

А.Г. ДОБРЯКОВ, А. А. ЗАЙЦЕВ

(ООО НПП «Вибробит», г. Ростов-на-Дону, Россия)

**РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
АСКВМ «ВИБРОБИТ 300» ДЛЯ ТУРБОАГРЕГАТА СТ.№9 ТЭЦ-22
ПАО «МОСЭНЕРГО»**

Во время реализации Автоматизированной Системы Контроля Вибрации и Механических величин (АСКВМ) «Вибробит 300» для теплофикационной паровой турбины типа Т-295/335-23,5 и генератора ТВВ-350 энергоблока ст. №9 ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» в 2016-2107 годах ООО НПП «Вибробит» выполнял разработку и изготовление подсистемы контроля Крутильных Колебаний валопровода (подсистема КК).

В качестве основного метода измерения крутильных колебаний в подсистеме контроля КК применяется дискретно-фазовый метод (ДФМ) [1]. Основой данного метода является измерение интервалов времени между метками, нанесенными на поверхности вращающегося вала.

Количество контрольно-измерительных плоскостей турбоагрегата, необходимых для регистрации параметров КК, выбиралось на основе анализа собственных форм колебаний валопровода, полученных в результате расчетных исследований и моделирования валопровода турбоагрегата в специализированных программных продуктах, выполненных инженерами ЗАО «УТЗ» и предоставленных ООО НПП «Вибробит».

В каждой контрольно-измерительной плоскости устанавливается 2 бесконтактных вихретоковых датчика (под 90° друг к другу), выходные сигналы которых обеспечивают:

- регистрацию интервалов времени между метками, нанесенными на поверхности вращающегося вала, являющихся основой расчета параметров крутильных колебаний;
- измерения параметров относительной вибрации вала (биений), синхронизированных с регистрацией интервалов времени прохождения меток и используемых для вычленения вклада поперечных/продольных колебаний в результаты расчета крутильных колебаний.

Организация измерений в распределенных вдоль оси валопровода выбранных сечениях обеспечивает регистрацию параметров крутильных колебаний валопровода с учетом всех его собственных форм в диапазоне частот от 0 до 200 Гц.

Структура подсистемы КК

Подсистема КК содержит 12 каналов измерения крутильных колебаний для шести плоскостей измерения. В каждой плоскости измерения КК устанавливается по два датчика со взаимно перпендикулярным размещением.

Плоскость контроля КК представляет собой поверхность вращения с размещенной на ней 16-ю метками, имеющие одинаковые механические характеристики (длину, шаг, высоту).

Перечень каналов измерения и размещение датчиков подсистемы КК на турбоагрегате представлено в таблице 1.

Один канала опорного сигнала (ОС), фазовая метка, предназначен для синхронизации измерений крутильных колебаний.

В состав подсистемы КК входит модуль синхронизации МК65 и шесть модулей измерения крутильных колебаний МК62. Структурная схема подсистемы крутильных колебаний представлена на рисунке 1.

Модуль контроля МК65 предназначен для измерения частоты вращения ротора, передачи сигнала синхронизации на модули МК62 по внутренней линии платы ПС11.

Модули МК62 измеряют размах КК по плоскостям контрольной поверхности (КП), размах КК по узлам контролируемого агрегата.

При правильной настройке и исправности каналов измерения показания размаха крутильных колебаний по датчикам, установленным слева и справа относительно вертикальной плоскости, совпадают (расхождение не превышает 10%).

В подсистема КК вычисляются следующие параметры:

- По каждому каналу измерения КК
 - Постоянный ток датчика
 - Частота вращения контрольной поверхности (КП)
 - Зазор между датчиком и КП
 - Размах виброперемещения КП
 - Размах угла крутильных колебаний
 - Статический угол закрутки

- Спектр крутильных колебаний
- Размах и спектр угла крутильных колебаний узлов турбоустановки и генератора (в двух плоскостях)
 - Ротор высокого давления (РВД)
 - Ротор среднего давления №1 (РСД1)
 - Ротор среднего давления №2 (РСД2)
 - Ротор низкого давления (РНД)
 - Ротор генератора (РГ)
 - Валопровод ТГ

Результаты вычислений параметров крутильных колебаний валопровода (углы закрутки, спектры и т. д.) передаются в ПО ИСВМ «Вибробит Web.Net.Monitoring» и представляются данными системы мониторинга вибрационного и механического состояния турбоагрегата в АСКВМ «Вибробит 300».

Таблица 1

Перечень каналов измерения, места установки датчиков подсистемы КК

| KKS | Код | Место установки | Ориентация датчика | Канал измерения основной | Канал измерения дополнит. |
|--------------|-------|---------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| 10MAD01CY009 | КК 1L | Свободный конец РВД | -45° левый | М2 - МК62 - 1 | М7 - МК62 - 3 |
| 10MAD01CY010 | КК 1R | Свободный конец РВД | +45° правый | М2 - МК62 - 2 | М7 - МК62 - 4 |
| 10MAD02CY010 | КК 2L | Муфта РВД-РСД1 | -45° левый | М3 - МК62 - 1 | М2 - МК62 - 3 |
| 10MAD02CY011 | КК 2R | Муфта РВД-РСД1 | +45° правый | М3 - МК62 - 2 | М2 - МК62 - 4 |
| 10MAD03CY008 | КК 3L | Муфта РСД1-РСД2 | -45° левый | М4 - МК62 - 1 | М3 - МК62 - 3 |
| 10MAD03CY009 | КК 3R | Муфта РСД1-РСД2 | +45° правый | М4 - МК62 - 2 | М3 - МК62 - 4 |
| 10MAD05CY008 | КК 4L | Муфта РСД2-РНД | -45° левый | М5 - МК62 - 1 | М4 - МК62 - 3 |
| 10MAD05CY009 | КК 4R | Муфта РСД2-РНД | +45° правый | М5 - МК62 - 2 | М4 - МК62 - 4 |
| 10MAD07CY008 | КК 5L | Муфта РНД-РГ | -45° левый | М6 - МК62 - 1 | М5 - МК62 - 3 |
| 10MAD07CY009 | КК 5R | Муфта РНД-РГ | +45° правый | М6 - МК62 - 2 | М5 - МК62 - 4 |
| 10MKD02CY006 | КК 6L | Свободный конец РГ | -45° левый | М7 - МК62 - 1 | М6 - МК62 - 3 |
| 10MKD02CY007 | КК 6R | Свободный конец РГ | +45° правый | М7 - МК62 - 2 | М6 - МК62 - 4 |
| 10MAD07CY010 | ОС С1 | Муфта РНД-РГ | -45° | М1 - МК65 - 1 | нет |

