

# **Подсистема контроля крутильных колебаний АСКВМ «Вибробит 300»**

**Пример реализации для турбоагрегата  
ст.№9 ТЭЦ 22 ПАО «Мосэнерго»**

Зайцев Александр Александрович  
инженер ООО НПП «Вибробит»

## Аппаратура «Вибробит 300»

### Основные сведения

- Построение ИС вибрационного контроля и диагностики состояния агрегатов
- Измерение переменных сигналов методом спектрального анализа
- Начало серийного производства - 2005 год
- Оснащено более 400 турбоагрегатов мощностью от 25 до 800МВт
- Непрерывная модернизация аппаратных средств и алгоритмов ЦОС

## Аппаратура «Вибробит 300»

### Другие виды измерений в промышленном исполнении

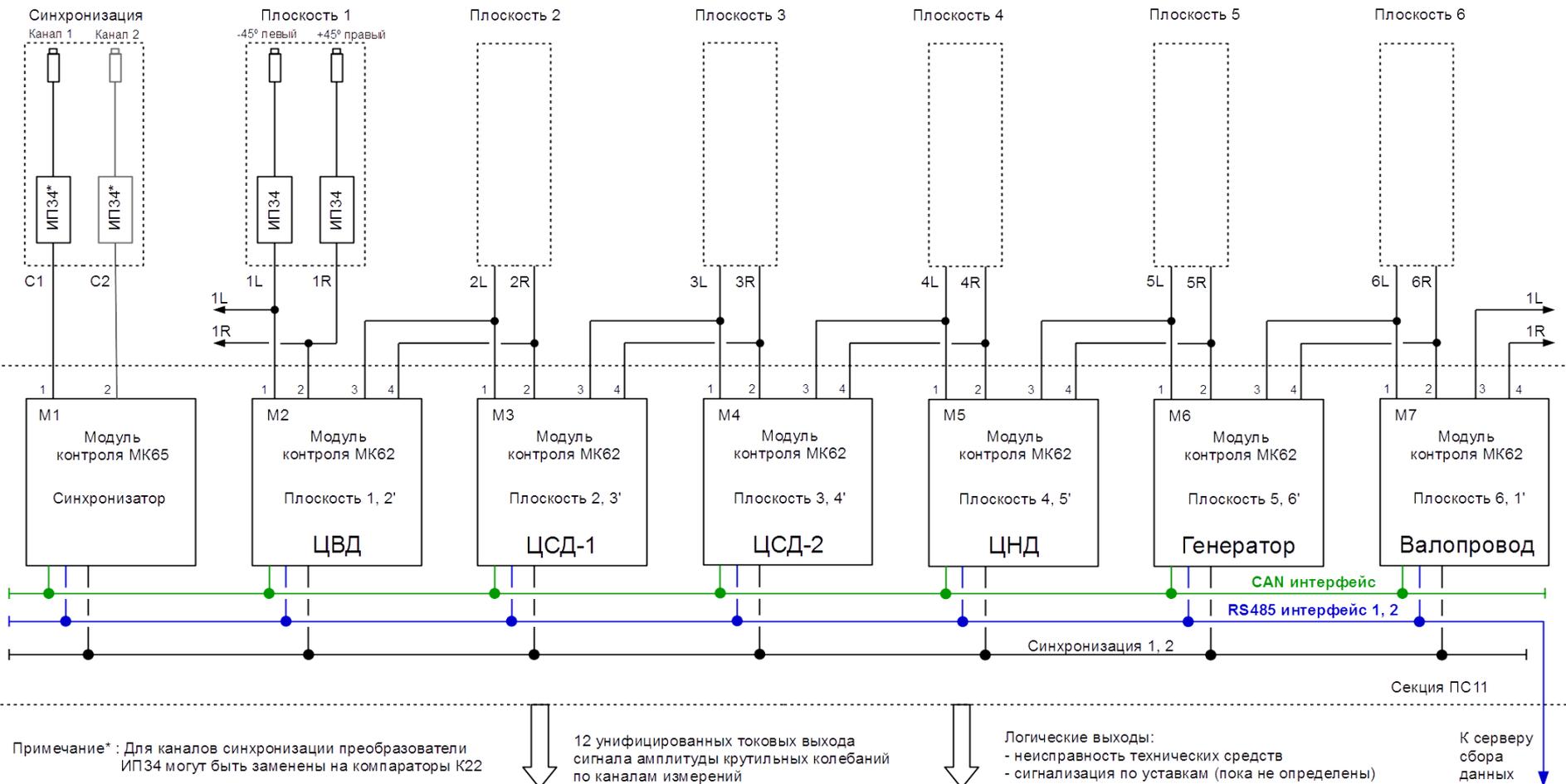
- ОРР для угловых поясков на роторе
- Положение бойка противоразгонного АБ
- Прогиб ротора, изгибная форма во всем диапазоне частот вращения
- Абсолютное виброперемещение ротора
- Крутильные колебания ротора

