

Иллюстрация результатов многомерной диагностики и мониторинга кавитации

Dr. Branko Bajic
Korto Cavitation Services
12, rue Ste Zithe
L-2763 Luxembourg
Luxembourg
www.korto.com korto@korto.com

Резюме

На одном примере иллюстрируются форма и содержание результатов диагностических испытаний и мониторинга кавитации с применением многомерной техники. Эта техника обладает рядом преимуществ по отношению к более простым подходам. Она обеспечивает установление роли частей турбины в кавитационном процессе и идентификацию кавитационных механизмов, дает детальные данные, необходимые для диагностики кавитационного процесса и оптимизации работы турбины, а также обеспечивает репрезентативность оценок кавитации и исключительно высокую чувствительность мониторинга. С использованием многомерного алгоритма, возможно несложное аппаратное обеспечение кавитационного и общего мониторинга, которые имеют рабочие характеристики больших систем, при чем расходы на реализацию и обслуживание системы меньше.

Введение

Многомерный способ диагностики и мониторинга кавитации и других динамических процессов в гидро-энергетических машинах, разработанный фирмой Korto Cavitation Services из Люксембурга, обоснован на:

- интенсивном взятии выборок наблюдаемых данных о релевантных процессах, по пространству, по времени, по моментальному угловому положению ротора и по домену параметров режима работы машины;
- действительно многомерном анализе взаимных зависимостей между этими данными;
- введении эмпирически и теоретически полученных моделей мониторованных процессов в алгоритмы мониторинга;
- преобразовании исходных величин сложных процессов в надежно интерпретируемые результаты анализа работы машины.

Многомерная концепция введена сначала для диагностики и мониторинга кавитации [1]. Сначала были рассмотрены турбины с большим числом лопастей рабочего колеса. Потом концепция была расширена для случаев небольшого числа лопастей [2]. Этот подход основывался на детальном анализе проблемы датчиков и обработки сигналов и данных [3]. Показан ряд примеров применения метода [1,2,4,5], подтвердивших эффективность подхода как диагностического инструмента, а также как средства для высокочувствительного обнаружения изменений в работе машины и детекции возникновения разных вредных эффектов.

Пример результатов

На примере двух из шести радиально-осевых турбин на одной электростанции в Европе в настоящей работе проиллюстрированы форма и типичное содержание результатов диагностики и мониторинга кавитации в турбине многомерным методом. Характеристики турбин следующие:

Расход	45 м ³ /с
Напор нетто	115,5 м
Номинальная мощность	48,4 МВт
Высота отсасывания	4 м
Частота вращения	300 мин ⁻¹

Диаметр рабочего колеса	2,5 м
Количество колонн статора	20
Количество лопаток направляющего аппарата	20
Количество лопастей рабочего колеса	17

На лопастях рабочего колеса у всех шести турбин возникает относительно сильная кавитационная эрозия. Основной целью мониторинга являлась оценка успешности модификации профиля лопастей, произведенной с целью предотвращения эрозии. Поэтому виброакустически сравнена кавитация на двух турбинах, при чем у одной рабочее колесо было модифицировано.

О методах оценки кавитации

Разница между методами контроля кавитации

- путем виброакустических испытаний и мониторинга работы турбины и
- путем прямой оценки кавитационной эрозии при ремонтах

заключается в том, что при виброакустических испытаниях получают данные о том, какой режим вызывает эрозию, а при ремонтах виден только суммарный результат.

Разница между

- модельными испытаниями и
- виброакустическими испытаниями турбин на электростанции

заключается, прежде всего, в объеме результатов; это проиллюстрировано на рис. 1. Черные точки обозначают режимы работы рассматриваемых турбин при модельных испытаниях, а красные - режимы, в которых произведены натурные виброакустические испытания и в которых турбины фактически работают. Объем используемых данных, полученных при натуральных испытаниях, в действительности намного больше объема, полученного при модельных испытаниях. Для оптимизации работы турбин натурные испытания являются незаменимыми.