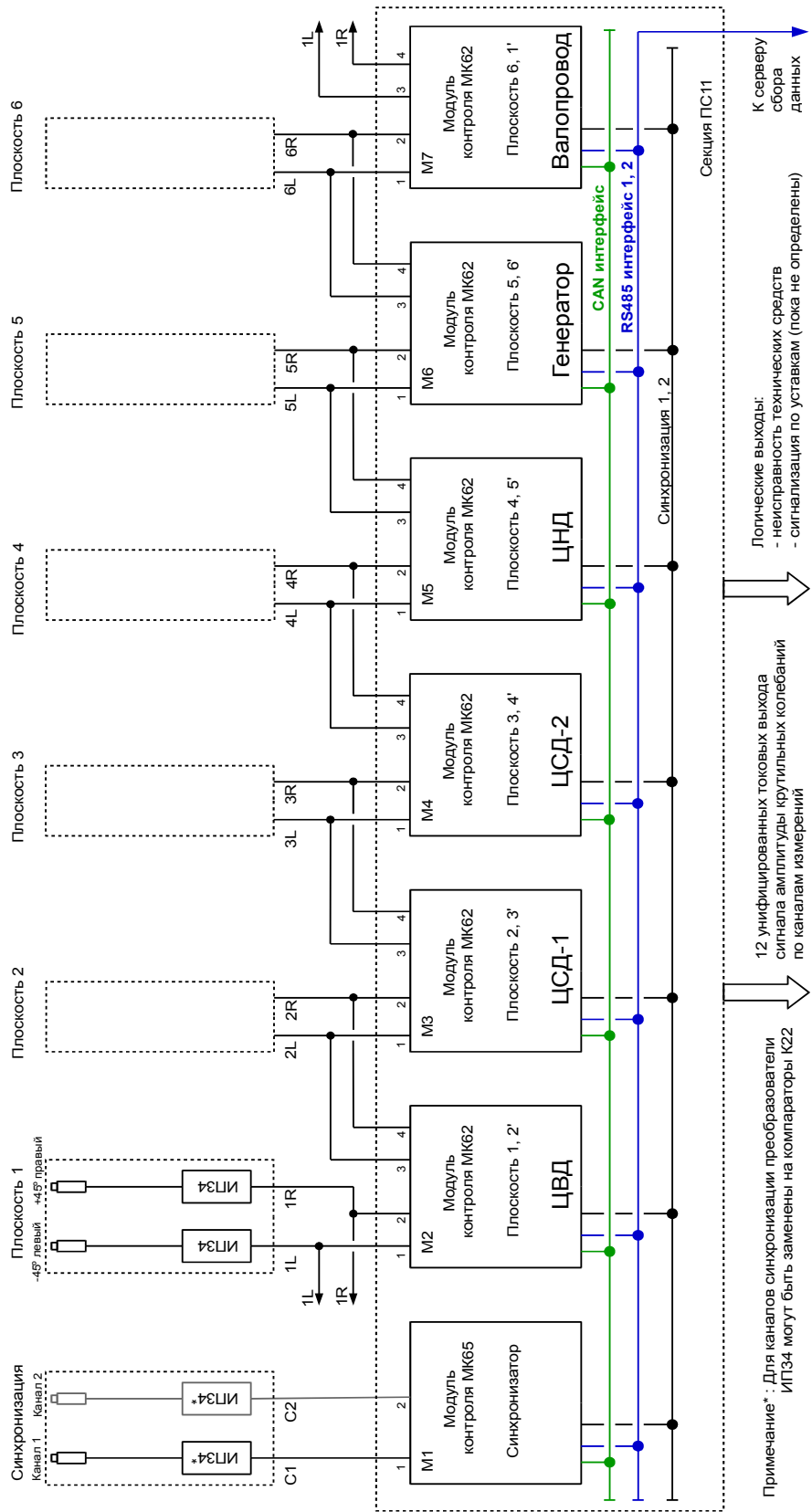


Рис. 1. Структурная схема подсистемы крутильных колебаний

Модуль контроля МК62

Модуль контроля МК62, из состава аппаратуры «Вибробит 300», предназначен для измерения размаха крутильных колебаний, возникающих в роторах турбоагрегатов, насосов и другого роторного оборудования.

В основе МК62 лежит высокопроизводительный 32-разрядный микропроцессор цифровой обработки сигналов (ЦОС), позволяющий реализовать сложные математические вычисления, обеспечить доступ к результатам измерений по интерфейсам связи RS485, CAN2.0B, USB. Модуль МК62 передает результаты измерений на унифицированные токовые выходы, сравнивает результаты измерений с уставками, формирует предупредительную и аварийную сигнализацию на логических выходах.

Основными функциями 4-х канального модуля МК62 являются:

- Измерение размаха крутильных колебаний
 - Управляемый компаратор выделения импульсов
 - Измерение и контроль частоты вращения контрольной поверхности (КП)
 - Измерение относительного виброперемещения и зазора до КП
 - Компенсация неточности механической обработки меток КП по длине и высоте
 - Компенсация вибрации КП в поперечной и продольной плоскости (относительно датчика)
 - Расчет спектра размаха крутильных колебаний
 - Расчет результирующего размаха крутильных колебаний (виртуальные каналы измерения)
- Измерение статического угла скручивания ротора относительно фазовой метки
- Контроль исправности канала измерения
- Синхронизация измерений по двум каналам (фазовая метка)
- Передача вычисленных значений на унифицированные токовые выходы
- Сравнение вычисленных значений с уставками
- Формирование предупредительной и аварийной сигнализации
- Поддержка цифровых интерфейсов RS485, CAN2.0B
- Вывод данных на ЖКИ модуля

Основные характеристики модуля МК62 представлены в таблицах 2-5.

Модуль контроля МК65

Модуль контроля МК65, из состава аппаратуры «Вибробит 300», предназначен для синхронизации измерения размаха крутильных колебаний модулями МК62.

Основными функциями 4-х канального модуля МК65 являются:

- Измерение частоты вращения
 - Управляемый компаратор выделения импульсов
 - Измерение и контроль частоты вращения ротора
 - Измерение зазора до КП
 - Расчет угла компенсации фазового сигнала
- Контроль исправности канала измерения
- Передача вычисленных значений на унифицированные токовые выходы
- Сравнение вычисленных значений с уставками
- Формирование предупредительной и аварийной сигнализации
- Поддержка цифровых интерфейсов RS485, CAN2.0B
- Вывод данных на графический ЖКИ модуля

Таблица 2.

Параметры измерения частоты вращения ротора модулем МК62

| Наименование параметра | Значение |
|---|--------------|
| Диапазон измерения частоты вращения ротора (от и до включ.), об/мин | 0,1 – 12 000 |
| Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения частоты вращения ротора по цифровому индикатору, об/мин, не более | ± 0,5 |
| Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения частоты вращения ротора по унифицированному выходу, %, не более | ± 1,0 |
| Число импульсов на один оборот ротора, КП | от 1 до 64 |
| Период измерения частоты вращения ротора (от и до включ.), сек | 0,1 – 10 |

Таблица 3.

Параметры измерения размаха относительного виброперемещения модулем МК62

| Наименование параметра | Значение |
|---|------------------------|
| Диапазон измерения и сигнализации размаха относительного виброперемещения, мкм <ul style="list-style-type: none"> • Датчик ДВТ10 • Датчик ДВТ20 | 10 – 1000 20 – 2000 |
| Диапазон частот измерения (от и до включ.), оборотных составляющих | 1/16 – 4 |
| Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения на базовой частоте по дисплею и унифицированному выходу, % | ±2,0 |
| Количество настраиваемых дополнительных частотных зон измерения | 2 |
| Измерение статического зазора между датчиком и контрольной поверхностью | Да |

Таблица 4.

Параметры измерения размаха крутильных колебаний модулем МК62

| Наименование параметра | Значение |
|--|-----------------------------|
| Диапазон измерения и сигнализации, гр | 0,01 - 1,99 |
| Дискретность измерений, гр | 0,001 |
| Диапазон частот измерения (от и до включ.), оборотных составляющих | 1/8 – 4 |
| Диапазон измерения фазы синусоидального сигнала (от и до включ.), гр. | 0 – 360 |
| Базовая частота измерения, номер оборотной составляющей | 1 |
| Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в диапазонах частот, % | ±5,0 |
| Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения на базовой частоте по дисплею и унифицированному выходу, % | ±5,0 |
| Спектральное разрешение измерения оборотных составляющих | 1/32 оборотной составляющей |
| Период обновления результатов измерений, сек | 0,25 |
| Период измерений, оборотов ротора | 32 |
| Предельный диапазон частоты вращения КП, об/мин | 10 – 12 000 |
| Число меток КП | от 1 до 64 |
| Частота тактового генератора, МГц | 100 |
| Стабильность тактового генератора во всем диапазоне рабочих температур, не хуже | 25 ppm |
| Коэффициент деления частоты тактового генератора (характеристика микропроцессора) | 4 |

Таблица 5.

Параметры измерения статического угла закрутки модулем МК62

| Наименование параметра | Значение |
|--|------------------------------|
| Диапазон измерения и сигнализации фазы первой метки КП относительно сигнала синхронизации, гр | $\pm 360 / N^{1)}$ |
| Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения фазы первой метки по цифровому индикатору, гр, не более | $\pm 2,0$ |
| Дискретность измерений фазы, гр | 0,001 |
| Диапазон частот измерения (от и до включ.), об/мин | В соответствии с настройкой |
| Диапазон измерения угла статической закрутки, гр | не нормируется ²⁾ |
| Период обновления результатов измерений, сек | 0,25 |

Примечания:

1. Где N - число измерительных меток на контрольной поверхности
2. Является разницей фазы первой метки КП ниже и выше установленной частоты вращения КП.

