

## **ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТД В СОСТАВЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ**

ДЕГТЯРЕВ А.А., КОЛОТНИКОВ М.Е., КУЛЬЧИХИН В.Г., ЛЕОНТЬЕВ М.К.,  
НЕКРАСОВ С.С.

### **АННОТАЦИЯ**

Рассматриваются вопросы диагностики технического состояния газотурбинных двигателей в составе наземных установок путем мониторинга их вибрационного состояния. Основные принципы и требования к проведению мониторинга, требования к соответствующим техническим и программным средствам рассматриваются на примере диагностического комплекса для газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц16, установленного в Тюменьтрансгазе. Приводятся данные по мониторингу вибрационного состояния ГТД, проводившегося на протяжении нескольких лет, которые убедительно доказывают эффективность его применения с целью диагностики технического состояния.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время производители и эксплуатирующие организации стремятся вести эксплуатацию газотурбинных двигателей (ГТД) в составе газоперекачивающих станций по их техническому состоянию. Это позволяет снизить стоимость эксплуатации, увеличить межремонтный ресурс, снизить трудозатраты на обслуживание, своевременную постановку на ремонт. Большое значение в связи с этим приобретает оснащение агрегатов современным комплексами, позволяющих проводить диагностику технического состояния в процессе их работы, среди которых особое место занимает вибрационная диагностика с современными средствами аналоговой и цифровой вычислительной техникой [1], [2].

В отличие от авиационных двигателей, турбоагрегаты газоперекачивающих станций являются объектом, где вибрационная диагностика может быть реализована во всей ее полноте. Это связано с работой турбоагрегатов практически на одних и тех же режимах в течение длительного времени, что позволяет организовать так называемый трендовый контроль по любому признаку или их совокупности, используемому в целях диагностики.

Конечно, важен и тот факт, что в условиях наземного использования разработчики практически не стеснены такими характеристиками диагностирующих комплексов как типы и количество используемых датчиков, вес первичной или вторичной аппаратуры, объем занимаемого пространства, быстродействие и функциональность программного обеспечения, объем накапливаемых и хранимых данных и т.д.

Эксплуатационная статистика подтверждает высокую эффективность использования методов вибродиагностики в контроле состояния газотурбинных

установок [3]. Возврат средств, затраченных на приобретение и эксплуатацию диагностических систем обычно происходит при первом предотвращении неисправности. В настоящее время в мире практически не существует производителей турбоагрегатов наземного применения, которые бы не включали в системы контроля комплексы по мониторингу вибрационного состояния, позволяющие вести постоянный контроль технического состояния объекта.

В настоящей статье рассматриваются общие вопросы, связанные с использованием такого рода комплексов, их программного обеспечения, характеристики которого могут существенно зависеть как от используемой первичной аппаратуры, так и от конструктивных особенностей турбоагрегатов, для которых осуществляется мониторинг. Все выводы и примеры даются на основании результатов, полученных на протяжении более чем трехлетней и практически непрерывной работы комплекса по мониторингу вибрационного состояния ГТД в составе газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16.

## **ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСАМ**

Как уже отмечалось главной особенностью газоперекачивающих турбоагрегатов является их длительная работа на протяжении нескольких тысяч часов без остановки. В этих условиях к программному обеспечению предъявляются требования высокой надежности, а также удобного программного интерфейса, позволяющего оператору быстро получать и оценивать имеющуюся информацию по техническому состоянию объекта.

### *Надёжность*

Надежность программного обеспечения и его работоспособности зависит от многих факторов. Наиболее влияющим по мнению авторов является операционная среда, которая используется для работы программного обеспечения. На момент создания описываемого программного обеспечения существовало только две альтернативы: MS DOS и Windows 95/NT. Существующие наработки, а также тот факт, что система Windows в то время, да и сейчас недостаточно приспособлена к работе в режиме реального времени, а также в течение длительных интервалов времени без перезагрузки, привели к выбору MS DOS. К сожалению, проблема этого выбора остается и поныне - либо возможность непрерывного мониторинга с высокой надежностью и на протяжении длительного времени в ущерб развитой многофункциональности, либо удобные интерфейсы оператора с широкими возможностями в ущерб гарантированной работоспособности. Многие разработчики обосновывают свою склонность к выбору современных операционных систем типа Windows 95/98 или NT возможностью вести мониторинг состояния стационарных агрегатов с достаточно большими временными перерывами, в течение которых можно остановить компьютеры, произвести их перезагрузку, провести профилактику и т.д. На наш взгляд такой подход не всегда приемлем. Частота опроса должна быть достаточно высокой – не менее 10...20 раз в минуту.