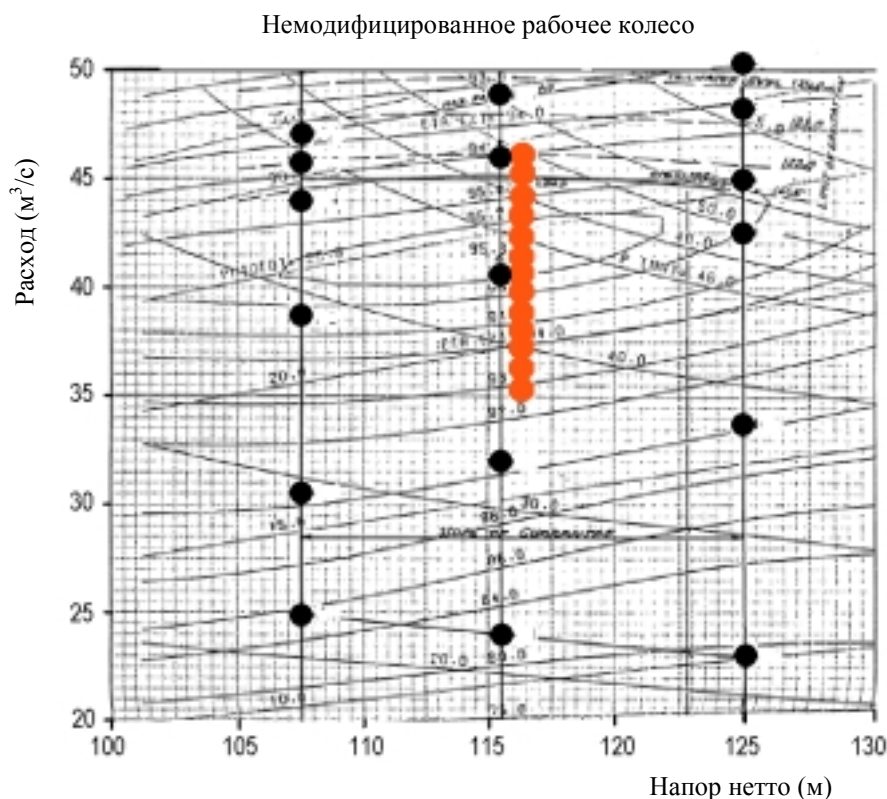


Рисунок 1

Немодифицированное рабочее колесо
Лопатка направляющего аппарата 1

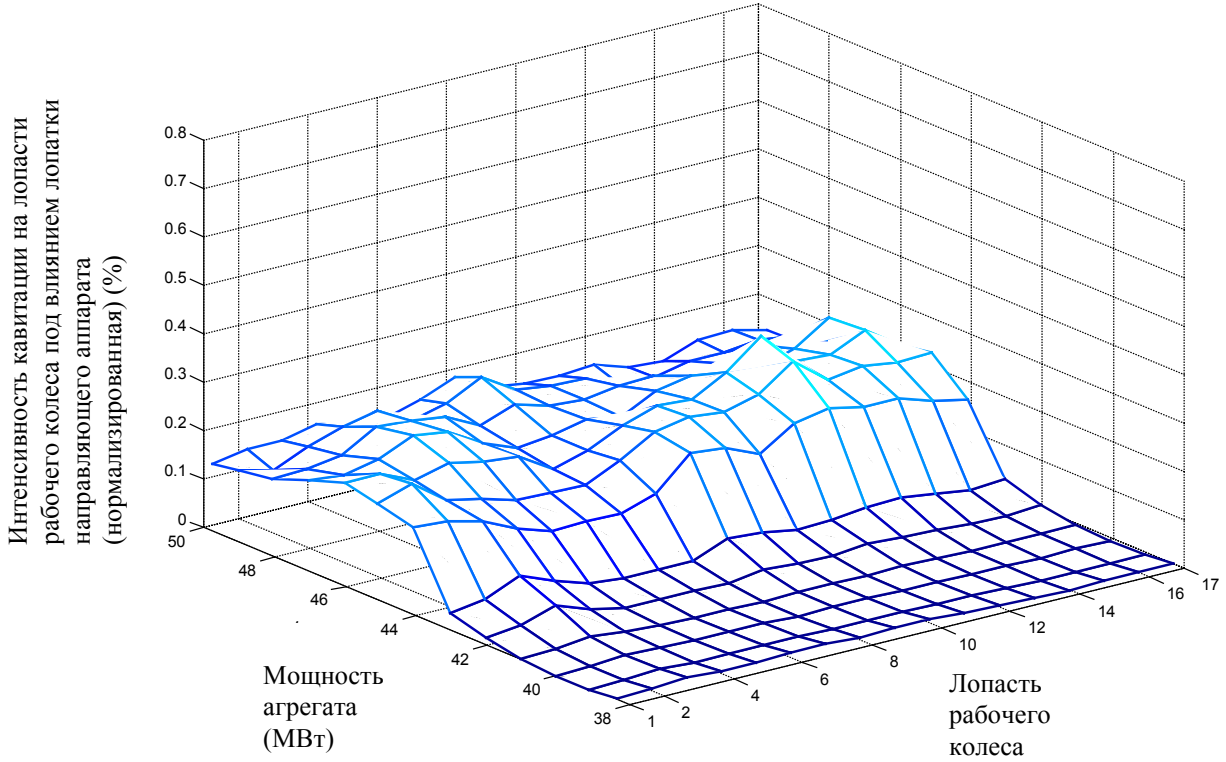


Рисунок 2

Немодифицированное рабочее колесо

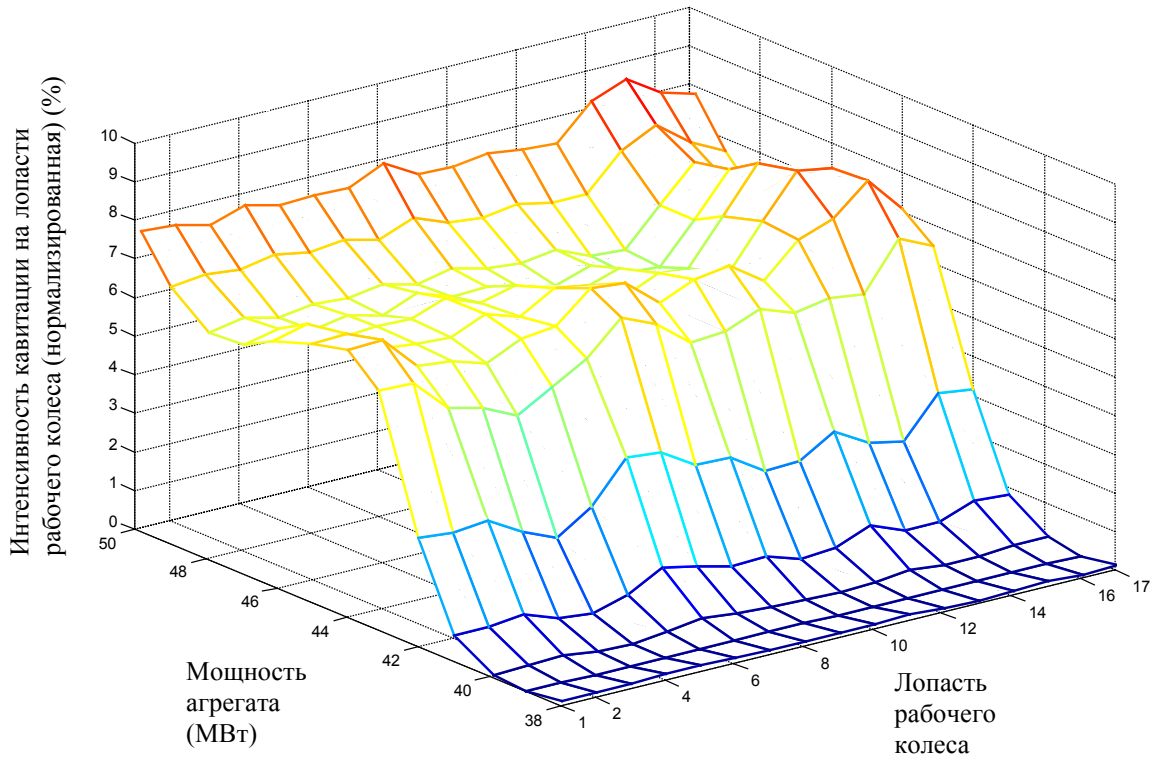


Рисунок 3а

Модифицированное рабочее колесо

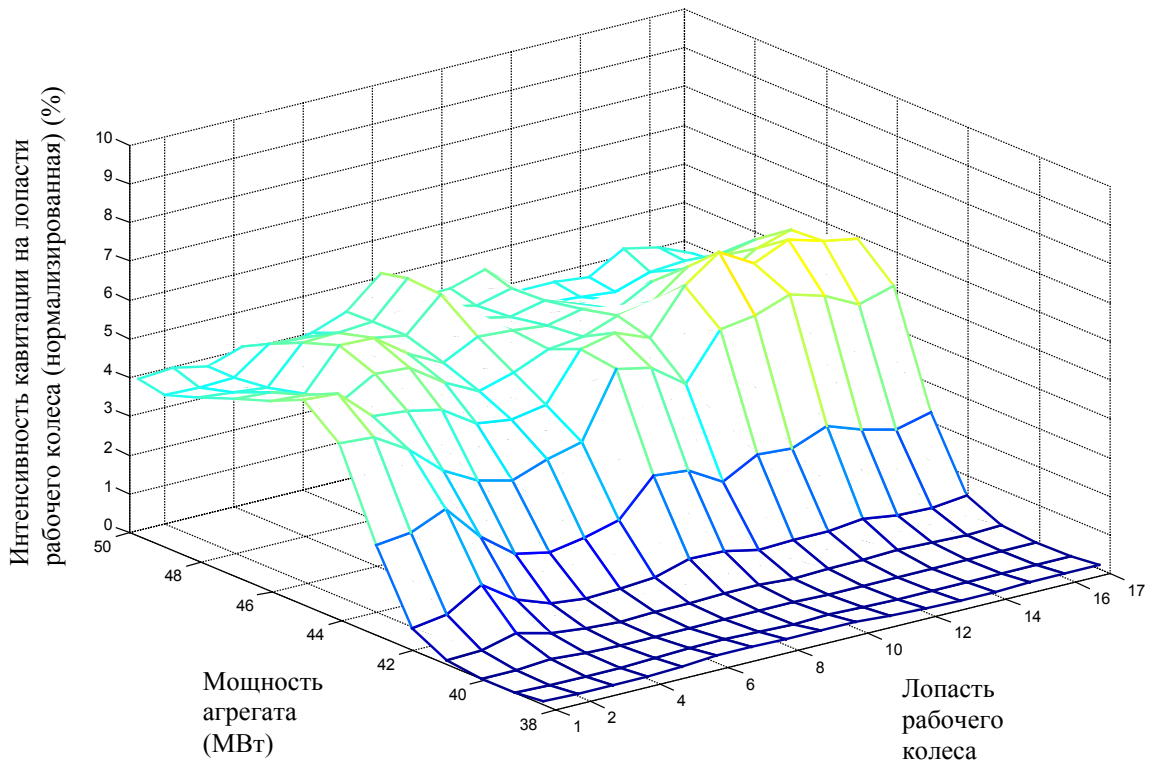


Рисунок 3б

Немодифицированное рабочее колесо

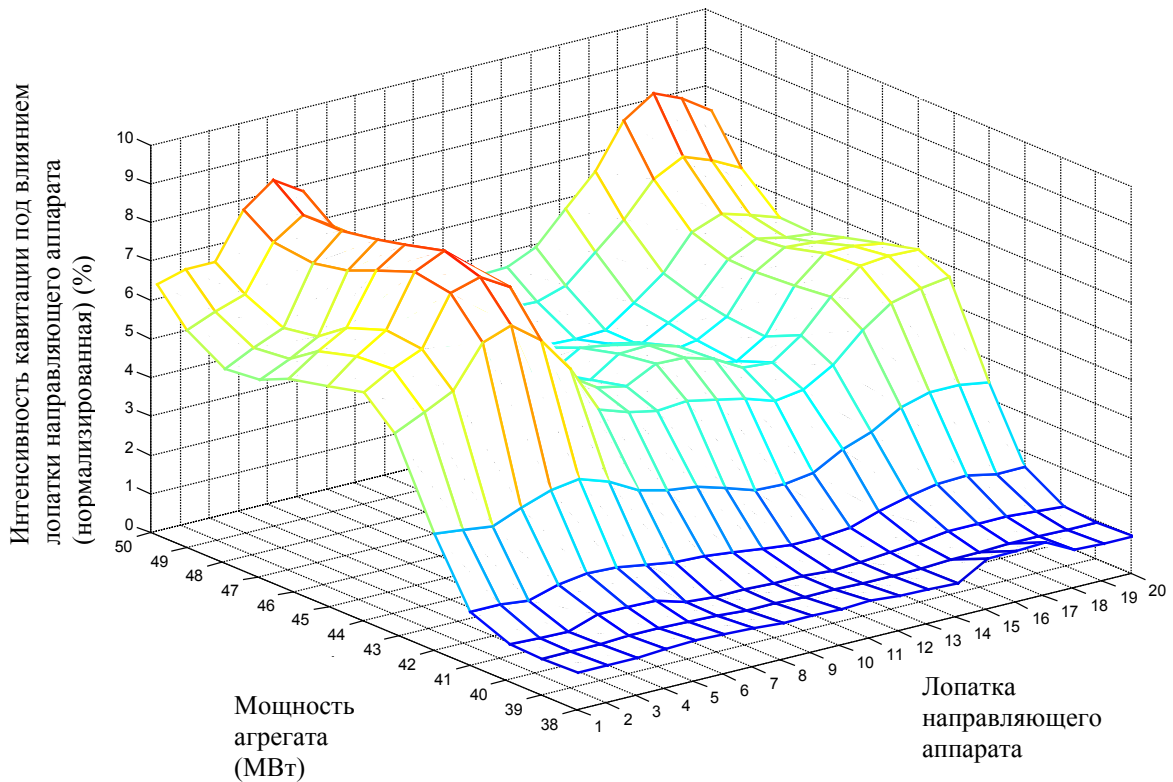


Рисунок 4а

Модифицированное рабочее колесо

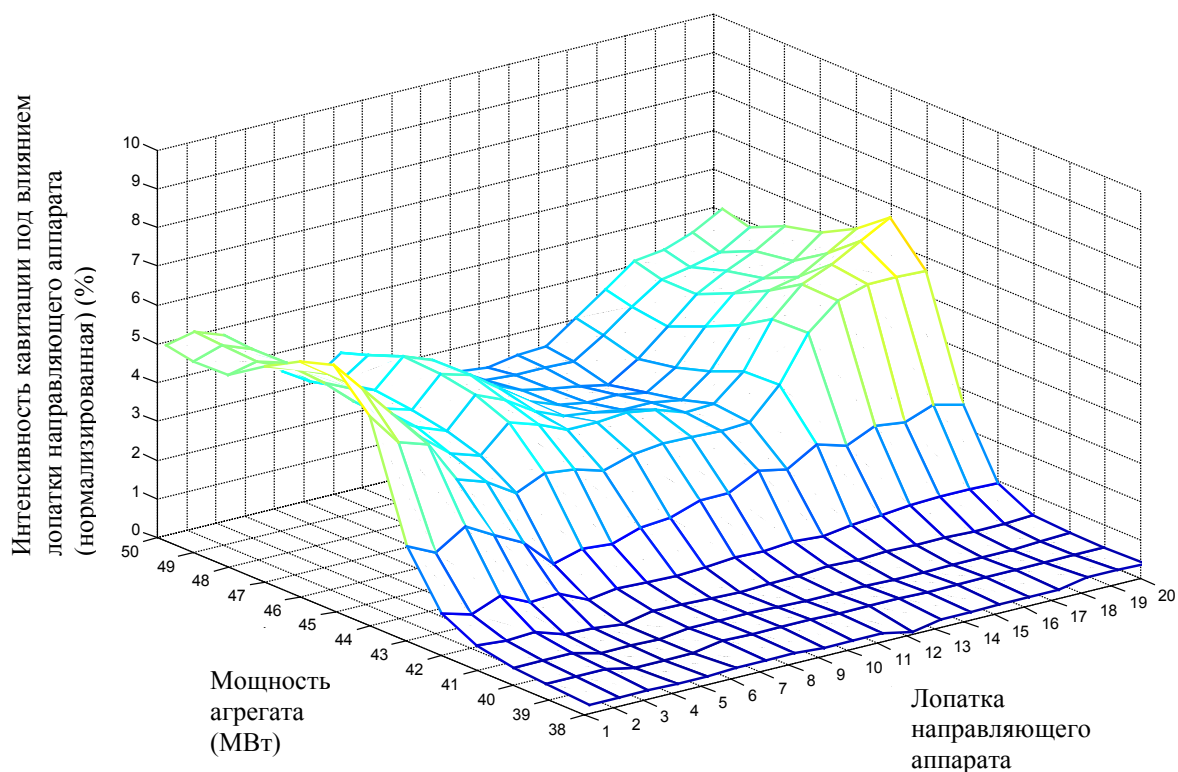


Рисунок 4б

Иллюстрация кавитационных характеристик

Детальное описание кавитации в турбине, которое можно получить только многомерным методом, проиллюстрировано на рис. 2. Полное описание такого вида на одну турбину содержит столько таких графов, сколько у нее лопаток направляющего аппарата; на рис. 1 показана характеристика только одной - лопатки 1. Для выбранной пары лопатка направляющего аппарата – лопасть рабочего колеса эти

(А) *детальные кавитационные характеристики турбины*

дают оценку той части интенсивности кавитации на рассматриваемой лопасти рабочего колеса, которая подвергнута воздействию рассматриваемой лопатки направляющего аппарата путем искажения поля скоростей потока на профиль лопасти рабочего колеса.

На данном описании характеристики откалиброваны таким образом, что показывают процентную долю пары лопатка-лопасть в суммарной интенсивности кавитации всей турбины и, в частности, для легкого сравнения двух испытанных турбин – по отношению к общей интенсивности кавитации на одной из них, при максимальной ее мощности. При этом в качестве базовой принята турбина с немодифицированным рабочим колесом при мощности 48 МВт.

Суммированием детальных данных множества характеристик подобных представленной на рис. 2 получаются:

(Б) *кавитационная характеристика рабочего колеса* (рис. 3а и 3б) и

(В) *кавитационная характеристика направляющего аппарата* (рис. 4а и 4б);

в том числе на рисунках *а* - турбины с немодифицированным рабочим колесом, а на рисунках *б* - турбины с модифицированным рабочим колесом.

Характеристика (Б) оценивает общую интенсивность кавитации у каждой из лопастей рабочего колеса, полученную суммированием воздействия всех лопаток направляющего аппарата, а характеристика (В) - кавитационное качество отдельной лопатки направляющего аппарата, полученное суммированием воздействий на всех лопастях рабочего колеса.

Дальнейшим суммированием указанных характеристик получается самое простое описание кавитации в виде