Конструкция модулей МК62, МК65

Конструктивно модули МК62, МК65 выполнен в виде модуля 3U для каркасов блочных 19". Структурная схема модулей МК62, МК65 представлена на рисунке 2. В основе модулей лежит 32-разрядный микропроцессор типа PIC32, содержащий в своем составе:

- 12-разрядный АЦП
- Аппаратные счетчики и регистры захвата по внешнему сигналу
- Последовательные интерфейсы SPI, I2C, USB, UART
- ОЗУ 512кБ

Модули поддерживает 4 независимых измерительных канала. Для каждого канала измерения выделяются тахометрические импульсы (с помощью настраиваемого компаратора) и мгновенный аналоговый сигнал (фильтры НЧ), предназначенный для определения относительной вибрации контрольной поверхности.

Входная схема выбора импульсов синхронизации определяет, какой из каналов синхронизации использовать в вычислениях крутильных колебаний.

Установленные в модуле драйверы последовательных интерфейсов позволяют осуществлять обмен по интерфейсам CAN (обмен данными между модулями измерения КК), RS485 (подключение к серверу сбора данных АСКВМ).

На буферы гальванически изолированных токовых выходов могут выдаваться

измеряемые параметры (определяется настройкой модулей), пропорциональные току 4-20мА.

Логические выходы предназначены для формирования сигнала неисправности, сигнализации по уставкам (если уставки потребуются в канале измерения КК).

Результаты измерений отображаются на ЖКИ модулей.

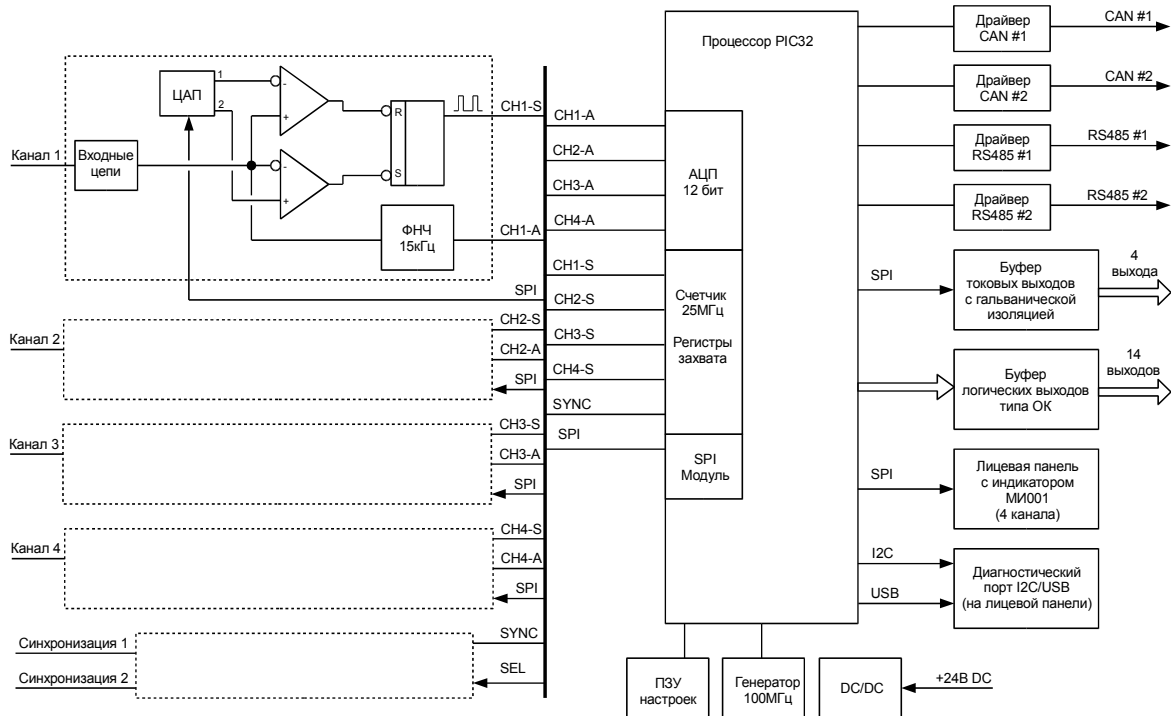


Рис. 2. Структурная схема модулей МК62, МК65

Принципы измерений

Структурная схема расчета размаха крутильных колебаний представлена на рисунке 3.

Дополнительно к измерению размаха крутильных колебаний физических каналов производятся расчеты следующих параметров:

- Частота вращения КП
- Размах виброперемещения КП
- Статический зазор между датчиком и КП
- Фаза первой метки КП относительно синхросигнала (фазовой метки)
- Статической угол закрутки КП (относительно синхросигнала)
- Размах крутильных колебаний виртуальных каналов (КК узла агрегата)

Счет временных интервалов выполняет 32-разрядный счетчик (1.1), тактируемый сигналом от внешнего стабильного генератора 100МГц. Тактовый сигнал 100МГц делится на 4 аппаратным счетчиком микропроцессора, период переполнения счетчика более 180 секунд.

От входного каскада канала измерения (компаратора) логические импульсы меток КП поступают в схему захвата и накопления значений счетчика (1.2). Логические импульсы меток КП синхронизируют накопление значений АЦП (2.1) для каждой метки КП с целью вычисления мгновенных зазоров между датчиком и КП.

Относительно синхросигнала (фазовая метка) производится определение первой метки КП (3.1). На основании абсолютных значений счетчика (1.1) активного фронта первой метки КП и активного фронта синхросигнала выполняется расчет фазового угла и угла статической закрутки КП (3.2). Статическая закрутка определяется относительно значений получаемых на малых оборотах ротора (отсутствие крутильных колебаний, статической закрутки) и рабочим режимом контролируемого агрегата.

По полученным значениям АЦП между датчиком и метками КП вычисляется зазор для каждой метки КП (2.2). С целью достоверного выполнения компенсации КК и вычисления размаха виброперемещения производится компенсация неточности обработки КП по высоте меток (2.3). После компенсации неточности обработки КП по высоте меток рассчитываются (2.4) размах виброперемещения КП и статический зазор между датчиком и КП.

Истинные зазоры между метками КП используются для проведения компенсации измерения КК вызванные влиянием относительного виброперемещения КП в продольной плоскости относительно (1.3) датчика измерений.

Абсолютные значения счетчика пересчитываются в мгновенные частоты вращения КП для каждой метки (1.4), операция дифференцирования.

Мгновенная частота вращения для каждой метки КП (угловая скорость), пропорциональная длине меток КП по активным фронтам, подвергается компенсации неточности механической обработки КП по длине меток (1.5).

После выполнения компенсаций неточности обработки КП проводится расчет частоты вращения КП (1.6), проверка стабильности частоты вращения и соответствия частоты вращения допустимому диапазону частот для измерения КК.

На достоверность вычисления размаха крутильных колебаний также оказывает

влияние относительное виброперемещение ротора в поперечной плоскости к оси датчика измерений. Компенсация поперечной вибрации КП (1.7) проводится с учетом зазоров до меток КП, полученных комплементарным каналом измерения с учетом разницы установочных углов между датчиками.

Выборка скомпенсированных мгновенных значений угловой скорости по меткам КП подвергается интегрированию (1.8) до углового мгновенного перемещения.

Для получения спектра крутильных колебаний на выборку углового перемещения (за 32 оборота ротора) накладывается окно Хемминга (1.9), с целью предотвращения «растекания» спектра, выполняется БПФ 9-го порядка.

Наложение окна Хемминга на выборку углового перемещения вызывает затухание размаха КК на высоких частотах (выше 2-й оборотной частоты вращения КП), поэтому необходимо выполнять коррекцию АЧХ (1.10).

Спектр КК ограничивается установленным частотным диапазоном и подвергается преобразованию в сигнал (восстановление) методом обратного БПФ 8-го порядка (1.11). По восстановленному сигналу вычисляется размах КК физических каналов измерения (1.12).