## Подсистема контроля крутильных колебаний

### Исходные данные

- В составе АСКВМ «Вибробит 300» для турбоагрегата Т-295/335-23,5, изготавливаемый ЗАО «УТЗ» для ст.№9 ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»
- Дискретно-фазовый метод измерения
- Контрольные поверхности - по 16 меток на полумуфтах роторов
- Количество контрольных поверхностей - 6
- Частотный диапазон - от 0 до 200 Гц
- Дискретность измерения размаха КК - 0,001°

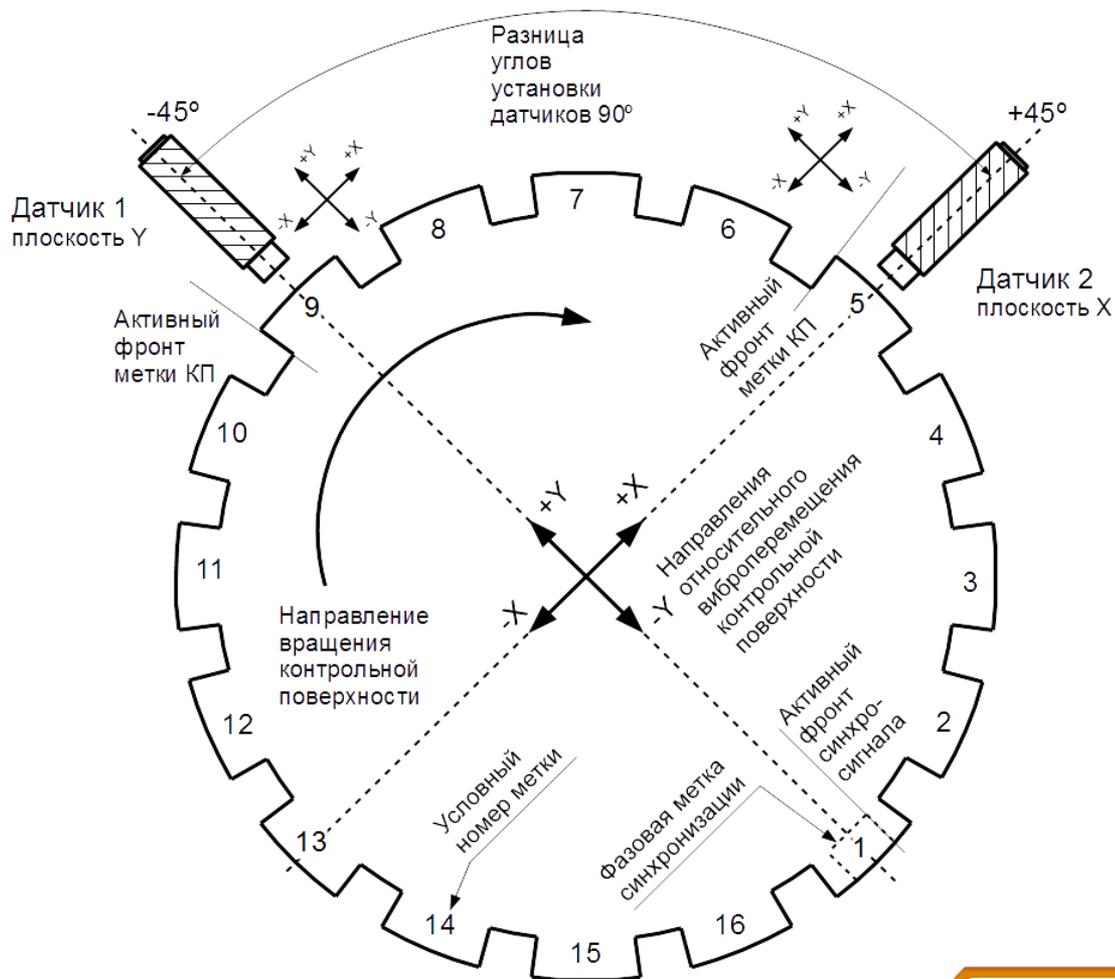
## Структурная схема подсистемы КК



## Перечень измерительных каналов КК

Код	Место установки	Ориентация датчика	Канал измерения основной	Канал измерения дополнит.
КК 1L	Свободный конец РВД	-45° левый	М2 - МК62 - 1	М7 - МК62 - 3
КК 1R	Свободный конец РВД	+45° правый	М2 - МК62 - 2	М7 - МК62 - 4
КК 2L	Муфта РВД-РСД1	-45° левый	М3 - МК62 - 1	М2 - МК62 - 3
КК 2R	Муфта РВД-РСД1	+45° правый	М3 - МК62 - 2	М2 - МК62 - 4
КК 3L	Муфта РСД1-РСД2	-45° левый	М4 - МК62 - 1	М3 - МК62 - 3
КК 3R	Муфта РСД1-РСД2	+45° правый	М4 - МК62 - 2	М3 - МК62 - 4
КК 4L	Муфта РСД2-РНД	-45° левый	М5 - МК62 - 1	М4 - МК62 - 3
КК 4R	Муфта РСД2-РНД	+45° правый	М5 - МК62 - 2	М4 - МК62 - 4