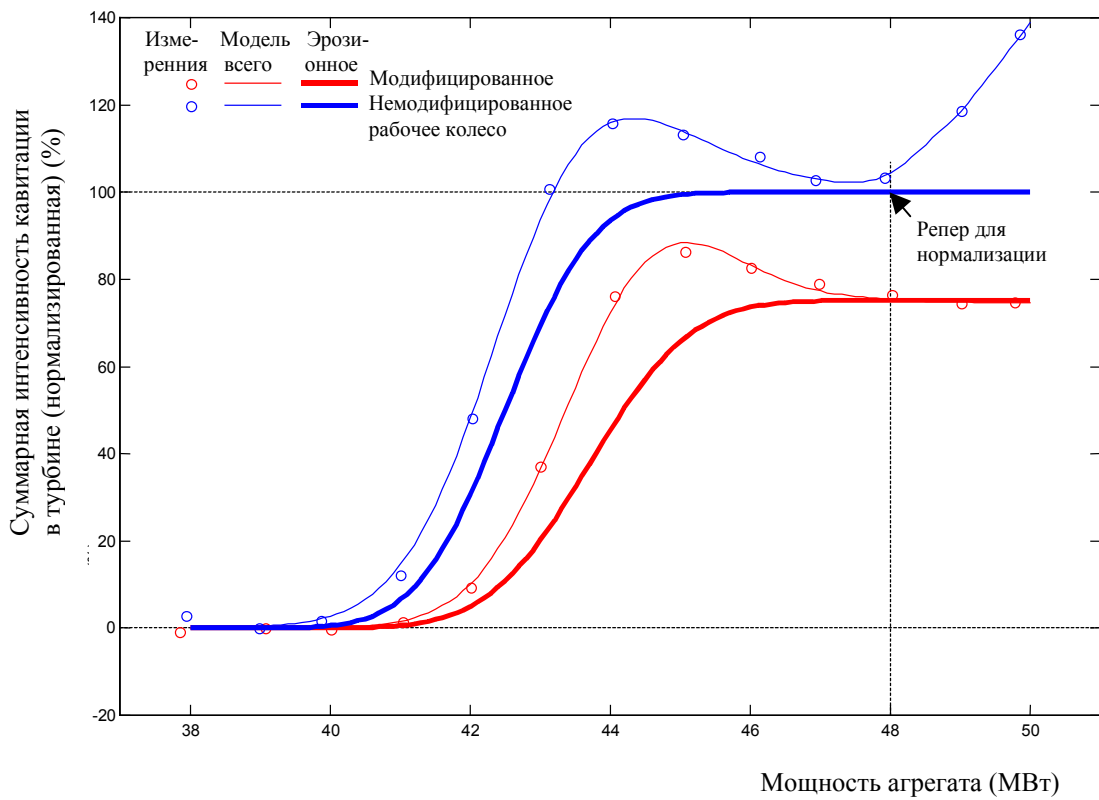


Рисунок 5а

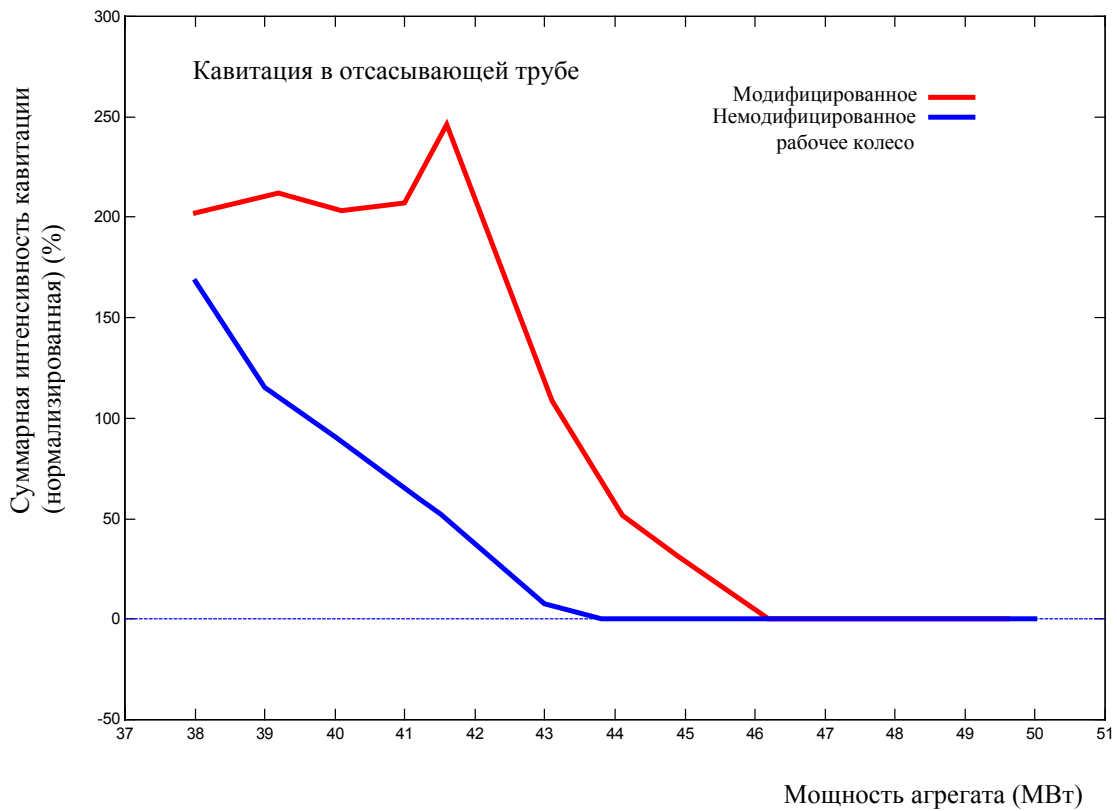


Рисунок 5б

(Г) общей кавитационной характеристики турбины,

дающей суммарную интенсивность кавитации в рассматриваемой турбине (рис. 5а).

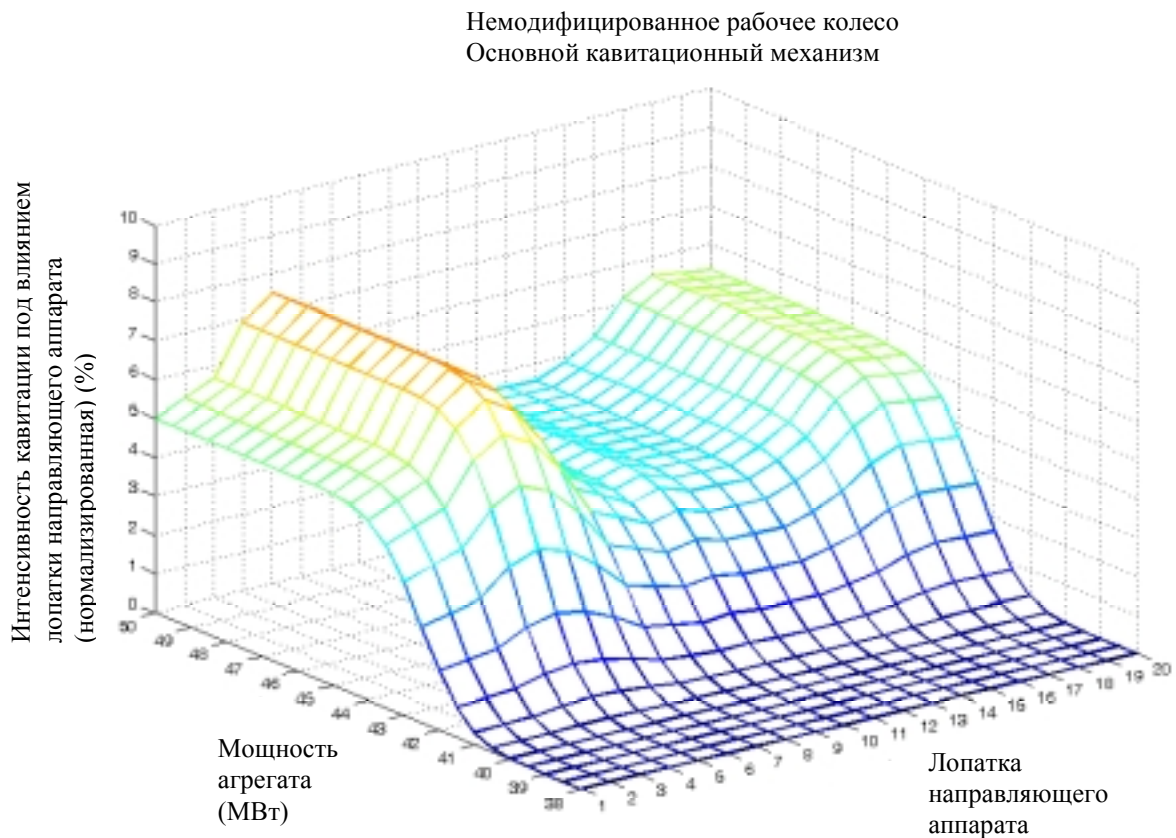
Любой вид описания кавитации показывает ее интенсивность в виде зависимости от параметров режима работы: напора, расхода, открытия направляющего аппарата, угла установки лопастей рабочего колеса у поворотных лопастных турбин, уровня нижнего бьефа; в данном случае, это сводится к мощности при неизменяемом напоре и неизменяемом уровне нижнего бьефа.

Кавитационные механизмы

Кавитационные характеристики на рис. 2-4 и те, которые представлены точками (измерения) и тонкими линиями (модели) на рис. 5а представляют общую интенсивность кавитации, т.е. суммарную интенсивность всех кавитационных механизмов в рассматриваемой турбине. Под кавитационными механизмами подразумеваем разные типы кавитации или кавитацию одинакового типа, возникающую в разных местах.

Если в турбине действует несколько кавитационных механизмов, все виды кавитационных характеристик, от (А) до (Г), можно определить для каждого из них. Анализ показал, что в каждой из здесь рассматриваемых турбин действуют по три механизма. Для кавитационной характеристики направляющего аппарата они описаны на рис. 6а-6в. Речь идет о следующем:

- рис. 6а - поверхностная кавитация, возникающая и прекращающаяся у поверхности лопасти рабочего колеса, на отсасывающей стороне;
- рис. 6б - кавитация входной кромки лопасти рабочего колеса, на отсасывающей стороне (чаще всего этого не видно при модельных испытаниях радиально-осевых турбин, но легко обнаруживается при вибро-акустических испытаниях);
- рис. 6в - поверхностная кавитация, возникающая, аналогично такой как на рис. 6а, на поверхности лопасти рабочего колеса, на отсасывающей стороне прекращающаяся вне поверхности лопасти.