Для расчета размаха КК конкретного узла агрегата существует возможность настройки виртуальных каналов измерения, в которых выполняется операции сложения (вычитания) спектров физических каналов в комплексном виде (5.1). Из результирующей спектра виртуального канала восстанавливается сигнал методом обратного БПФ 8-го порядка (5.2). По восстановленному сигналу вычисляется размах КК виртуального канала измерения (5.3).

Доступен захват спектра со спектральным разрешением $1/32$ оборотной составляющей (для частоты вращения 50Гц - спектральное разрешение 1,5625Гц) после коррекции АЧХ (4.1). Доступно 128 спектральных линий для проведения анализа, верхняя частота анализа 200Гц (для частоты вращения 50Гц) в размерности СКЗ (4.2).

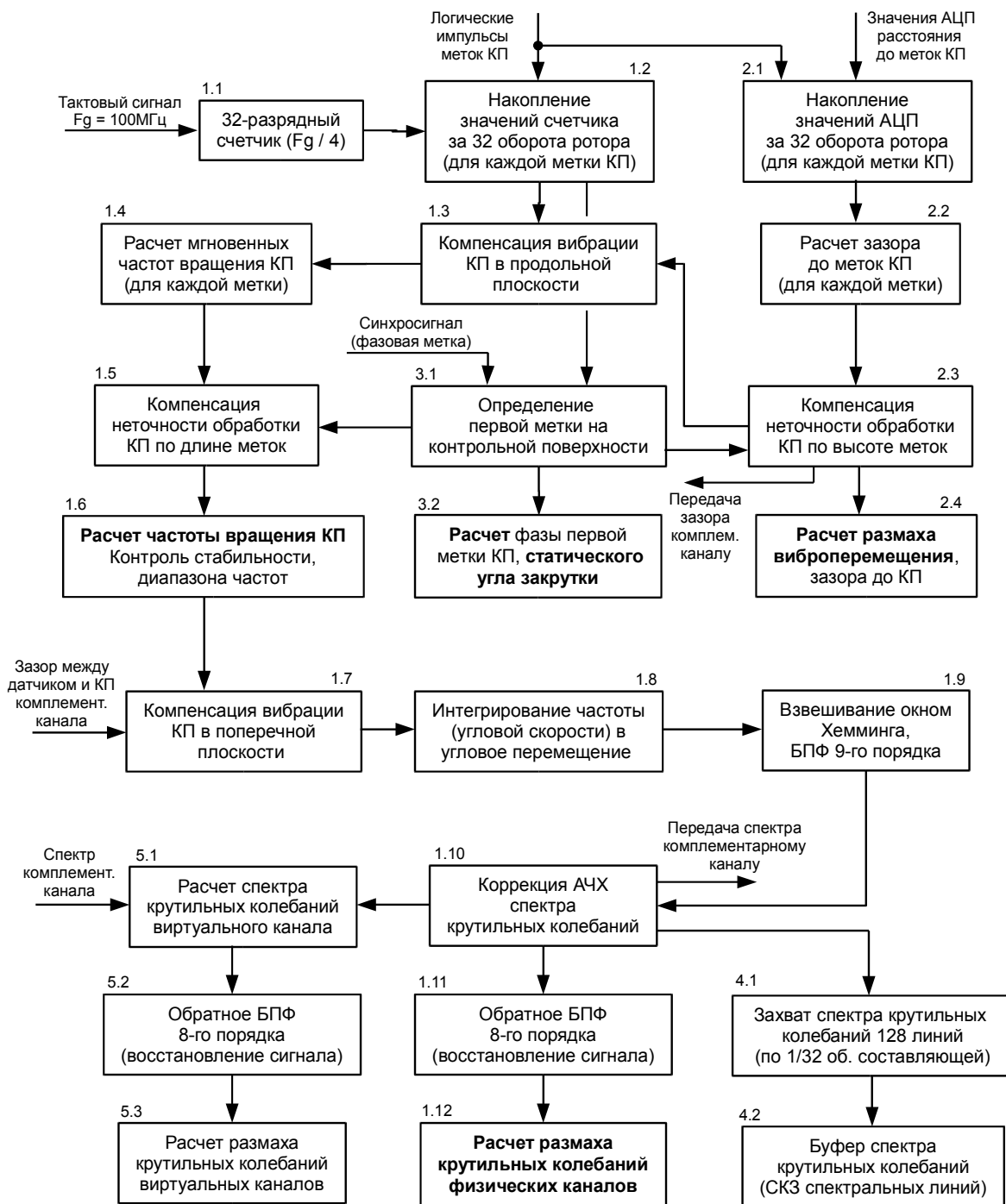


Рис. 3. Структурная схема вычисления крутильных колебаний

Методика расчета размах КК

Для проверки достоверности измерения размаха крутильных колебаний модулем МК62 возможно применение лабораторного генератора, поддерживающего частотную модуляцию генерируемого сигнала.

Исходные расчетные данные:

- Рабочая частота вращения КП ($F_{РАБ}$).....50Гц
- Число меток на КП (N).....16
- Фактическая частота тактового генератора ($F_{ГЕН}$).....25МГц

Частота следования импульсов ($F_{ИМП}$) от КП на рабочей частоте вращения ротора ($F_{РАБ}$) рассчитывается по формуле:

$$F_{ИМП} = F_{РАБ} \cdot N = 50 \text{Гц} \cdot 16 = 800 \text{Гц} \quad (1)$$

Угловое разрешение ($AG_{РАЗР}$) в градусах, с учетом частоты тактового генератора ($F_{ГЕН}$) и частоты вращения ротора ($F_{РАБ}$) можно вычислить по формуле:

$$AG_{РАЗР} = \frac{F_{РАБ} \cdot 360 \text{гр}}{F_{ГЕН}} = \frac{50 \text{Гц} \cdot 360 \text{гр}}{25 \text{МГц}} = 0,00072 \text{гр} \quad (2)$$

Дискретность измерения угла КК составляет 0,00072гр, что удовлетворяет требованиям отображения с дискретностью 0,001 гр. Кроме того, примененные методы ЦОС расширяют динамический диапазон измерения (в сторону повышения точности) примерно в 4 раза.

Крутильные колебания контрольной поверхности фактически представляют собой частотную модуляцию тахометрического сигнала, поступающего от меток контрольной поверхности при стационарной частоте вращения ротора контролируемого агрегата.

Исходные данные настройки канала генератора (по частоте), в качестве примера:

- Частота несущего сигнала (равна $F_{ИМП}$).....800Гц
- Частота модуляции ($FM_{МОД}$), определяет частоту крутильных колебаний. 12,5Гц
- Глубина модуляции ($FM_{ГЛУБ}$), определяет амплитуду крутильных колебаний
.....1,0Гц
- Форма модуляции.....синусоидальная

Минимальная частота импульсов КП:

$$FP_{\text{МИН}} = F_{\text{ИМП}} - FM_{\text{ГЛУБ}} = 800 \text{ Гц} - 1 \text{ Гц} = 799 \text{ Гц}$$

Максимальная частота импульсов КП:

$$FP_{\text{МАКС}} = F_{\text{ИМП}} + FM_{\text{ГЛУБ}} = 800 \text{ Гц} + 1 \text{ Гц} = 801 \text{ Гц}$$

Размах угловой скорости крутильных колебаний (AV_{PP}) рассчитывается по формуле:

$$AV_{PP} = F_{\text{ГЕН}} \cdot \left(\frac{1}{F_{\text{МИН}}} - \frac{1}{F_{\text{МАКС}}} \right) \cdot AG_{\text{РАЗР}} \quad (3)$$

$$AV_{PP} = 25 \text{ МГц} \cdot \left(\frac{1}{799 \text{ Гц}} - \frac{1}{801 \text{ Гц}} \right) \cdot 0,00072 \text{ гр} = 0,05625 \text{ гр/оборот}$$

Т.к. вычисления размаха крутильных колебаний проводятся относительно оборота ротора, размерность угловой скорости (AV_{PP}) тоже представлена в отношении к обороту ротора. Частоту модуляции ($FM_{\text{МОД}}$) необходимо привести к размерности частоты вращения ротора ($FM_{\text{ОБОР}}$) с учетом числа меток на КП.

$$FM_{\text{ОБОР}} = \frac{FM_{\text{МОД}}}{F_{\text{ИМП}}} = \frac{12,5 \text{ Гц}}{800 \text{ Гц}} = 0,015625 \text{ обор}^{-1} \quad (4)$$

Расчет размаха углового перемещения (AS_{PP}) из размаха угловой скорости (AV_{PP}) для гармонической формы модуляции выполняется по формуле (интегрирование):

$$AS_{PP} = \frac{AV_{PP}}{2\pi \cdot FM_{\text{ОБОР}}} = \frac{0,05625 \text{ гр/оборот}}{2\pi \cdot 0,015625 \text{ обор}^{-1}} = 0,5729 \text{ гр} \quad (5)$$

Для представленных исходных данных размах углового перемещения крутильных колебаний (AS_{PP}) составляет 0,5729гр. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными при работе модуля МК62 с генератором и с испытательным стендом.