КК 5L	Муфта РНД-РГ	-45° левый	М6 - МК62 - 1	М5 - МК62 - 3
КК 5R	Муфта РНД-РГ	+45° правый	М6 - МК62 - 2	М5 - МК62 - 4
КК 6L	Свободный конец РГ	-45° левый	М7 - МК62 - 1	М6 - МК62 - 3
КК 6R	Свободный конец РГ	+45° правый	М7 - МК62 - 2	М6 - МК62 - 4
ОС С1	Муфта РНД-РГ	-45°	М2 - МК65 - 1	нет

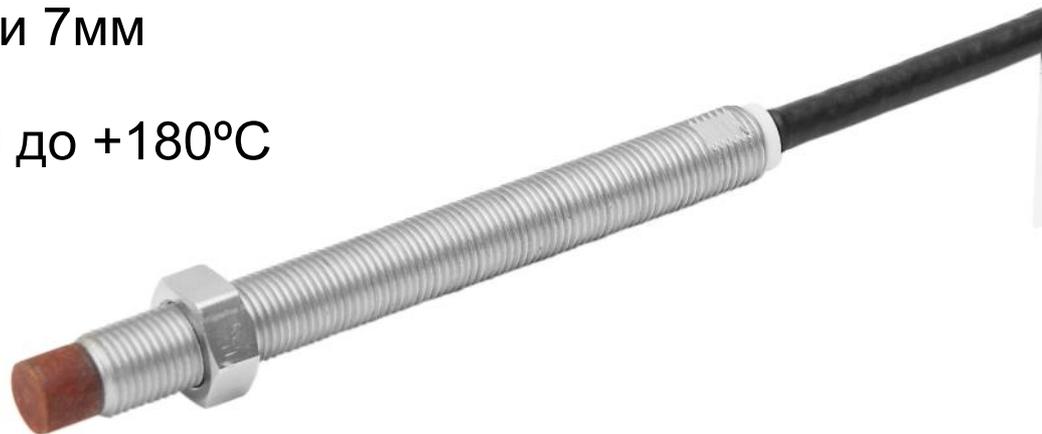
## Установка датчиков в плоскости измерения



## Аппаратные средства

### Цилиндрический датчик ДВТ10

- Диапазон измерения перемещения 0 - 2000мкм
- Установочный зазор 500 мкм
- Диаметр датчика - М10
- Диаметр измерительной катушки 7мм
- Температурный диапазон от -40 до +180°С



## Аппаратные средства

### Измерительный преобразователь ИП34

- Частотный диапазон DC - 15кГц
- Выходной сигнал - ток 4-20мА
- Напряжение питания +24В DC
- Температурный диапазон от -40 до +70°С



## Аппаратные средства

### Модуль контроля МК65 - синхронизатор

- Измерение частоты вращения ротора
- Измерение зазора до КП
- Расчет угла компенсации фазового сигнала
- Контроль исправности канала измерения
- Формирование сигнализации
- Передача результатов по цифровым каналам связи