Немодифицированное рабочее колесо
Кавитационный механизм при небольших мощностях

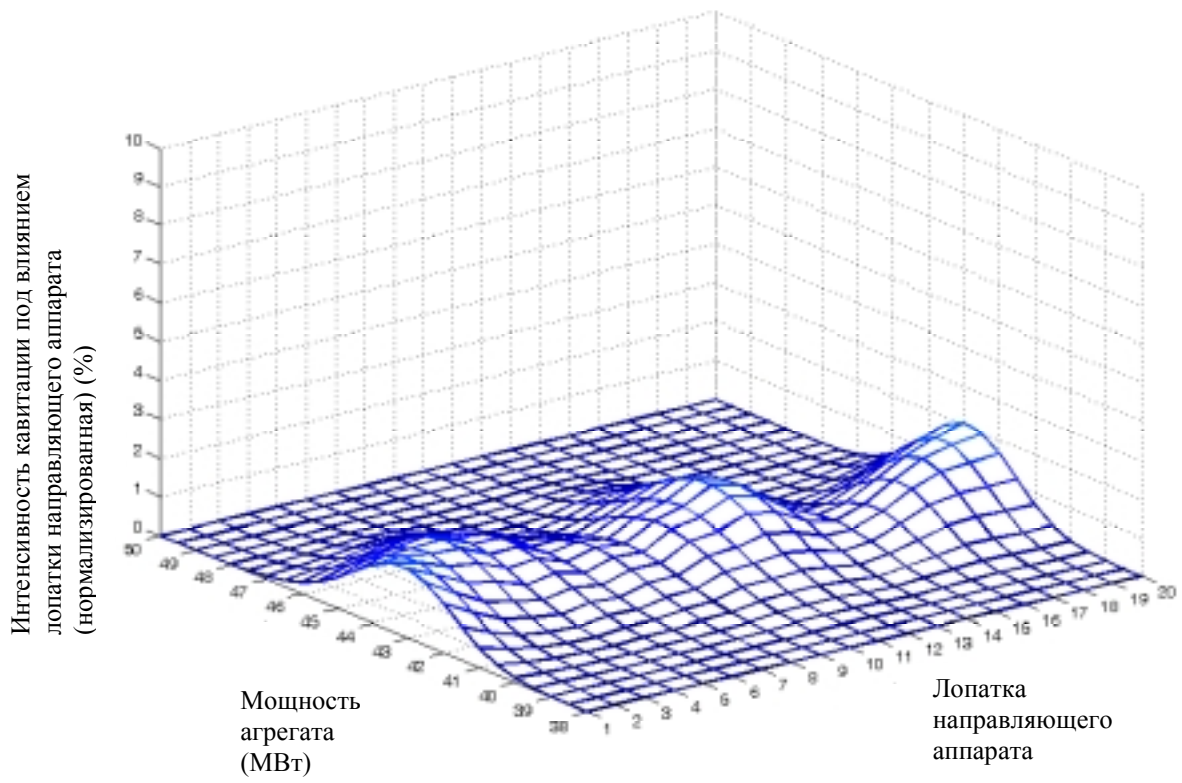


Рисунок 6б

Немодифицированное рабочее колесо
Кавитационный механизм при больших мощностях

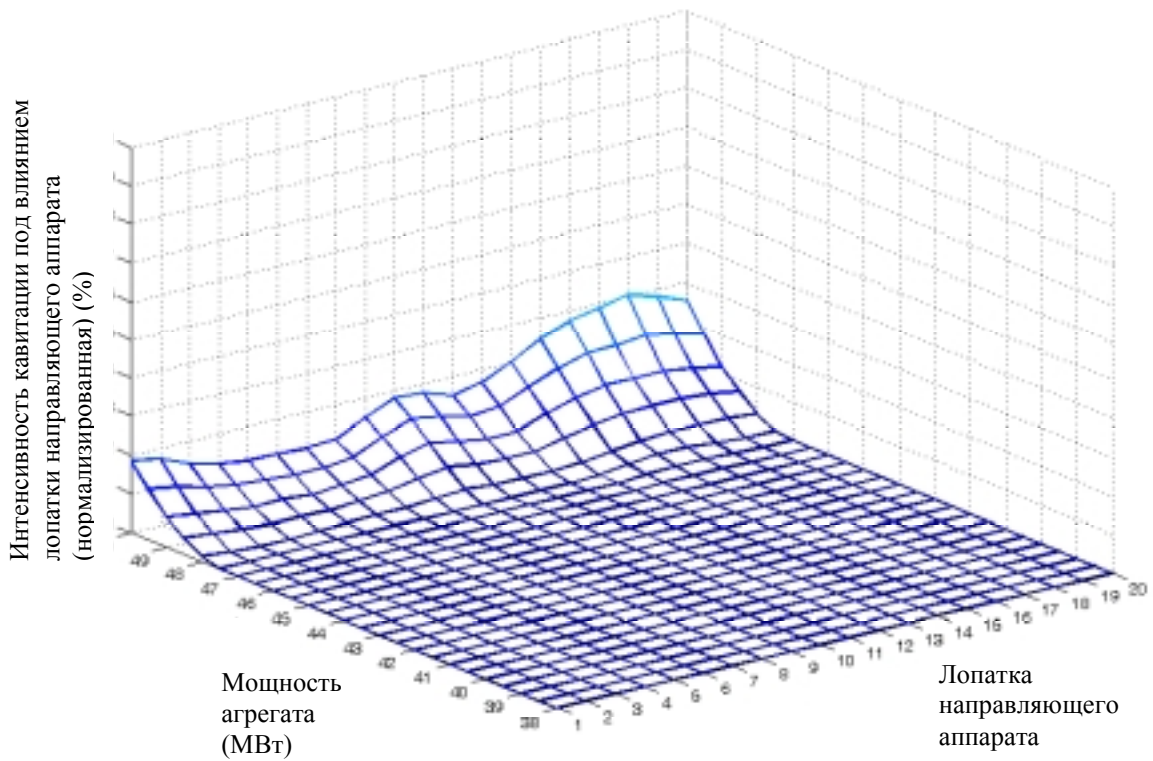


Рисунок 6в

Эрозионным является только первый из этих трех механизмов. Следовательно, с практической точки зрения, важное значение имеет только механизм, показанный на рис. 6а.

Об использовании многомерных характеристик

Более детальные описания кавитации (множество характеристик, таких как на рис. 2, а также характеристики на рис. 3 и 4) пригодны для:

- оценки кавитационного качества соответствующих частей турбины - лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса,
- оценки воздействия процессов в спиральной камере на кавитацию на рабочем колесе (в случае турбин с горизонтальным валом и для оценки воздействия обстоятельств по вертикальной плоскости).

Краткое описание (рис. 5а) пригодно для

- оптимизации режима работы агрегатов.

Здесь речь идет о величине порога кавитации и о виде зависимости интенсивности от режимов работы. Обращаем внимание, что вид этой зависимости не является обязательно неизменяемым, как в рассматриваемом примере.

Для практического использования результатов многомерных измерений или мониторинга кавитации не всегда нужна калибровка оценки интенсивности в скорость эрозии. В рассматриваемом случае, где оценивается эффективность модификации рабочего колеса, полный результат получается уже на основании относительных оценок интенсивности. В действительности, сравнение кривых эрозии двух турбин (жирные линии на рис. 5а, синяя и красная), характеризуют результат модификации. Как видно,

- на модифицированном рабочем колесе кавитация возникает при повышении мощности на 1 МВт, а интенсивность развитой кавитации и соответствующая скорость эрозии на 25% меньше. Однако,
- как показывает рис. 5б, это улучшение кавитационных характеристик рабочего колеса сопровождается ухудшением кавитационных процессов в отсасывающей трубе. Это не влияет на эрозию, но влияет на стабильность работы турбины на небольших мощностях.

Абсолютная оценка эрозии

После идентификации кавитационных механизмов и определения эрозионных среди них, а также определения зависимости интенсивности от режима работы турбины, возможна калибровка оценок интенсивности кавитации в скорость эрозии. Откалиброванные таким образом детальные характеристики (А) дают оценку части интенсивности, связанной с рассматриваемой парой лопатка направляющего аппарата - лопасть рабочего колеса, в виде

массы уноса металла в килограммах
на лопасти рабочего колеса
из-за воздействия лопатки направляющего аппарата
при работе в интервале мощности выбранной ширины (нпр. 1 МВт) около выбранного значения
в течение выбранного периода времени (нпр. 10000 часов),
если турбина работает все это время на мощности в рамках этого интервала.

Аналогичным образом эта калибровка определена для других видов кавитационных характеристик, (Б)-(Г).

Если турбина работает на нескольких различных мощностях, то оценка износа металла производится суммированием продукта описанного сведения о скорости эрозии и относительного времени, в течение которого турбина работает в отдельном интервале мощности. Следовательно, для оценки накопленной массы эрозии необходимо знать статистику межремонтных мощностей и указанные выше данные о кавитации. Если вместе с мощностью изменяются напор и уровень нижнего бьефа, то учитывается зависимость уносов и от этих параметров.

Абсолютно калиброванная общая кавитационная характеристика турбины без модификации рабочего колеса (жирная линия на рис. 5а) показана на рис. 7а. Оценка скорости уноса дополнена доверительными зонами рассеяния из-за общей погрешности метода (пунктирные линии). Эти пределы надежности результатов введены также в оценку накопленной эрозии (вертикальные красные линии на левой стороне рис. 7а).

(Как выше)

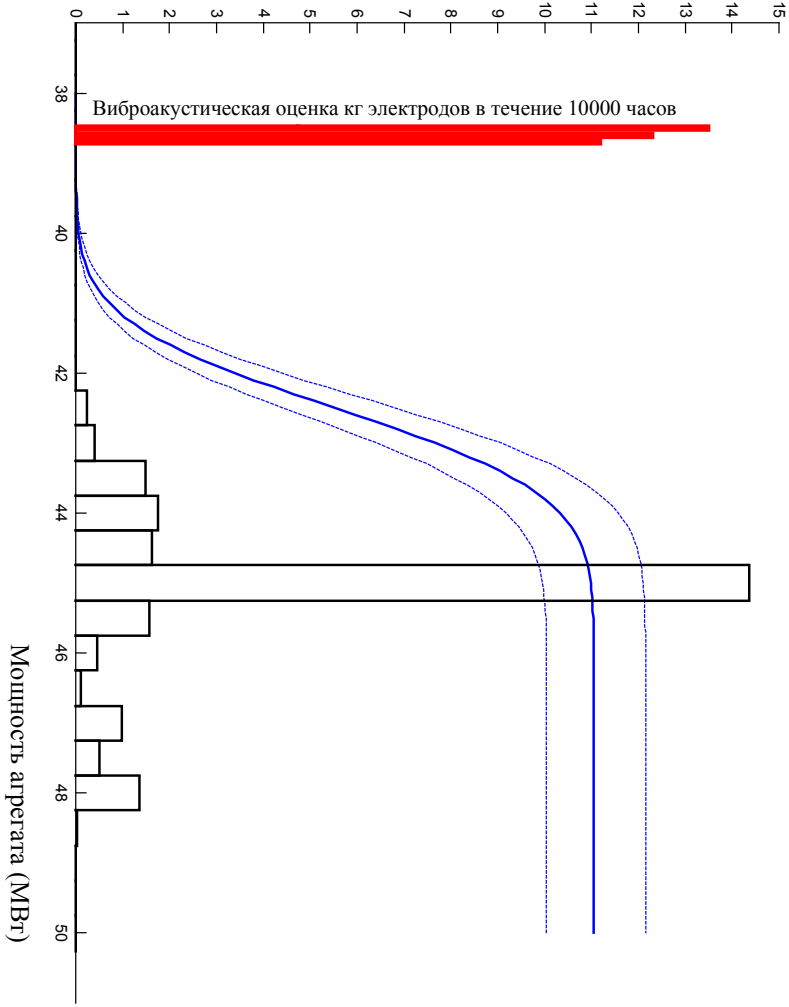


Рисунок 76

Скорость уноса металла (кг электродов в течение 10000 часов)