Выделение логических импульсов меток КП (компаратор)

Выделение логических импульсов от меток КП осуществляется с помощью управляемого компаратора, в котором настраиваются уровни переключения (в размерности зазора между датчиком и КП) логического '0' и логической '1'. Логический сигнал после компаратора подается в схему защелкивания значения тактового счетчика по установленному активному фронту.

Для выделения логических импульсов меток КП и измерения КК настраиваются следующие параметры:

- Число импульсов (меток КП) на один оборот ротора (от 1 до 64)
- Активный фронт (от паза к выступу; от выступа к пазу)
- Уровень переключения логического '0', логической '1' в мкм
- Граничные частоты вращения ротора

Во время движения КП относительно датчика, выходной сигнал датчика можно условно разбить на четыре зоны (рисунок 4):

- Зона, когда расстояние между КП и датчиком находится за диапазоном чувствительности датчика (датчик находится над пазом КП)
- Зона переключения в логический '0', когда канал измерения переходит из состояния насыщения в нормальный режим работы (переход от паза к выступу КП)
- Зона измерения зазора до КП, канал измерения в линейном режиме (датчик находится над выступом КП)
- Зона переключения в логическую '1', когда канал измерения переходит из линейного режима в состояние насыщения (переход от выступа к пазу КП)

Уровни переключения компаратора необходимо выбирать таким образом, чтобы предотвратить появление ложных логических импульсов в следствии шумов в канале измерения и вибрации КП. Разница между уровнями переключения логической '1' и логического '0' должна составлять не менее 200мкм (10% диапазона измерения зазора).

Рекомендуется выбирать в качестве активного фронта логического сигнала переход канала измерения из линейного режима в режим насыщения (переход КП от выступа к пазу), т. к. работа канала измерения в данном режиме более повторяема и менее зависима от внешних факторов.

С целью достоверного измерения крутильных колебаний рекомендуется устанавливать узкий диапазон частоты вращения КП, в которой производится измерение КК (как правило - незначительные отклонения от рабочей частоты вращения ротора контролируемого агрегата).

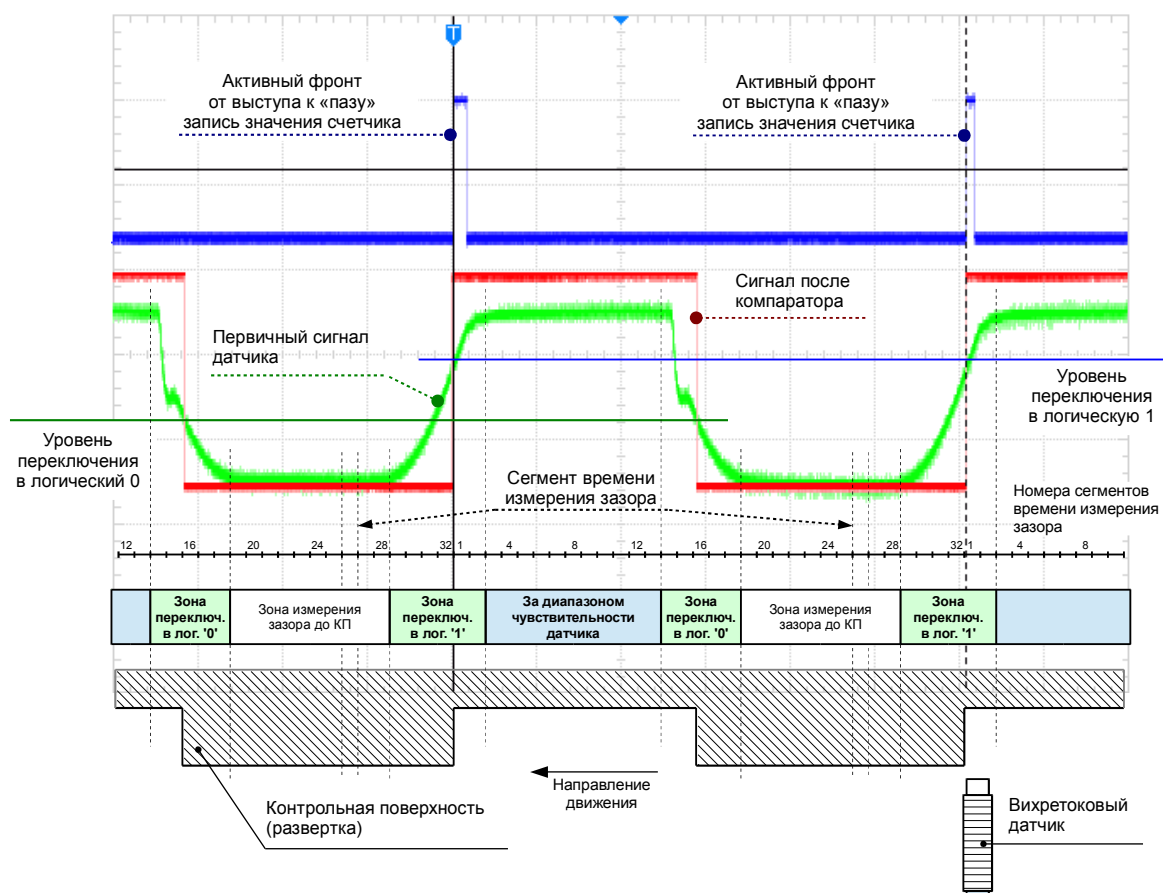


Рис. 4. Выделение логических импульсов из первичного сигнала датчика, измерение зазора между датчиком и КП

Относительное виброперемещение КП

Радиальное перемещение КП относительно датчика КК вносит ошибку в значение тактового счетчика, сохраняемого по активному фронту логического сигнала. Смещение значения тактового счетчика связано с фактическим смещением фазы переключения компаратора. Перемещение КП вдоль оси датчика, эквивалентно (с некоторым коэффициентом) вращению КП в зонах переключения логических уровней компаратором (рисунок 4).

Периодическое колебание КП будет проявляться в виде ошибочных значений размаха крутильных колебаний. Чем меньше диаметр КП, тем больше влияние относительного виброперемещения КП.

Статическое смещение КП (всплытие) создаст постоянное смещение фазы переключения компаратора, и на размах крутильных колебаний влияние не оказывает.

Для учета относительного виброперемещения КП при вычислении размаха КК

необходимо знать фактический зазор между выступом метки КП и датчиком КК.

Т.к. конструкция КП подразумевает наличие периодических пазов (меток) прямые измерения зазора (накопление выборок за несколько оборотов ротора) невозможны. В модуле МК62 реализовано два метода измерения расстояния до меток КП (рисунок 4):

- Минимальное значение зазора, зафиксированное между активными фронтами логического сигнала
- Определение сегмента (фазы) измерения

В настройках модуля МК62 предусмотрен параметр «Фаза выборки АЦП для измерения зазора». Весь интервал времени между активными фронтами логического сигнала (между метками КП) разбит на 32 сегмента. Рекомендуется выбирать сегмент, наиболее близкий к фронту переключения логического уровня, в зоне линейного режима работы канала измерения (зона измерения зазора до КП). На представленном на рисунке 4 примере, значение фазы выборки АЦП для измерения зазора равно 26.

Данные зазора для каждой КП метки синхронизированы со значением тактового счетчика, записанного по активному фронту логического сигнала от меток КП. Вычисление реального зазора до КП (всплытия) и размаха относительного виброперемещения КП выполняется за 32 оборота КП.

