analog signal, and these data and the data on the details of cavitation are published on the LAN.

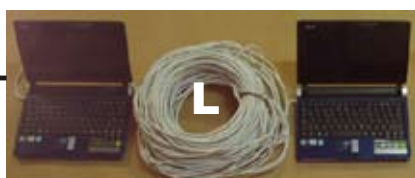
The system can be used independently or as a cavitation channel of a general plant monitoring system.

Korto's multidimensional cavitation monitoring systems are implemented in the FPGA/RT technology. On the left is the view of the interior of the **Multidimensional Cavitation Processor Korto Type 7391P**.



## Приложение 2 – Многомерное кавитационное испытание на прототипе

Описание методики



Методика испытаний является неразрушающей. Мы приклеиваем или прикрепляем магнитами базовые датчики кавитации **A** на оси или рычаге каждой из направляющих лопаток. Эти датчики перекрывают диапазон частот от частоты вращения турбины до 0,3 МГц. Мы также используем несколько других типов датчиков кавитации **B**, установленных в других местах и покрывающих более высокие частоты. Посредством триггерного датчика **C** выполняется синхронизация получения и обработки сигнала с вращением турбины. Рабочие параметры снимаются посредством **D** (верхний и нижний уровни воды, отверстие распределителя, отверстие рабочего колеса для поворотнo-лопастных турбин, поток через турбину и мощность лопастных турбин). Через **E/F/G/H** сигналы подаются на процессор кавитации **I**. Обработанные, а при необходимости, также исходные данные сохраняются на дисках большой емкости **J**. Проведение испытаний контролируется управляющим компьютером **K**, а компьютеры **L** служат для связи с операторами электростанции.

Подготовка испытаний на электростанции занимает 1-3 дня. В зависимости от типа оборудования необходим простой в течение получаса или ночной смены. Остальная часть подготовки проходит в режиме нормальной работы.

Испытания турбины проводятся в 20-30 режимах мощности; при этом рекомендуется локальный контроль. Для каждой комбинации уровней воды измерения продолжаются в течение 2-3 часов.