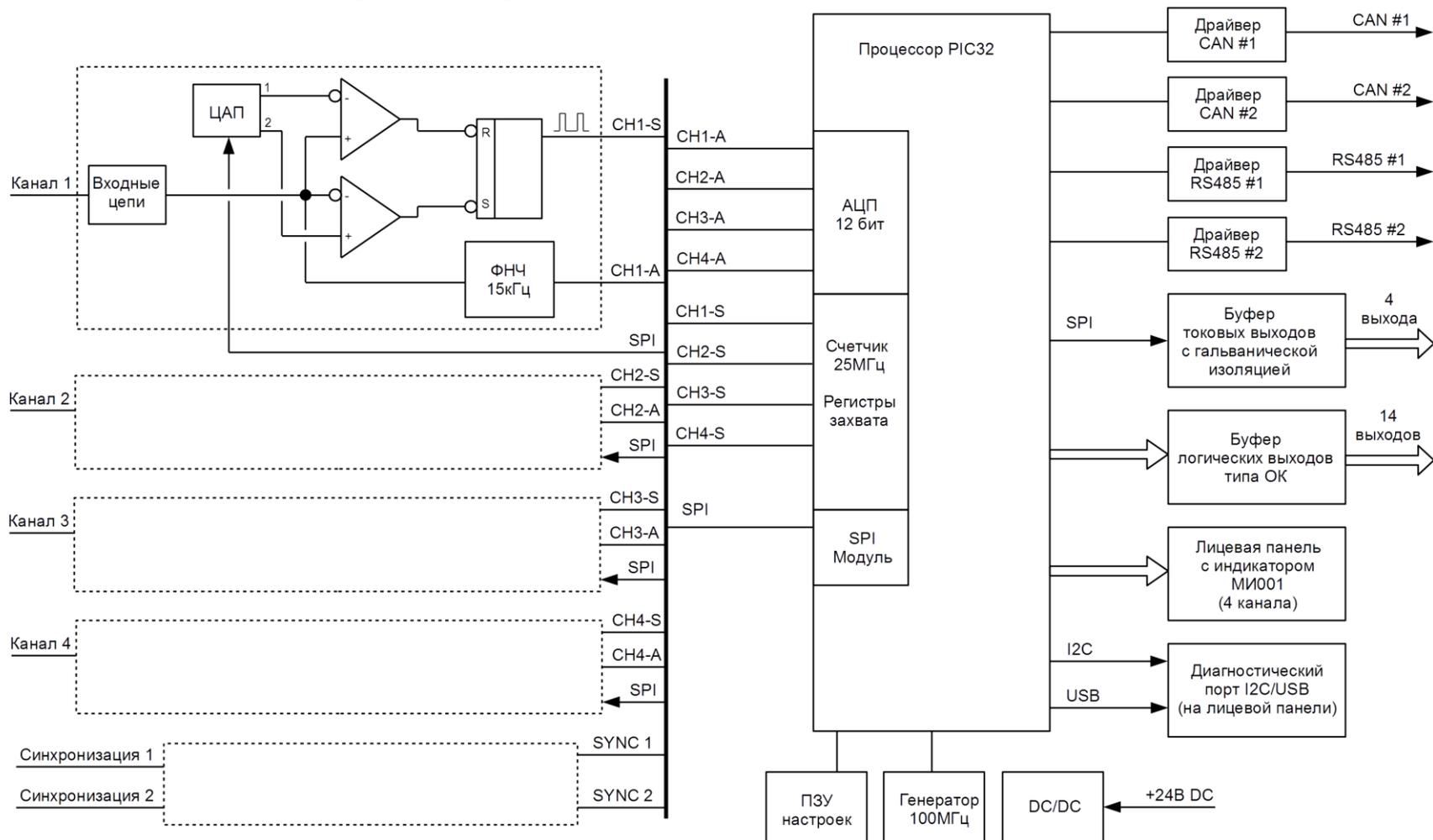
## Аппаратные средства

### Модуль контроля МК62 - измеритель КК

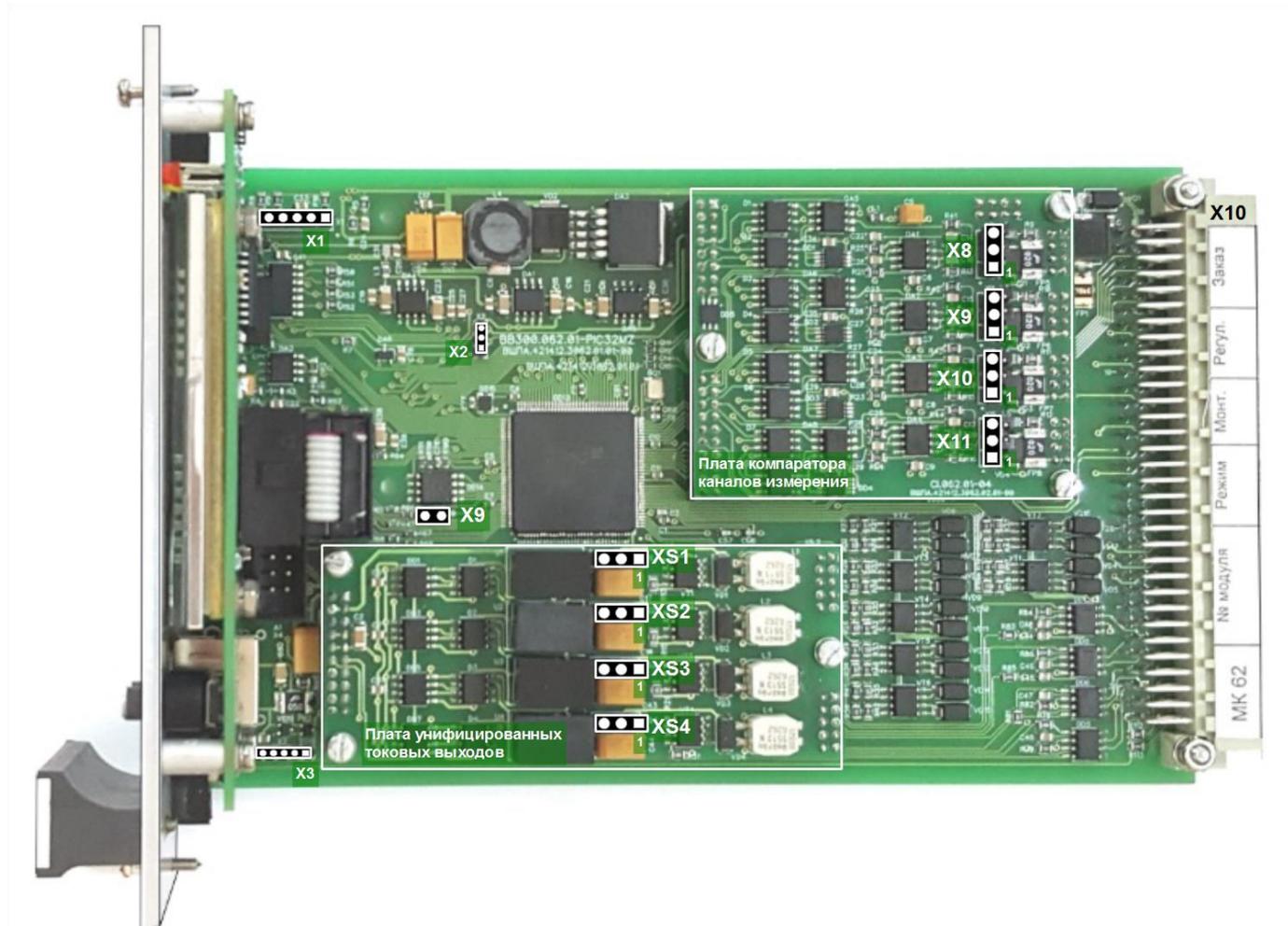
- Измерение размаха КК
- Измерение зазора и относительного перемещения КП
- Измерение статического угла
- Измерение частоты вращения КП
- Контроль исправности канала измерения
- Формирование сигнализации
- Передача результатов по цифровым каналам связи



## Структурная схема модуля МК62



## Внешний вид платы модуля МК62



## Аппаратные средства

### Микроконтроллера ЦОС - PIC32MZ

- 32-разрядный процессор с функциями ЦОС
- Поддержка математики с плавающей запятой
- Тактовая частота до 250МГц
- Аппаратные 32-разрядные счетчики с функцией захвата
- 12-разрядное быстродействующее АЦП
- Поддержка интерфейсов связи CAN, USB, Ethernet
- Низкое энергопотребление