Компенсация неточности обработки меток КП по высоте

В следствии неточности обработки КП по высоте меток могут проявляться следующие ошибки:

- Недостовверное вычисление размаха относительного виброперемещения КП (наличие постоянной величины, даже при отсутствии вибрации)
- Недостовверная компенсация относительной вибрации КП в продольной и поперечной плоскостях

Компенсация неточности обработки меток КП по высоте выполняется только при наличии синхросигнала, определения первой метки в последовательности данных.

Компенсация неточности обработки КП по высоте меток проводится в следующей последовательности:

1. Вычисляется фактический зазор между датчиком и каждой меткой КП
2. Вычисляется отклонение от среднего значения введенных данных зазора/высоты меток КП

3. Значение отклонений добавляются (вычитаются) к фактическому зазору по каждой метки КП с учетом определения первой метки в выборке данных

В модуле МК62 предусмотрено измерение фактических расстояний до меток КП и команда автоматического копирования результатов измерений в регистры настройки механической характеристики КП.

Компенсация неточности обработки КП по длине меток

Неточность обработки КП по длине меток может вызывать ложную девиацию размаха угловой скорости, повторяющуюся каждый оборот КП и синхронно с первой (условно) меткой КП.

Компенсация неточности обработки КП по длине меток проводится после расчета размаха мгновенных угловых скоростей, и до вычисления частоты вращения КП, контроля стабильности частоты вращения КП.

Компенсация неточности обработки меток КП по длине должна быть включена в настройках модуля, и выполняется только при наличии синхросигнала, определения первой метки в последовательности данных.

В ПО модуля МК62 предусмотрен расчет длины меток КП в мкм (расстояние между активными фронтами по логическому сигналу) с учетом: диаметра КП, частоты вращения КП, частоты тактового генератора (рисунок 5).

| | Длина, мкм | Высота, мкм |
|----------|------------|-------------|
| Метка 1 | 98 199 | 385 |
| Метка 2 | 98 199 | 383 |
| Метка 3 | 98 186 | 387 |
| Метка 4 | 98 164 | 386 |
| Метка 5 | 98 152 | 384 |
| Метка 6 | 98 152 | 391 |
| Метка 7 | 98 168 | 385 |
| Метка 8 | 98 186 | 385 |
| Метка 9 | 98 202 | 386 |
| Метка 10 | 98 199 | 385 |
| Метка 11 | 98 186 | 387 |
| Метка 12 | 98 164 | 384 |
| Метка 13 | 98 152 | 383 |
| Метка 14 | 98 152 | 382 |
| Метка 15 | 98 168 | 387 |
| Метка 16 | 98 186 | 382 |

Рис. 5. Пример отображения результатов измерения длины, высоты меток КП канала измерения #01 в ПО ModuleConfigurator

Компенсация неточности обработки КП по высоте меток проводится в следующей последовательности:

1. Вычисляется отклонение от среднего значения введенных данных длины меток КП
2. Значение относительного отклонения умножаются на угловую скорость каждой метки КП с учетом определения первой метки в выборке данных

В модуле МК62 предусмотрен контроль работы алгоритма компенсации неточности обработки КП по длине меток с расчетом СКЗ отклонения от средней длины до и после компенсации (рисунок 6)

| | 01. Канал #1 | 02. Канал #2 | 03. Канал #3 | 04. Канал #4 |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 01.1 Компенсация неточности обработки КП (активное состояние) | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 01.2 Параметры компенсации неточности обработки КП корректны | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 02.0 Частота вращения контрольной поверхности, об/мин | 3000,1 | 375,0 | 0,0 | 0,0 |
| 03. Характеристика КП до компенсации | | | | |
| 03.1 Средняя длина метки КП, мкм | 98 174 | 0 | 0 | 0 |
| 03.2 Увеличение от среднего (пик), мкм | 308 | 0 | 0 | 0 |
| 03.2 Уменьшение от среднего (пик), мкм | 148 | 0 | 0 | 0 |
| 03.2 СКЗ отклонения от среднего, мкм | 112,707 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 04. Характеристика КП после компенсации | | | | |
| 04.1 Средняя длина метки КП, мкм | 98 177 | 0 | 0 | 0 |
| 04.2 Увеличение от среднего (пик), мкм | 28 | 0 | 0 | 0 |
| 04.2 Уменьшение от среднего (пик), мкм | 28 | 0 | 0 | 0 |
| 04.2 СКЗ отклонения от среднего, мкм | 18,586 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

Рис. 6. Пример отображения отчета работы алгоритма компенсации неточности обработки КП по длине меток канала измерения #01 в ПО ModuleConfigurator

Модуль МК62 поддерживает команду автоматического копирования результатов измерений в регистры настройки механической характеристики КП.

Компенсация относительного виброперемещения КП вдоль оси датчика

Относительное перемещение КП вдоль оси датчика вызывает смещение точки компарирования активного фронта сигнала, что проявляется в смещении значения тактового счетчика, фиксируемого по активному фронту метки КП.

На рисунке 7 представлена передаточная характеристики вихретокового датчика ДВТ10 с преобразователем ИП34 при переходе из режима насыщения (паз в контрольной поверхности) в нормальный режим работы (выступ на контрольной поверхности) для разных начальных расстояниях до выступа контрольной поверхности (1,0мм; 1,5мм; 2,0мм).

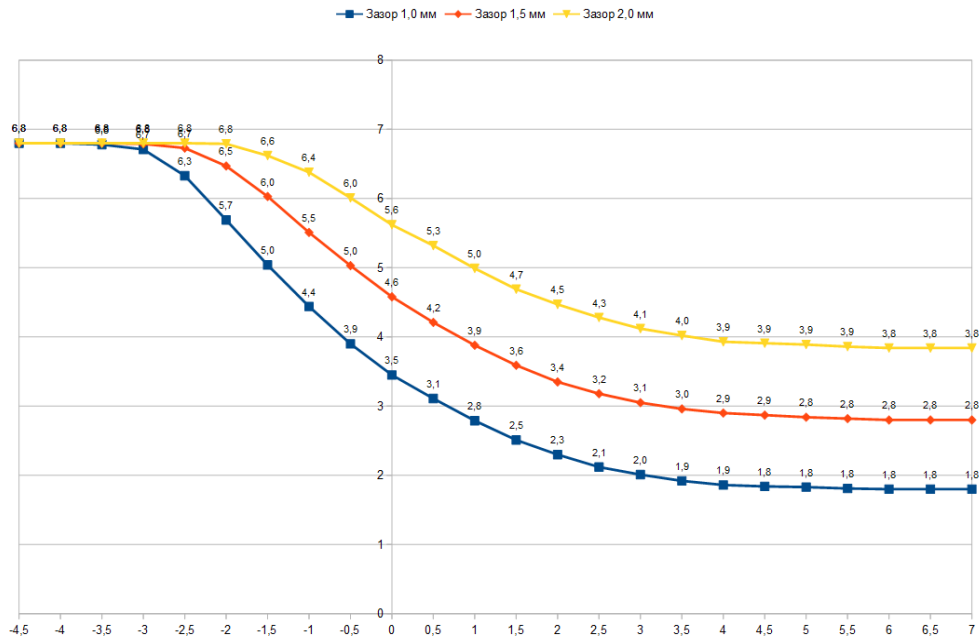


Рис. 7. Передаточная характеристики вихретокового датчика ДВТ10 с преобразователем ИП34

По оси X рисунка 7 указано расстояние между осью датчика ДВТ10 и ребром контрольной поверхности в мм. По оси Y - выходной ток преобразователя ИП34 в мА. Движение по графику слева направо соответствует движению датчика от углубления к выступу контрольной поверхности. Позиция 0 на оси X соответствует совмещению оси датчика и ребра контрольной поверхности.

Передаточная характеристика повторения контрольной поверхности в виде электрического сигнала зависит от начального зазора между датчиком ДВТ10 и КП, которая вносит погрешность в точность компарирования ребра контрольной поверхности, в том числе в результате относительного виброперемещения КП.