Необходимость сохранения большого количества информации, полученной на протяжении многих тысяч часов требует соответствующих алгоритмов сжатия и архивации данных в ЭВМ.

Алгоритмы сжатия должны обеспечить сохранение всей информации за последние часы работы агрегата, перед его возможной остановкой по каким-либо причинам, а также сжатую информацию за определенный период времени. Схемы сжатия и выбор хранимой информации во многом определяется конкретным турбоагрегатом и установленными приоритетами.

Выбранные алгоритмы архивации должны обеспечить минимальные потери информации при возможных сбоях в работе программной и аппаратной части комплекса. Существующие базы данных, в которых целостность всей информации зависит от целостности одного двух файлов, весьма уязвимы к сбоям компьютера и программного обеспечения. В связи с этим авторами была разработана иная схема хранения данных, которая позволяет сохранять собранную информацию, пока не будет полностью разрушена файловая система компьютера. Вся информация, получаемая в ходе работы программы, которую необходимо сохранить для дальнейшего анализа, разбивается на независимые блоки и записывается в виде отдельных файлов, в заголовке каждого из которых содержатся записи о типе и времени сбора содержимого этого файла. При последующем проведении работ по обслуживанию комплекса, включающие анализ собранной системой информации, эти файлы обрабатываются специальной программой, которая собирает все данные, содержащиеся в отдельных файлах в одну базу данных.

Одной из важных функций программного обеспечения является возможность постоянного контроля исправности измерительной части комплекса - первичной аппаратуры. Специальные алгоритмы обработки позволяют выявить неисправность измерительного канала по отсутствию «физики» в регистрируемых данных. Например, каналы тахометра могут быть легко проконтролированы по соотношениям регистрируемых оборотов роторов ГТД, каналы вибрационных преобразователей – по изменениям в уровнях соответствующих гармонических составляющих, либо по появлению шумовых компонент, не являющихся признаками состояния агрегата.

В качестве последнего требования к программному обеспечению (но далеко не завершающего их список) можно отметить “неубиваемость” программы ни при каких действиях оператора - неграмотных или умышленных. Единственно возможные причины прекращения мониторинга – санкционированный доступ, отсутствие питания или разрушение компьютера.

#### Пользовательский интерфейс

Достаточность, логичность и отсутствие лишней информации в пользовательском интерфейсе программы мониторинга определяют качество комплекса в целом.

При проектировании интерфейса такого рода программ приходится учитывать два взаимоисключающих требования. С одной стороны, содержимое основного экрана программы должно отражать текущее состояние обслуживаемого агрегата, что в общем случае сводится, например, к световой трехступенчатой индикации – норма, внимание, опасно. С другой стороны, при

возникновении какой-либо неисправности, отслеженной системой, обслуживающий персонал должен иметь возможность достаточно быстро получить исчерпывающую информацию об источнике неисправности и признаках, по которым был сделан диагноз.

Более того, предоставляемая пользователю информация должна в зависимости от его квалификации содержать несколько уровней вложений, дающих возможность последовательно получить всю информацию, не обремененную излишними деталями.

Несомненны и такие требования к интерфейсу как – полная “прозрачность” и простота установления соответствий для функциональных клавиш – либо на экране, либо на основной клавиатуре.

Указанные выше требования привели к выработке соответствующей идеологии пользовательского интерфейса описываемой программы. Рабочий экран включает три основных части, в соответствии с тремя основными видами информации, необходимой пользователю - диагностической, текущей и подсказок.

Окно диагностических сообщений. Выполняет двойную функцию - сигнализацию текущего состояния агрегата (например, цветом) и вывод диагностических сообщений о выявленной неисправности, ее месте, возможных действиях оператора.