## **Измерение крутильных колебаний**

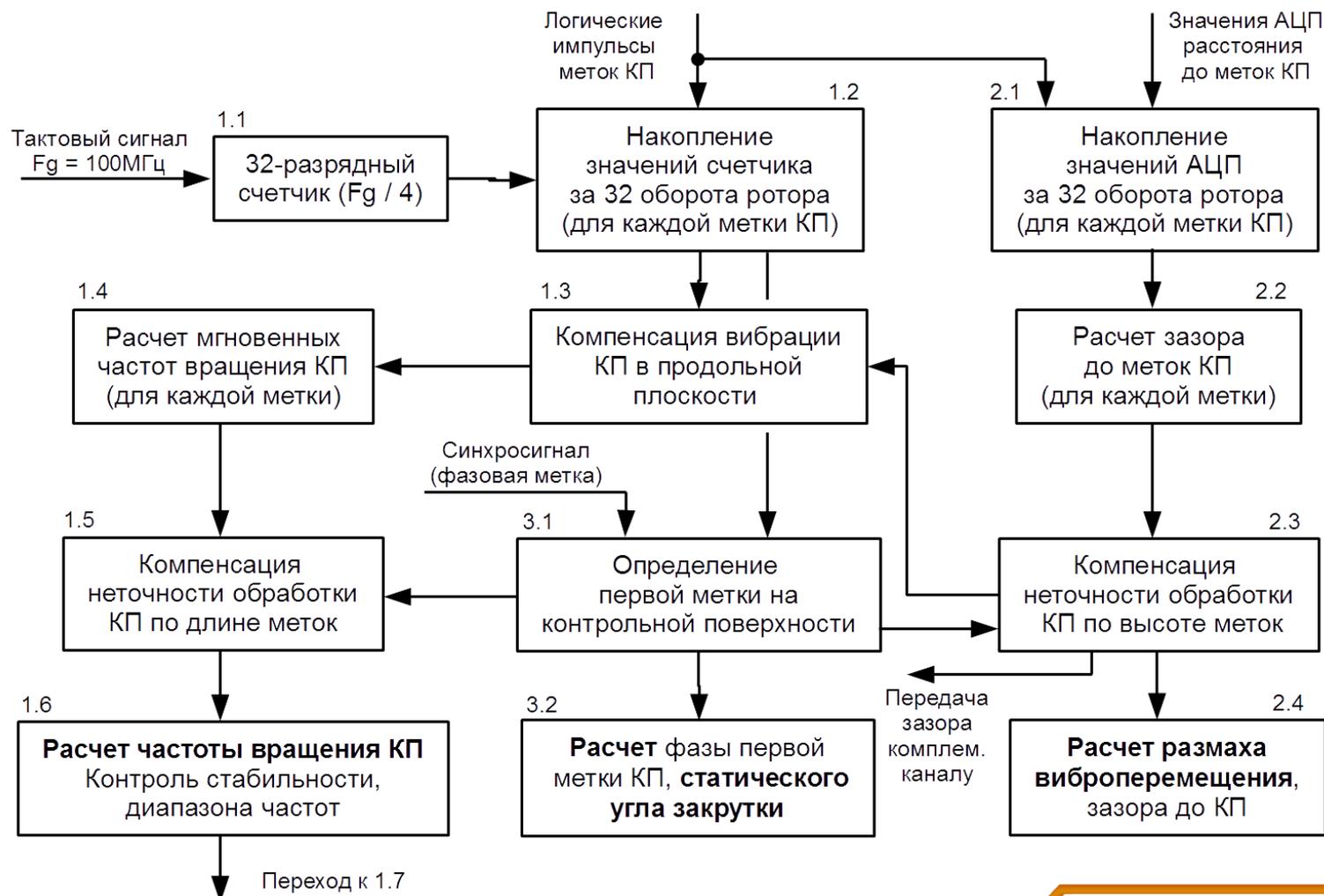
### **Перечень измеряемых параметров и компенсаций**

- Измерение и контроль частоты вращения 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
- Расчет спектра размаха крутильных колебаний
- Расчет результирующего размаха крутильных колебаний