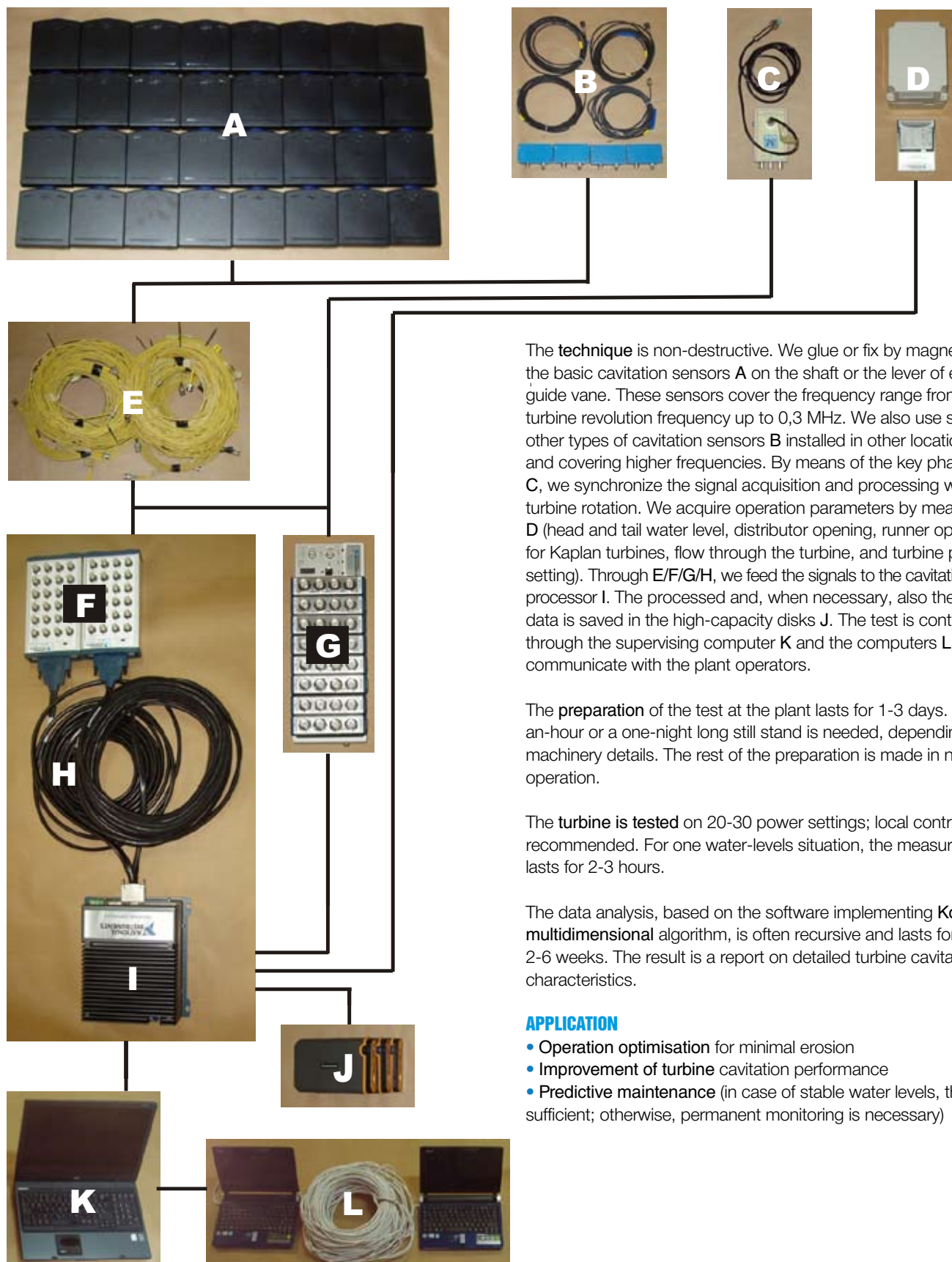
Анализ данных, основанный на программной реализации многомерного алгоритма Корта, часто является рекурсивным и выполняется 2-6 недель. В результате получается подробный отчет о кавитационных характеристиках турбины.

### ПРИМЕНЕНИЕ

- Оптимизация работы для уменьшения эрозии
- Улучшение кавитационных характеристик турбины
- Прогностическое техническое обслуживание (при стабильных уровнях воды достаточно проведение испытаний; в противном случае необходим постоянный мониторинг)

## Appendix 2 - Multidimensional Cavitation Test on a Prototype

How is it made?



The **technique** is non-destructive. We glue or fix by magnets the basic cavitation sensors **A** on the shaft or the lever of each guide vane. These sensors cover the frequency range from the turbine revolution frequency up to 0,3 MHz. We also use several other types of cavitation sensors **B** installed in other locations and covering higher frequencies. By means of the key phasor **C**, we synchronize the signal acquisition and processing with turbine rotation. We acquire operation parameters by means of **D** (head and tail water level, distributor opening, runner opening for Kaplan turbines, flow through the turbine, and turbine power setting). Through **E/F/G/H**, we feed the signals to the cavitation processor **I**. The processed and, when necessary, also the raw data is saved in the high-capacity disks **J**. The test is controlled through the supervising computer **K** and the computers **L** used to communicate with the plant operators.

The **preparation** of the test at the plant lasts for 1-3 days. A half-an-hour or a one-night long still stand is needed, depending on machinery details. The rest of the preparation is made in normal operation.

The **turbine is tested** on 20-30 power settings; local control is recommended. For one water-levels situation, the measurement lasts for 2-3 hours.

The data analysis, based on the software implementing Korto's **multidimensional** algorithm, is often recursive and lasts for 2-6 weeks. The result is a report on detailed turbine cavitation characteristics.

### APPLICATION

- Operation optimisation for minimal erosion
- Improvement of turbine cavitation performance
- Predictive maintenance (in case of stable water levels, the test is sufficient; otherwise, permanent monitoring is necessary)