Окно вывода текущих данных. Выводятся в графическом виде данные, на основе которых программа делает различные диагностические выводы (изменение по времени общего уровня вибраций, спектральных составляющих по различным каналам, текущий спектр, осциллограмма, прочее). Для каждого отображаемого параметра на графике наносятся линии, соответствующие значениям “уставок” этого параметра (признака), что позволяет визуально оценить степень близости того или иного параметра (признака) к допустимому значению.

Окно подсказок. Предоставляет пользователю информацию о способах изменения режимов работы программы, а также об управлении программой. Основное содержимое этого окна составляет система вложенных меню, выбор пунктов которых осуществляется путём нажатия цифровых клавиш на клавиатуре, соответствующих требуемому пункту меню. Такая организация управлением позволяет достаточно просто, без необходимости запоминания большого количества различных сочетаний клавиш на клавиатуре достичь большого разнообразия в выборе различных режимов отображения программы.

Запись и сжатие данных, регистрируемых в процессе мониторинга в программе, осуществляется в четырёх вариантах - текущие данные, данные, регистрируемые раз в час, данные, регистрируемые раз в сутки и данные, которые записываются на жёсткий диск компьютера в случае, если на их основании программой был сделан вывод о неисправности диагностируемого агрегата.

Текущие данные, в отличие от других, хранятся только за последние несколько часов работы программы. Такая схема записи данных не позволяет базе данных разрастаться до размеров, которые могли бы превысить объём жёсткого диска компьютера. Данные записываются на жёсткий диск

компьютера отдельными блоками в разные файлы. Каждый блок данных – это осциллограммы, последовательно записанные по нескольким вибрационным каналам в течение одного обращения к плате АЦП. Процесс работы программы выглядит следующим образом - программа обращается к плате АЦП за порцией данных, далее проводится диагностика этих данных и затем цикл повторяется.

Величины предельных значений, используемых при оценке уровней составляющих вибраций, с помощью специальной программы заносятся в отдельный конфигурационный файл. Их значения при необходимости могут быть модифицированы в сторону уменьшения или увеличения в зависимости от конкретных особенностей данного агрегата или новых знаний о вибрационном поведении этого агрегата в предыдущем периоде его эксплуатации.

Другая программа позволяет вести настройку аппаратуры в соответствии с задействованными вибрационными каналами. Задаются тарировочные коэффициенты, частота дискретизации, размер реализации, по которой вычисляется спектр, тип вибрационного сигнала (виброперемещение, виброскорость, виброускорение) и т.д.

Разработанный программный комплекс имеет достаточно важное отличие от других систем подобного назначения по алгоритму вычисления спектра. Для расчёта спектральных характеристик исходного вибрационного сигнала применяется специальный уточняющий алгоритм [4]. Он позволяет существенно повысить точность спектральных оценок по сравнению с широко используемым в современных системах алгоритма быстрого преобразования Фурье. Несмотря на то, что уточняющий алгоритм уступает по скорости расчёта спектра алгоритму БПФ, условия, в которых производится мониторинг (длительная работа агрегата на практически неизменном режиме) позволили применить в программе для расчёта спектров уточняющий алгоритм без каких либо ограничений.

## **МОНИТОРИНГ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГТД**

В 1996 году на газоперекачивающей станции было установлено и практически непрерывно работало до конца 1999 года опытное программно – аппаратное обеспечение мониторинга вибрационного состояния ГТД ГПА – Ц16.

Программа работала в режиме непрерывного мониторинга составляющих вибраций по четырём датчикам, установленным в горизонтальном направлении на корпусе ГТД в разных местах : Гп – входной направляющий аппарат, Гз – промежуточный корпус, Гт – корпус турбины и Гст – силовая турбина. По каждому каналу кроме величины общего уровня производилась оценка следующего набора спектральных составляющих: три роторные составляющие (ротор низкого давления – П1, ротор высокого давления – П2, ротор силовой турбины – П3) и пять составляющих частот вращения сепараторов подшипников - межвального, межроторного, опоры турбины, опоры компрессора высокого давления, силовой турбины.

Контролю подвергались опорные узлы роторов, как наиболее нагруженные элементы конструкции, определяющие работоспособность машины. Среди многочисленных признаков состояния были выбраны гармоники сепараторов. Это объясняется следующими двумя причинами. Используемые датчики вибраций (низкочастотные сейсмометры типа МВ-25) и соответствующая аппаратура давала сигнал в ограниченной полосе частот до 250 Гц. Именно в этом диапазоне лежат частоты сепараторов. Вместе с тем гармоники сепараторов обладают достаточно хорошей информативностью о состоянии подшипников [4].