$1/4 \times$ Относительное время нахождения внутри интервала мощности шириной 1/2 МВт (%)

Акумулированный унос металла (кг электродов в течение 10000 часов)

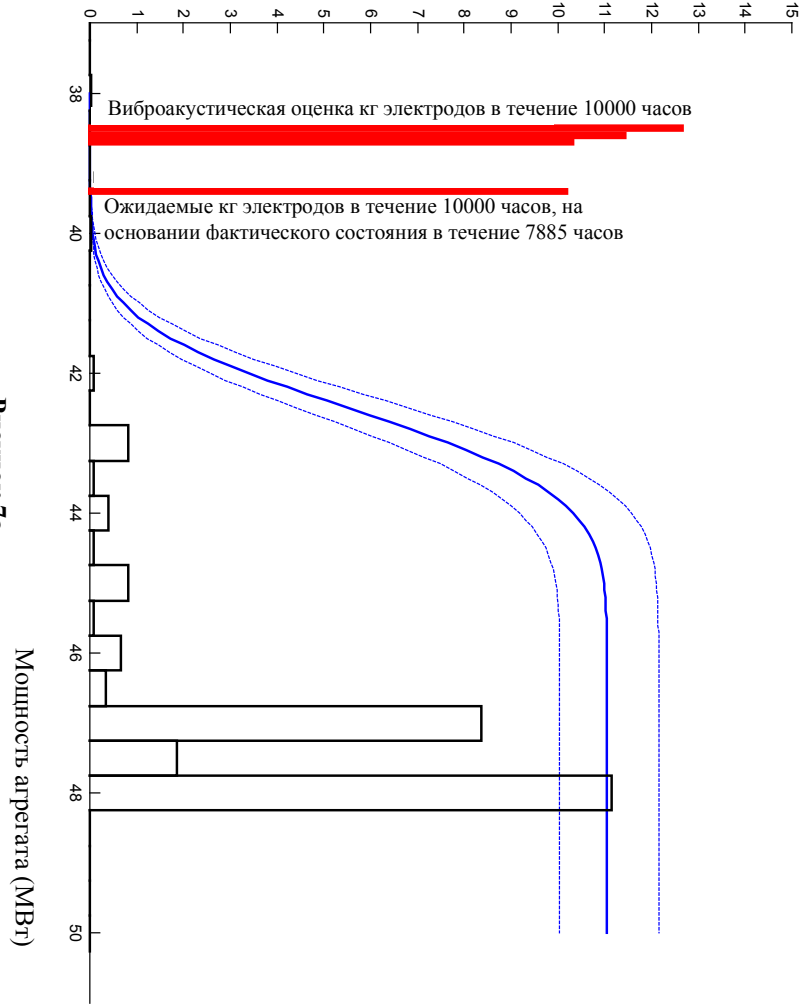


Рисунок 7a

Немодифицированное рабочее колесо

Немодифицированное рабочее колесо

О смысле виброакустических испытаний

Смысл виброакустических испытаний иллюстрирует случай рис. 7б. Персонал гидроэлектростанции несколько лет искал решение проблемы кавитационной эрозии. Для оценки в его распоряжении был собственный опыт, накопленный при ремонтах (не показывающий зависимость от режима работы, а только окончательные результаты), а также результаты модельных испытаний (дающие немного практически используемых результатов, см. рис. 1). До проведения виброакустических испытаний у персонала не было данных о виде зависимости эрозии от режимов работы (показанна на рис. 5а и 7). Поэтому он провел эксперимент круглогодичной работы при мощности от только 45 МВт (гистограмма мощности на рис. 7б). Однако, сравнивая эту гистограмму с кривой зависимости интенсивности эрозионной кавитации, дополнительно полученной при вибро-акустических испытаниях, видим, что эта попытка не имела шансов на успех, и этот эксперимент был бесполезен.

О чувствительности мониторинга

Вредные кавитационные эффекты в начальной фазе своего развития чаще всего хорошо выявляемы, т.е. возникают в какой-то части турбины (на одной из лопастей рабочего колеса, за какой-то из лопаток направляющего аппарата и т.п.). Когда с помощью обычного мониторинга, измеряющего общий кавитационный шум, прямо или путем структурного шума, делается попытка обнаружения такого отклонения от нормальной работы турбины, сравнивается общий шум в турбине до и после возникновения вредного эффекта. Многомерный мониторинг разделяет участие отдельных частей турбины, так что обнаружение здесь сводится к сравнению общего шума связанного с отдельным узлом турбины, до и после возникновения эффекта. Поэтому чувствительность многомерного мониторинга кавитации больше чувствительности обычного мониторинга на коэффициент равный количеству лопастей рабочего колеса если алгоритм мониторинга основывается на кавитационной характеристике (Б), на коэффициент равный количеству лопаток направляющего аппарата, если алгоритм связан с (В), и даже на коэффициент равный произведению количества лопаток направляющего аппарата и количества лопастей рабочего колеса, если мониторинг основывается на кавитационной характеристике (А).

Следовательно, в данном примере речь идет о чувствительности увеличенной в 20, 17 или 20×17 раз.

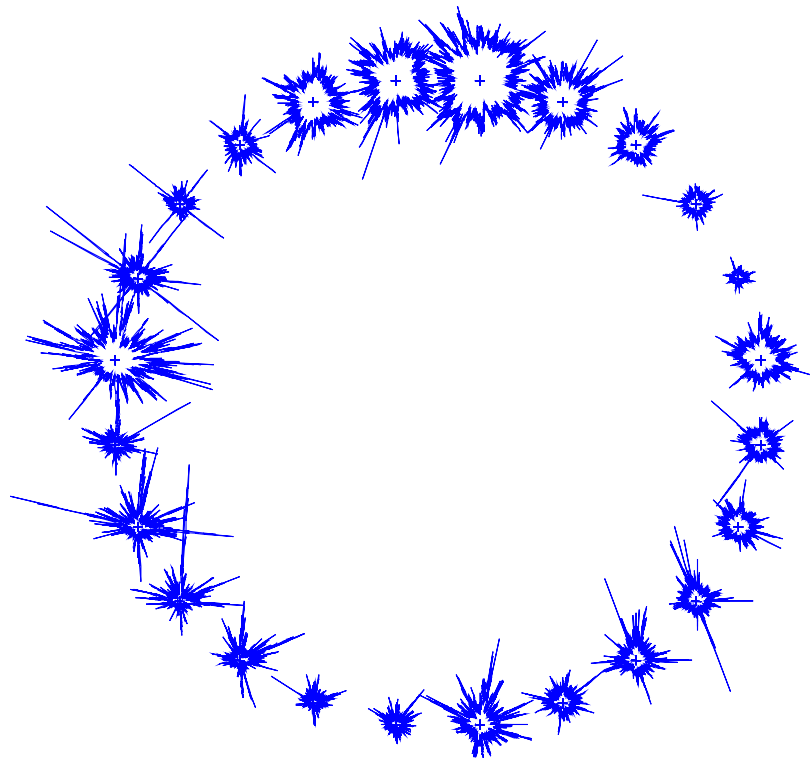


Рисунок 8

О репрезентативности показаний мониторинга

Типичным для обычных мониторингов кавитации является использование только одного или нескольких датчиков на турбину. Многомерные мониторинги работают с большим количеством датчиков - обычно 4, 6 или 8 - которые соответствующим образом размещены по турбине. Это обеспечивает репрезентативный показ всех сегментов кавитационного процесса. Когда после специальной многомерной процедуры анализа и синтеза будут установлены оценки по логике кавитационных характеристик (А), (Б), (В) или (Г), можно утверждать, что вредные эффекты будут обнаружены несмотря на место их возникновения и что оценки кавитационного качества частей турбины будут беспристрастны.

На рис. 8 показано, к чему может привести работа с слишком малым количеством датчиков. На нем представлены результаты измерений круговой зависимости интенсивности кавитационного шума от моментального углового положения рабочего колеса, полученные с помощью датчиков в 24-х положениях вокруг ротора. (Каждая из 24-х кривых соответствует одному положению датчика, а угловая переменная на каждой из диаграмм соответствует угловому положению рабочего колеса; радиальная координата показывает интенсивность шума). Средние значения этих кривых значительно отличаются при разных положениях датчиков, а то же самое распространяется и на форму зависимости от положения рабочего колеса. Вывод: если кавитационный шум измеряется только в одном или нескольких положениях вокруг ротора, могут получиться ошибочные оценки интенсивности кавитации и ошибочные данные о роли частей турбины, которые определяются на основании формы этих кривых.

Результаты на рис. 8 получены на турбине с горизонтальным валом, где из-за разности давлений вертикальное положение имеет важное значение. Подобные обстоятельства обнаружены и в турбинах с вертикальным валом; тут преобладает влияние положения в спиральной камере.