В модуле МК62 предусмотрена компенсация относительного виброперемещения КП в вдоль оси датчика (продольной вибрации) по первичным значениям тактового счетчика (рекомендуется) и по значением угловой скорости, что определяется настройкой модуля. Алгоритм компенсации относительного виброперемещения КП в вдоль оси датчика не требует наличия импульсов синхронизации, т. к. значения зазоров по меткам КП синхронизировано со значениями тактового счетчика.

Компенсация проводится относительно рабочего положения датчика, указанного в настройках модуля или вычисленного зазора (рекомендуется) для каждой метки КП. Для положительного и отрицательного отклонений от рабочего положения предусмотрены разные коэффициенты влияния. Расчет значения компенсации в тактах генератора ($C_{ТАКТ}$) выполняется по формуле:

$$C_{ТАКТ} = K_{ВЛ} \cdot (G_N - G_{РАБ}) \cdot \frac{F_{ГЕН}}{F_{РАБ} \cdot D_{КП}} \quad (6)$$

Где:

$K_{ВЛ}$ – коэффициент влияния, указываемый в настройках канала измерения

G_N – зазор между датчиком и меткой N КП

$G_{РАБ}$ – рабочий зазор между датчиком КП

$F_{ГЕН}$ – частота тактового генератора

$F_{РАБ}$ – частота вращения КП

$D_{КП}$ – диаметр КП, указанный в настройках канала измерения

Значение коэффициента влияния ($K_{ВЛ}$) выбирается алгоритмом компенсации в зависимости от знака выражения ($G_N - G_{РАБ}$), при положительном значении применяется коэффициент влияния по удалению КП.

Неправильная настройка коэффициентов влияния алгоритма компенсации по продольной вибрации КП может приводить к нелинейным искажениям исходного сигнала, появления ложных значений размаха КК.

Компенсация относительного виброперемещения КП перпендикулярно оси датчика

Виброперемещение КП в перпендикулярной оси датчика оказывает непосредственное влияние на результаты измерения размаха КК. Для компенсации перпендикулярного виброперемещения требуется наличие комплементарного датчика измерения зазора до КП. Пример размещения датчиков КК во взаимно перпендикулярной ориентации представлен на рисунке 8, влияние относительного виброперемещения в таблице 6.

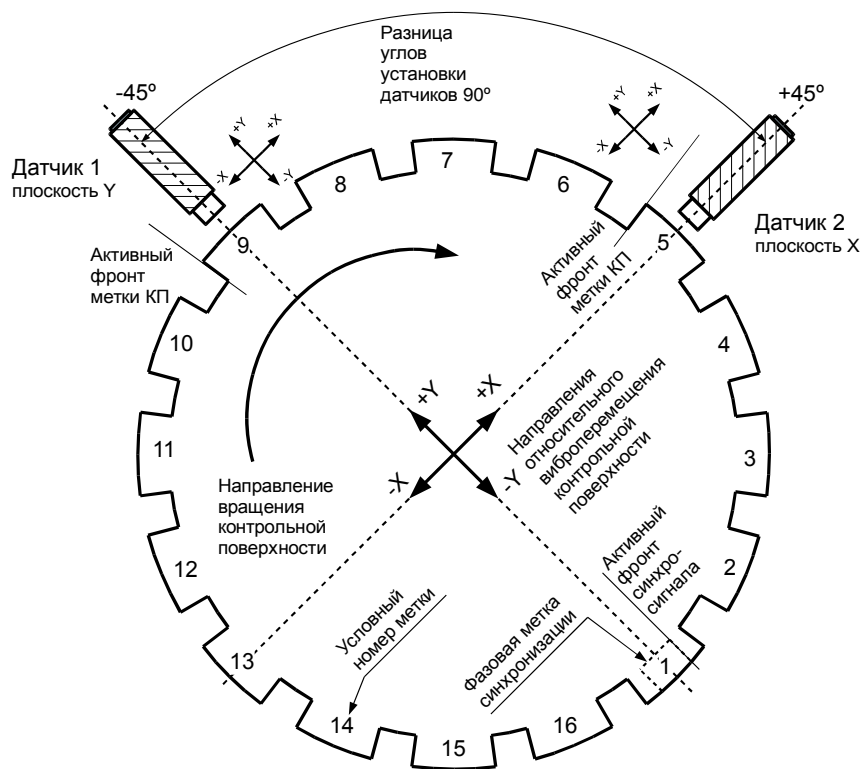


Рис. 8. Пример размещения датчиков КК во взаимно перпендикулярных плоскостях

Таблица 6.

Взаимное влияние датчиков при компенсации относительного виброперемещения КП

| Номер датчика | Угол установки, гр | Направление продольной вибрации | Направление поперечной вибрации | Комплементарный канал (датчик) |
|---------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | -45 | Y | X | 2 |
| 2 | +45 | X | Y | 1 |

В настройках канала измерения необходимо выбрать комплементарный канал, и в случае необходимости включить обратное влияние компенсации, что может потребоваться из-за особенностей размещения датчика комплементарного канала.

Компенсация выполняется для каждой метки КП с учетом разницы углов установки датчиков. Разница между углами установки датчиков не должна быть меньше 45° (абсолютное значение). Расчет коррекции значения угловой скорости $L_{ТАКТ}$ (в тактах генератора) выполняется по формуле:

$$L_{ТАКТ} = \frac{Gk_N - Gk_{РАБ}}{\sin(R_{УСТ} - Rk_{УСТ})} \cdot \frac{F_{ГЕН}}{F_{РАБ} \cdot D_{КП}} \quad (7)$$

Где:

$R_{уст}$ – угол установки датчика, указанный в настройках канала измерения

$R_{куст}$ – угол установки датчика комплементарного канала, указанный в настройках канала измерения

$G_{кN}$ – зазор между датчиком и меткой N КП комплементарного канала

$G_{кРАБ}$ – рабочий зазор между датчиком КП комплементарного канала

$F_{ГЕН}$ – частота тактового генератора

$F_{РАБ}$ – частота вращения КП

$D_{КП}$ – диаметр КП, указанный в настройках канала измерения

Алгоритм компенсации относительного виброперемещения КП в поперечной плоскости может работать при отсутствии импульсов синхронизации.

Факт действия компенсационных алгоритмов сигнализируется флагами в регистре состояния каналов измерения.

Виртуальные каналы измерения

Для оценки механической нагрузки на элементы конструкции контролируемого агрегата (например, ротора) в модуле МК62 предусмотрены виртуальные каналы, позволяющие вычислить результирующий спектр и размах крутильных колебаний, относящиеся к данному узлу.

Например, каналы измерения модуля МК62 распределены следующим образом, для ротора опирающегося на два подшипника в многоопорном агрегате:

1. Датчик КК в вертикальной плоскости со стороны переднего подшипника ротора
2. Датчик КК в горизонтально-поперечной плоскости со стороны переднего подшипника ротора
3. Датчик КК в вертикальной плоскости со стороны заднего подшипника ротора
4. Датчик КК в горизонтально-поперечной плоскости со стороны заднего подшипника ротора

Каналы измерения 1, 2 и 3, 4 попарно комплементарны, для компенсации относительной вибрации КП перпендикулярно осям датчиков. Каналы 1, 3 и 2, 4 могут быть объединены в виртуальные каналы для вычисления размаха крутильных колебаний ротора в вертикальной и горизонтально-поперечных плоскостях. Пример настройки модуля МК62 представлен на рисунке 9. Частотный диапазон вычисления размаха КК для виртуальных каналов с 4 по 127 спектральную линию.

| | Вирт. канал #01 | Вирт. канал #02 |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 01. Режим работы | 2 - Вычитание арг. 2 из 1 ▼ i x | 2 - Вычитание арг. 2 из 1 ▼ i x |
| 02.1 Аргумент 1 (канал измерения) | 1 - Спектр канала #01 ▼ i x | 2 - Спектр канала #02 ▼ i x |
| 02.2 Аргумент 2 (канал измерения) | 3 - Спектр канала #03 ▼ i x | 4 - Спектр канала #04 ▼ i x |
| 03. Усреднение переменного угла КК | 4 цикла ▼ i x | 4 цикла ▼ i x |
| 04. Блокировка работы. Маска, логика 'ИЛИ' | 04.CHER 01; 06.CHER 03; i x | 05.CHER 02; 07.CHER 04; i x |
| 05. Коэффициент коррекции амплитуды спектральных линий | 1 i x | 1 i x |

Рис. 9. Пример настройки виртуальных каналов в ПО
ModuleConfigurator

Состояние виртуальных каналов и результаты вычисления размаха КК доступно по цифровым интерфейсам связи, на ЖКИ индикаторе модуля МК62 не отображаются. Изменение размаха крутильных колебаний узла с течением времени эксплуатации агрегата, на сравнимых режимах работы, может свидетельствовать о изменении жесткости (усталости), механических дефектах узла.