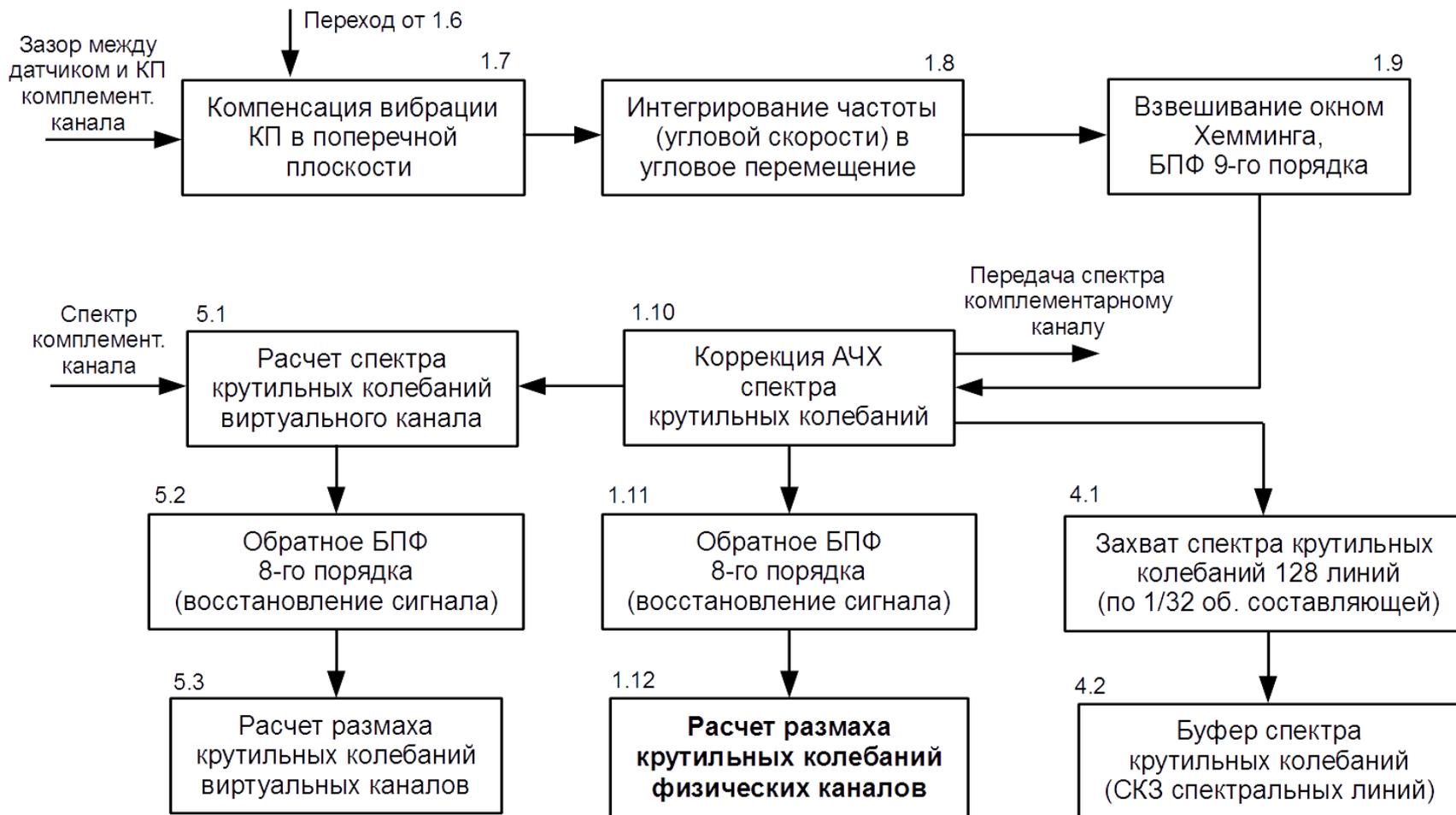
## Технические характеристики канала измерения КК

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 измерений, оборотов ротора	32
Предельный диапазон частоты вращения КП, об/мин	10 – 12 000
Число меток КП	от 1 до 64