О реализации мониторинга

Корто развил также особую реализацию системы мониторинга, как общего так и мониторинга кавитации [6]. Она основывается на несложном аппаратном обеспечении, однако, из-за использования многомерного программного обеспечения, несмотря на невысокие расходы, гарантирует рабочие характеристики как у больших систем мониторинга.

Форма представления результатов мониторинга согласовывается заказчиком. Один из возможных видов показа результатов представлен на рис. 9 и 10. Применено решение с одновременным показом всех важных результатов в основном окне (рис. 9). Остальные данные видны в ряде вспомогательных окон (см. примеры на рис. 10).

В данном примере мониторинг кавитации встроен в общий мониторинг контролируемых параметров агрегатов (группа справа вверху на рис. 9б). Возможны и другие решения: полностью независимый мониторинг кавитации с показом на собственном экране, или же пассивный кавитационный мониторинг, выводящий окончательные величины для описания кавитации, которые направляются на общий мониторинг электростанции и показываются вместе с другими наблюдаемыми величинами. Важным является то обстоятельство, что в многомерном мониторинге кавитации обрабатывается большое количество высокочастотных сигналов от относительно большого количества размещенных датчиков. Этим кавитационные каналы значительно отличаются от остальных каналов общих мониторингов.

Вывод

Многомерная техника диагностических испытаний и мониторинга кавитации обладает рядом преимуществ по отношению к более простым подходам. Она обеспечивает установление роли частей турбины в кавитационном процессе и идентификацию кавитационных механизмов, дает детальные данные, необходимые для диагностики кавитационного процесса и оптимизации работы турбины, а также обеспечивает репрезентативность оценок кавитации и исключительно высокую чувствительность мониторинга.

С применением многомерного алгоритма возможно несложное аппаратное обеспечение кавитационного и общего мониторингов, имеющих рабочие характеристики больших систем, при чем снижены расходы по выполнению и обслуживанию системы.

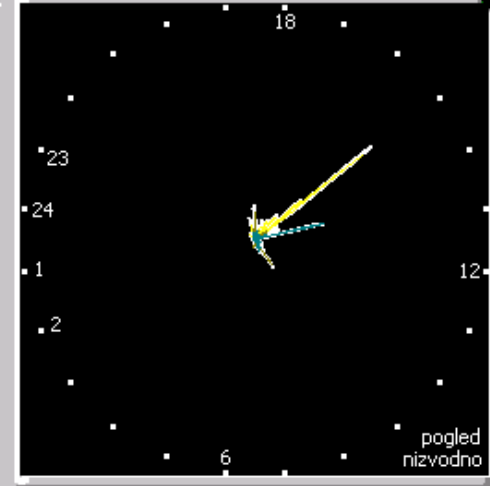
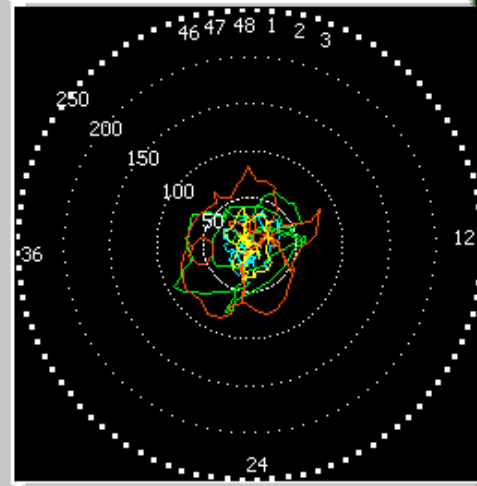
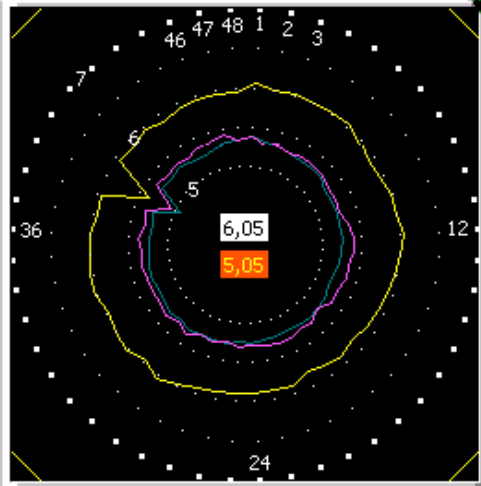
HED Ag A

Zračni raspored (mm) i magnetski tok (T)

Vibracije vratila (μm)

Intenzitet kavitacije

Režim	Temperatura
GVS m	blaz gen
149,25	46,0
DVS m	blaz aks uz
129,65	53,5
Pad ul r m	blaz ak niz
0,36	68,0
OPK %	blaz turb
70,4	46,2
ORK %	ulje gen
69,6	39,3
Qag m3/s	ulje aks
198,3	44,9
Srad MW	ulje turb
35,9	38,7
Sjal MVar	ulje g spr
4,7	40,7
Eta %	sred stat
89,7	72,9
SradD MW	
0,5	
SjaD MVar	
-0,8	
QagD m3/s	
0,9	

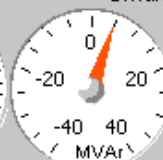
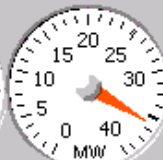


Ekscentricitet uzvod nizvod 0 90 180 270

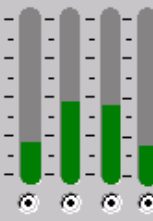
iznos (μm): 0 8
na polu: 0,0 25,6

tur ak niz ak uz gen

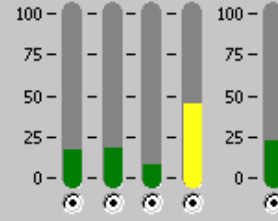
Smax μm Kav uk sred % GVS m DVS m OPK % ORK % Eta % SradA MW



Smax μm tur ak niz ak uz gen



Lopata 1 2 3 4 Ukupno



Razlučivanje grubo fino



Используется язык по требованию заказчика.