Испытательная установка

Схема испытательной установки представлена на рисунке 10.

Стенд СП31, содержащий диск с 16 метками, позволяет имитировать вращение контрольной поверхности реального агрегата.

Датчики контроля КК размещены во взаимно-перпендикулярном направлении. Один из датчиков установлен на вибростенд, имитирующем относительное виброперемещение КП для проверки алгоритмов компенсации. Каналы измерения КК подключены к входам 1, 2 модуля контроля МК62.

Для синхронизации измерений, выполнения компенсации неточности обработки КП, вычисления статического угла скручивания необходим датчик опорного сигнала (фазовой метки). На диске стенда СП31 предусмотрена поверхность, имеющая один паз на оборот ротора. В состав испытательного стенда входит канал синхронизации, подключенный к каналу 1 модуля МК65.

Импульсы синхронизации, передаваемые на логический выход 1 (L1) модуля МК65 должны быть переданы на вход синхронизации 1 (C1) модулей МК62.

Каналы измерения 3, 4 модуля МК62 работают в электрическом режиме по напряжению (0-3В), переключки X10, X11 платы входов CI.062.01-04 должны быть сняты. К каналам измерения 3, 4 должен быть подключены выходы 1, 2 соответственно генератора, поддерживающего частотную и амплитудную модуляцию генерируемого сигнала.

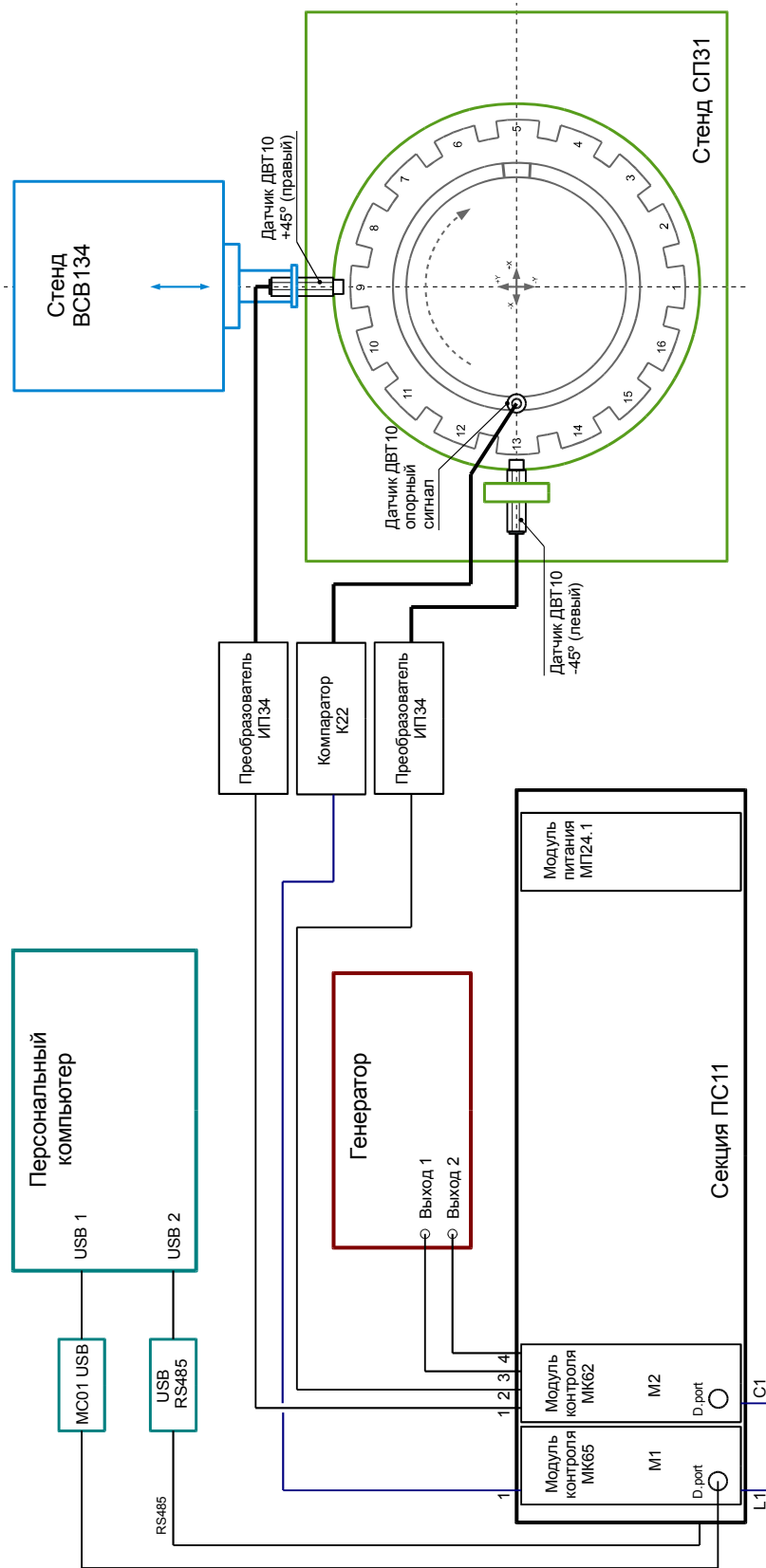


Рис. 10. Схема испытательной установки

Персональный компьютер (ПК) с установленным программным обеспечением ModuleConfigurator (последняя доступная версия) предназначен для настройки модулей МК65, МК62, контроля результатов измерений.

ПК может быть подключен к модуля МК62, МК65 через плату диагностического интерфейса MC01 USB. Модули контроля МК62, МК65 обмениваются данными по CAN интерфейсу.

Стенд СП43 и универсальный мультиметр предназначены для калибровки модулей МК62, МК65 по постоянному току. Калибровка по постоянному току необходима для вычисления постоянных зазоров между датчиком и КП, вычислением размаха относительного виброперемещения КП.

Заключение

За короткий срок, в рамках изготовления АСКВМ «Вибробит 300» для паровой турбины типа Т-295/335-23,5 и генератора ТВВ-350 энергоблока ст. №9 ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго», специалисты ООО НПП «Вибробит» провели полный цикл исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке аппаратных средств и программного обеспечения построения систем контроля крутильных колебаний валопровода.

Испытания программно-аппаратных средств подсистемы КК, проведенные на испытательном стенде и с применением цифровых генераторов сигналов, показали положительные результаты. После монтажа и наладки подсистемы КК непосредственно на турбоагрегате будет принято решение о утверждении модулей МК62, МК65 в качестве средств измерения крутильных колебаний.

Список литературы

1. Киселев М.И. Фазохронометрический контроль валопроводов турбоагрегатов [Текст] / М.И. Киселев, В.И. Пронякин // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики электрических станций. – М.: ОАО «ВТИ», 2005 – С. 84-89.
2. Зиле А.З. Исследования крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов [Текст] / А.З. Зиле, Д.В. Тарадай, С.Б. Томашевский, Ю.А. Шуранова // Электрические станции. – 2013 – №10. – С. 40-48.
3. Биялт М.А. Актуальность и проблемы реализации мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов на электростанциях [Тест] / М.А. Биялт, П.Е. Черенок, Е.В. Бочкарев, А.В. Кистойчив, Е.В. Урьев // Электрические станции. – 2013 – №8. – С. 50-57.
4. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, среда проектирования. – 2-е изд., перераб. и доп. / Куприянов М.С., Матюшкин Б.Д. – СПб.: Политехника, 1999.
5. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов [и др.] – СПб.:БХВ-Петербург, 2003.