В процессе работы проводилась запись сигналов с последующей спектральной обработкой по уточненному алгоритму. Выделение соответствующих компонент велось в автоматическом режиме с использованием известных в литературе соотношений, позволяющих рассчитывать частоты деталей подшипников.

В процессе трехлетней эксплуатации комплекса на газоперекачивающем агрегате произошли две незапланированные остановки, причиной которых явилось разрушение межроторного подшипника (МРП) ГТД. В обоих этих случаях программный комплекс мониторинга вибрационного состояния зафиксировал наличие неисправностей в этом подшипнике на основе спектральной обработки вибрационного сигнала и выдал соответствующие предупреждения.

С целью выявления общей картины развития дефекта, а также определения возможности определения стадии его раннего развития была проведена обработка собранных и записанных данных. Обработка дала следующие результаты.

1) Спектральная составляющая сепаратора, будучи на протяжении всего периода мониторинга агрегата практически неотличима от уровня шума, в момент начала интенсивного развития дефекта значительно выросла по амплитуде и незадолго до момента разрушения превысила основные роторные гармониками агрегата, рис. 1, 2.

2) Как показано на рисунках, первые признаки выхода составляющей сепаратора из шума были отмечены за 10 с лишним часов до остановки агрегата, далее уровень этой составляющей на протяжении всего времени непрерывно возрастал, пока в течение последних нескольких минут резко не вырос до уровня 40 мм/сек. Последующая разборка узла подшипника показала его разрушение.

3) Появление из шума составляющей сепаратора при развитии дефекта МРП было отмечено практически по всем датчикам, но наиболее интенсивно этот процесс регистрировался на датчике, расположенном в районе турбины (Гт) - места наиболее близкого к узлу МРП.

4) Общие уровни вибраций по регистрируемым каналам практически никак не откликнулись на процесс развития дефекта в МРП, за исключением последних минут работы агрегата, рис. 3, 4.

5) Первая гармоника ротора низкого давления практически не имела какого-либо значимого тренда вплоть до последних минут работы агрегата, когда она всё же увеличила свою амплитуду более чем в два раза, рис. 5 и 6.

б) Для первой гармоники ротора высокого давления практически на всём периоде работы агрегата отмечалось непрерывное увеличение её уровня. Можно предположить, что это явилось одной из основных причин выхода из строя МРП, не выдержавшего непрерывно увеличивающейся нагрузки, рис. 7 и 8. Следует отметить резкое падение уровня составляющей за 4 минуты до полного останова двигателя.

## **ВЫВОДЫ**

Результаты, полученные в результате трехлетней непрерывной эксплуатации программного обеспечения позволили, сделать ряд конкретных выводов по применению системы мониторинга ГТД в составе газоперекачивающего агрегата.

1. Определены основные принципы и требования к программному обеспечению для проведения мониторинга вибрационного состояния ГТД в составе газоперекачивающих агрегатов.
2. В соответствии с основными требованиями и принципами построения систем вибрационной диагностики разработано соответствующее программное обеспечение. Более чем трехлетний опыт эксплуатации показал его высокую надежность, удобство в эксплуатации и эффективность применяемых алгоритмов обработки.
3. Непрерывный мониторинг вибрационного состояния ГТД в составе наземных установок является эффективным средством контроля и эксплуатации турбоагрегата по техническому состоянию.
4. Применение трендового анализа спектральных компонент с сепараторной частотой контролируемых подшипников позволило “увидеть” развивающийся дефект МРП за 8...10 часов до его полного разрушения, т.е. задолго до начала вторичных разрушений конструкции (разрушения других деталей).
5. Анализ составляющей ротора высокого давления показал наличие ее тренда уже за ~70 часов до полного останова машины и за ~60 часов до появления сепараторной частоты из шума. Специальные исследования показывают связь этого факта с износом подшипника, разбалансировкой ротора и увеличением динамической нагрузки на подшипнике. Этот признак может быть включен в систему диагностики для раннего предупреждения о наличии дефекта в узле МРП.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. В.А.Карасев, И.П.Максимов, М.К.Сидоренко. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей – М., Машиностроение, 1978. с. 132.
2. L. Enochson, G.Smith. Examples of Digital Data Analysis for Rotating Machinery. Presented at National Conference on Power Transmission. Philadelphia, Pennsylvania. 1978. GenRad, Application Note 13, pp. 7.
3. А.Ширман, А.Соловьев. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва, 1996.