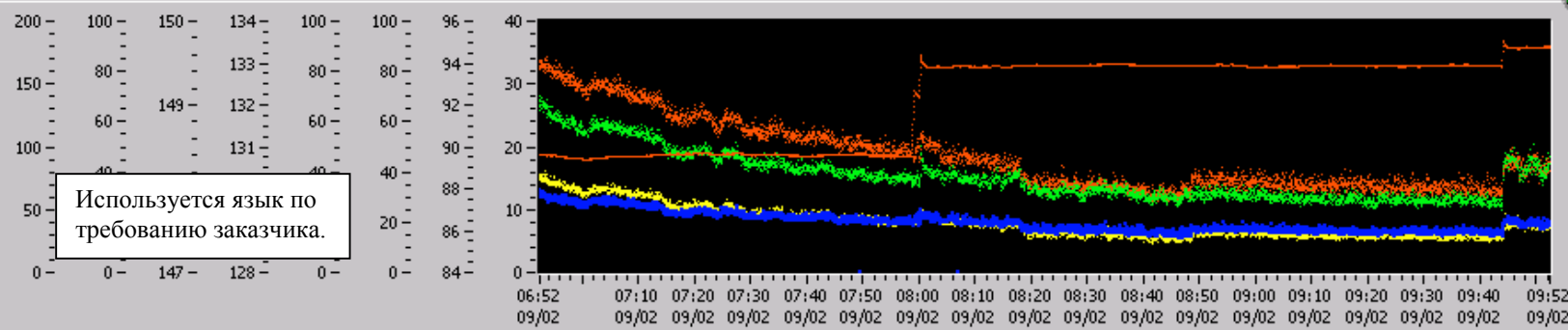


Рисунок 9а

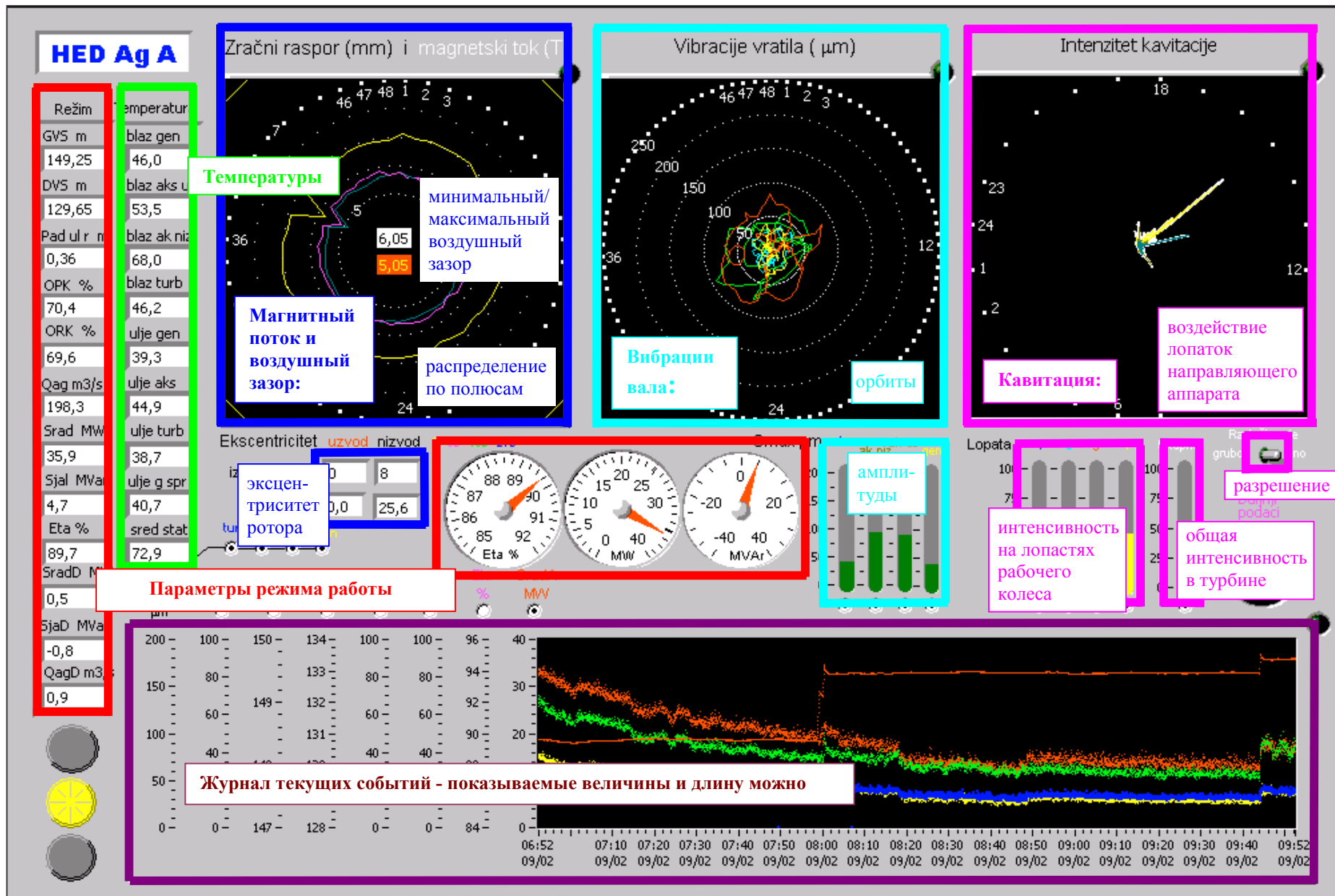
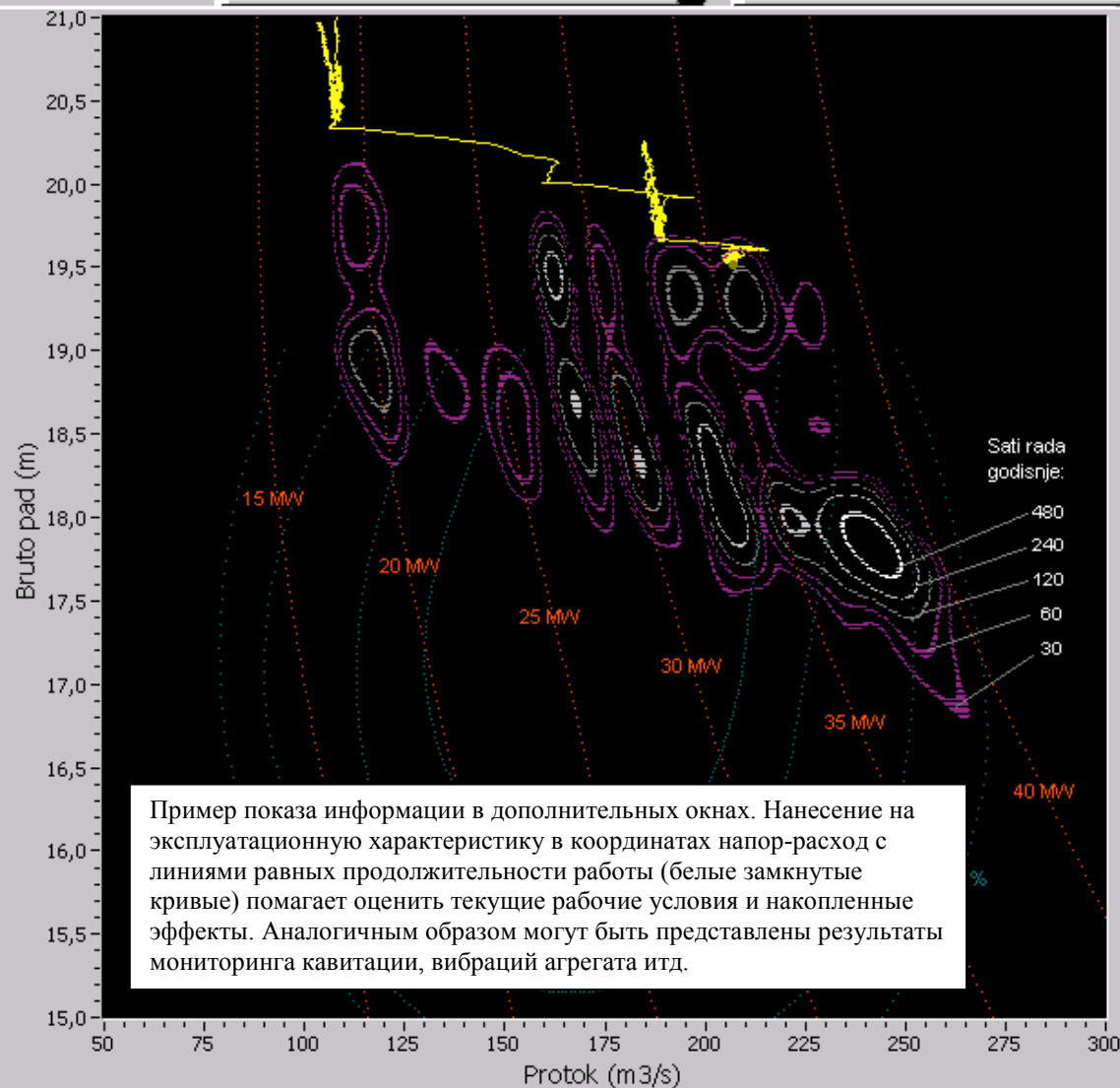


Рисунок 96

HED Ag A

Zračni raspор (mm) i magnetski tok (T)

Vibracije vratila (μm)



Пример показа информации в дополнительных окнах. Нанесение на эксплуатационную характеристику в координатах напор-расход с линиями равных продолжительности работы (белые замкнутые кривые) помогает оценить текущие рабочие условия и накопленные эффекты. Аналогичным образом могут быть представлены результаты мониторинга кавитации, вибраций агрегата итд.

- DALJNI PODACI
- Vibracije vratila - pregled
 - Vibracije vratila nad parametrima rezima
 - Zracni raspор iznad pola detaljno
 - Zracni raspор iznad pola nad vremenom
 - Oblik rotora i statora
 - Gibanje osi rotora
 - Radijalno rastezanje polnog kotaca
 - Radijalna stabilnost spoja vratila i polnog kotaca
 - Magnetski tok nad vremenom
 - Magnetska karakteristika polova
 - Njihanje snage nad parametrima rezima
 - Njihanje snage nad vremenom
 - Kavitacija - intenzitet nad parametrima rezima
 - Temperature
 - Radna točka**
 - Pregled signala- valni oblici
 - Pregled signala - spektri

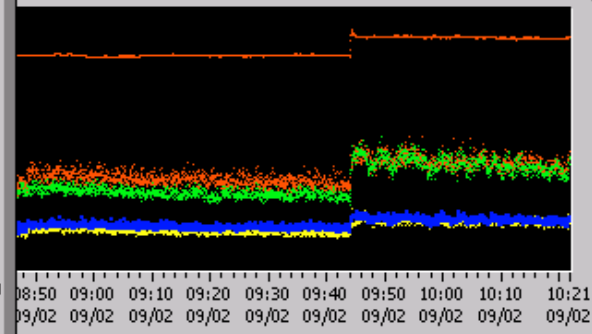


Рисунок 10а

Литература*

1. Multi-dimensional diagnostics of turbine cavitation, *Journal of Fluids Engineering*, том 124, № 4, 2002, стр. 943-950;
Впервые представлено на: *20th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems*, Charlotte, North Carolina, США, август 2000.
2. Cavitation diagnostics and monitoring, *International Water Power & Dam Construction*, том 56, № 2, 2003, стр. 32-35.
3. Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation, *Journal of Hydraulic Research*, том 41, № 1, 2003, стр. 87-96.
4. Vibro-acoustical diagnostics of turbine cavitation - Examples of application, *HydroVision 2000 Conference*, Charlotte, North Carolina, США, август 2000.
5. Turbine instability explained by multidimensional cavitation diagnostics, *Hydro 2003 Conference*, Dubrovnik, Хорватия, ноябрь 2003.
6. A new generation of hydrounit monitors, *HydroVision 2004 Conference*, Montreal, Quebec, Канада, август 2004.

* Автор работ Б. Баич (B. Bajić). Некоторые из работ можно получить пересылкой со сайта www.korto.com, а копии остальных - по адресу info@korto.com.