4. А.В. Иванов, А.А. Дегтярев, Повышение точности измерения вибраций авиационных газотурбинных двигателей. Вестник Московского авиационного института, Т.6. №1. 1999, с. 32-36.



### Рисунки

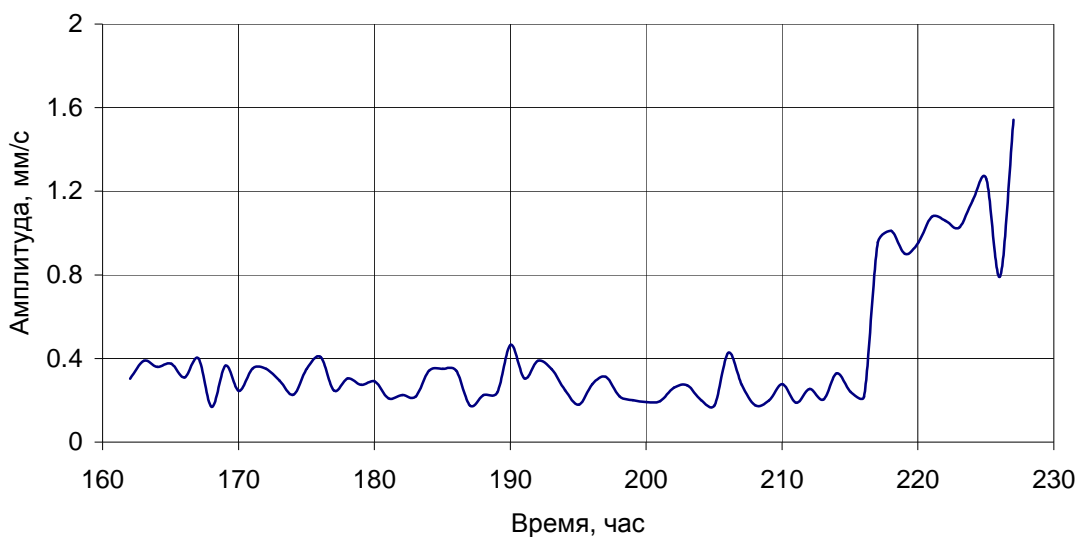


Рис. 1 Тренд составляющей сепаратора МРП по датчику Гт в течение последних 68 часов работы агрегата (без 4-х последних минут)

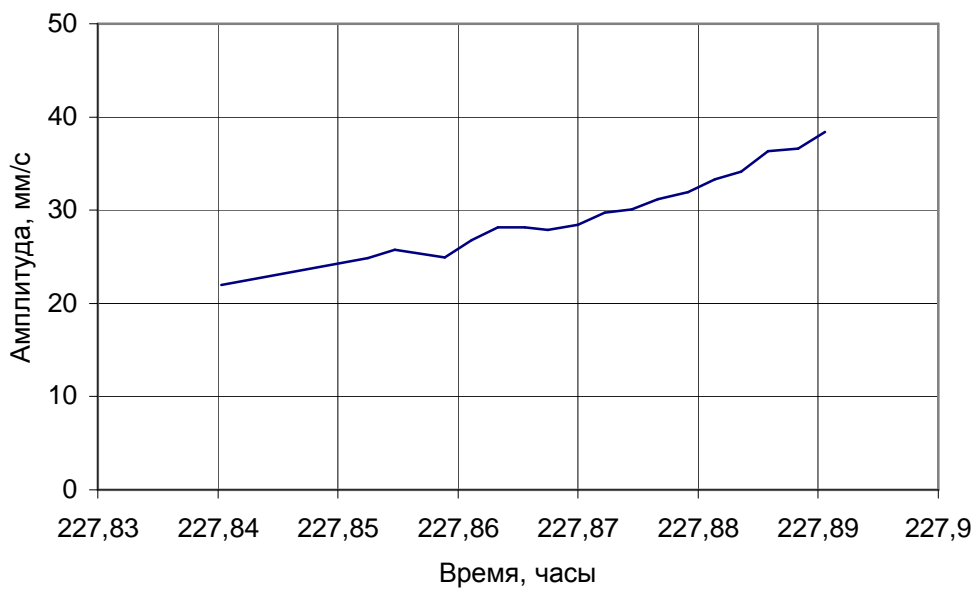


Рис. 2 Тренд составляющей сепаратора МРП по датчику Гт в течение последних 4 минут работы агрегата

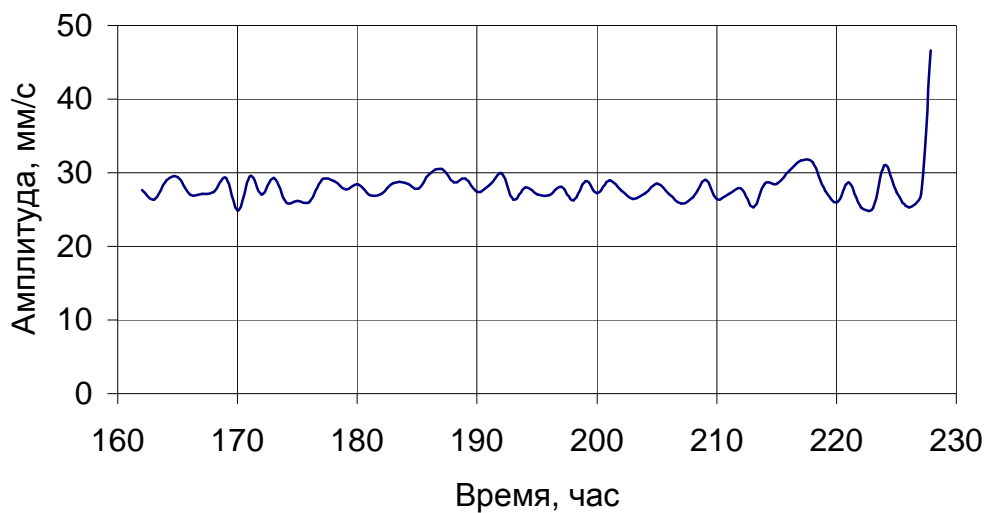


Рис. 3 Тренд общего уровня по датчику  $\Gamma_T$  в течение последних 68 часов работы агрегата (без последних 4-х минут)



Рис. 4 Тренд общего уровня по датчику  $\Gamma_T$  в течение последних 4 минут работы агрегата



Рис. 5 Тренд составляющей ротора низкого давления по датчику  $\Gamma_T$  в течение последних 68 часов работы агрегата

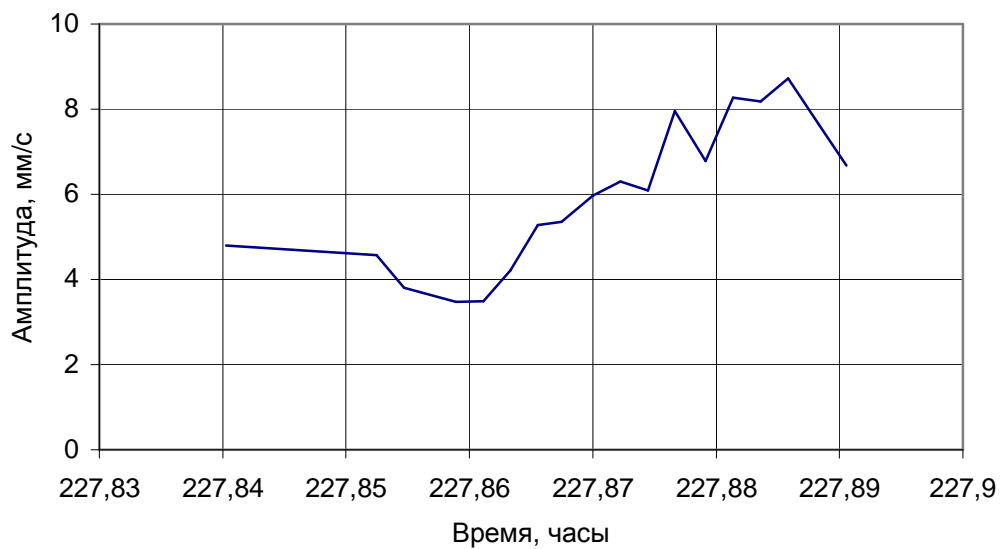


Рис. 6 Тренд составляющей ротора низкого давления по датчику  $\Gamma_T$  в течение последних 4 минут работы агрегата

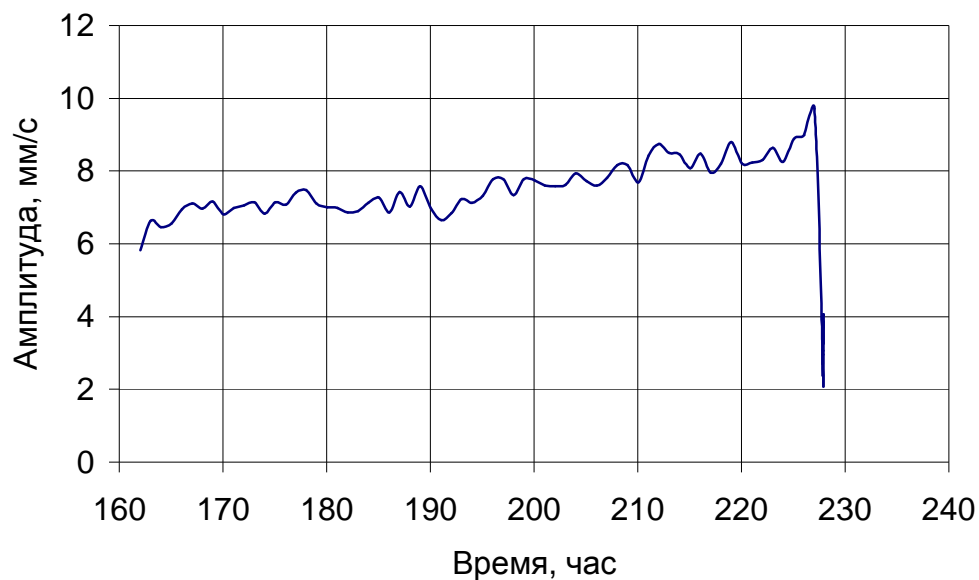


Рис. 7. Тренд составляющей ротора высокого давления по датчику  $\Gamma_T$  в течение последних 68 часов работы агрегата (включены последние 4 минуты работы до полного останова)

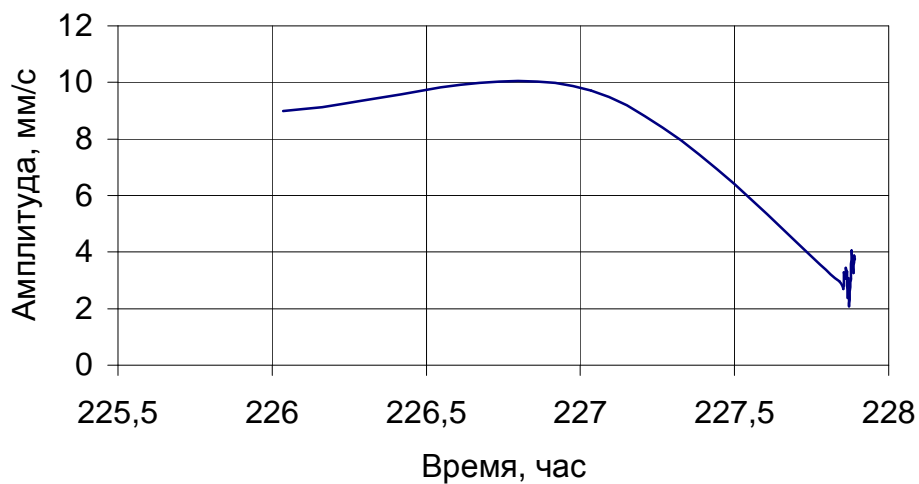


Рис. 8. Тренд составляющей ротора высокого давления по датчику  $\Gamma_T$  в течение последних 2 часов работы агрегата (включены последние 4 минуты)