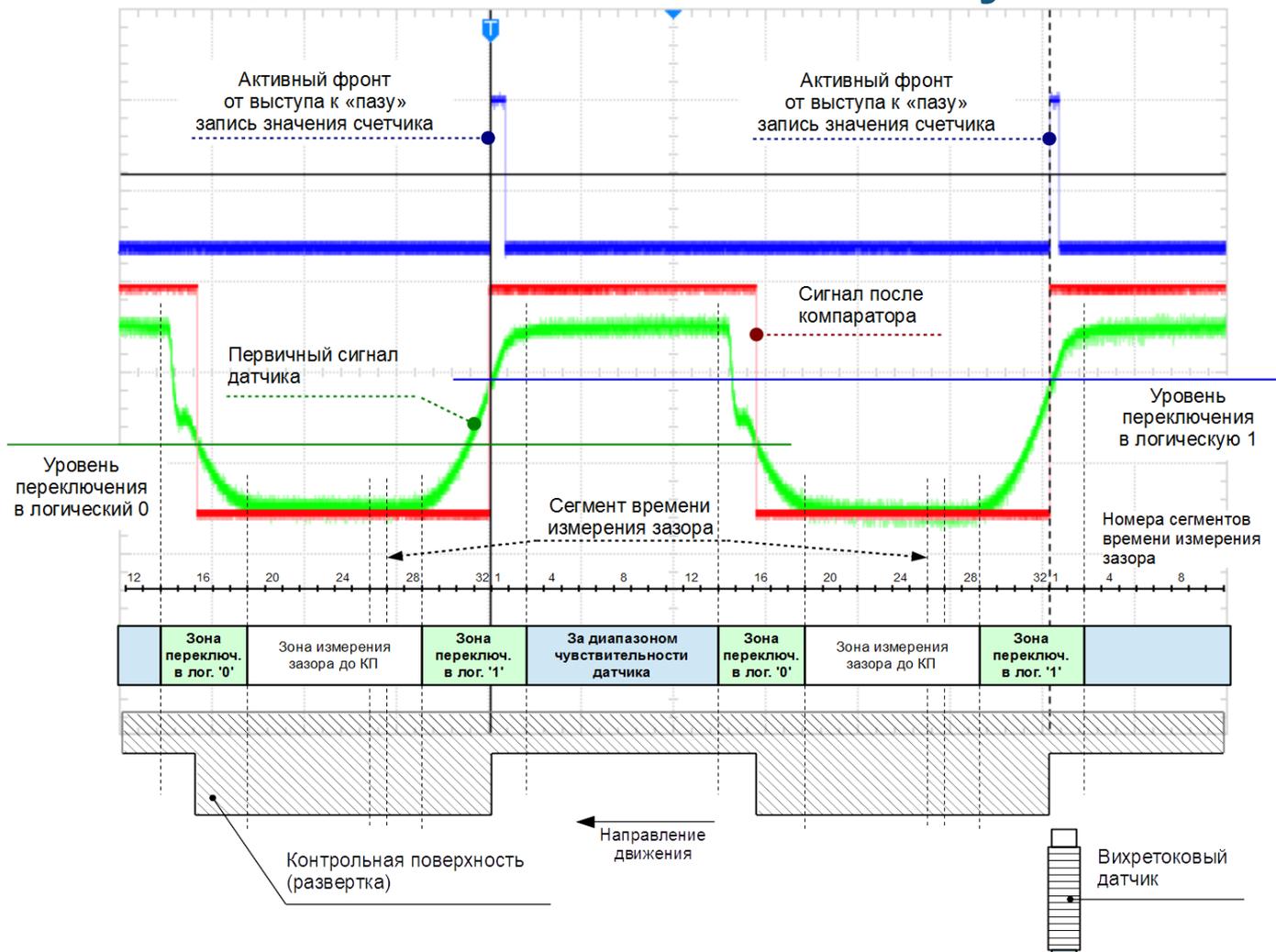
## Алгоритм вычисления КК - Часть 1



## Алгоритм вычисления КК - Часть 2



## Выделение логических импульсов



## **Влияние виброперемещения, смещения КП**

### **Периодические колебания**

- Проявляются в виде ошибочных значений размаха КК
- Чем меньше диаметр КП, тем больше влияние относительного виброперемещения

### **Смещение (изменение зазора)**

- Создает постоянное смещение фазы переключения компараторов
- На размах КК влияния не оказывает

## Компенсация неточности обработки меток КП по высоте

### **Влияние:**

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

## Компенсация неточности обработки меток КП по высоте

### Методика компенсации:

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

## Компенсация неточности обработки КП по длине меток

### Влияние:

- Ложная девиацию размаха угловой скорости, повторяющуюся каждый оборот КП и синхронно с первой (условно) меткой КП

### Методика компенсации:

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

## Компенсация неточности обработки КП

	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

Отображение результатов измерения длины,  
высоты меток КП канала измерения #01 в ПО ModuleConfigurator

## Компенсация неточности обработки КП

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

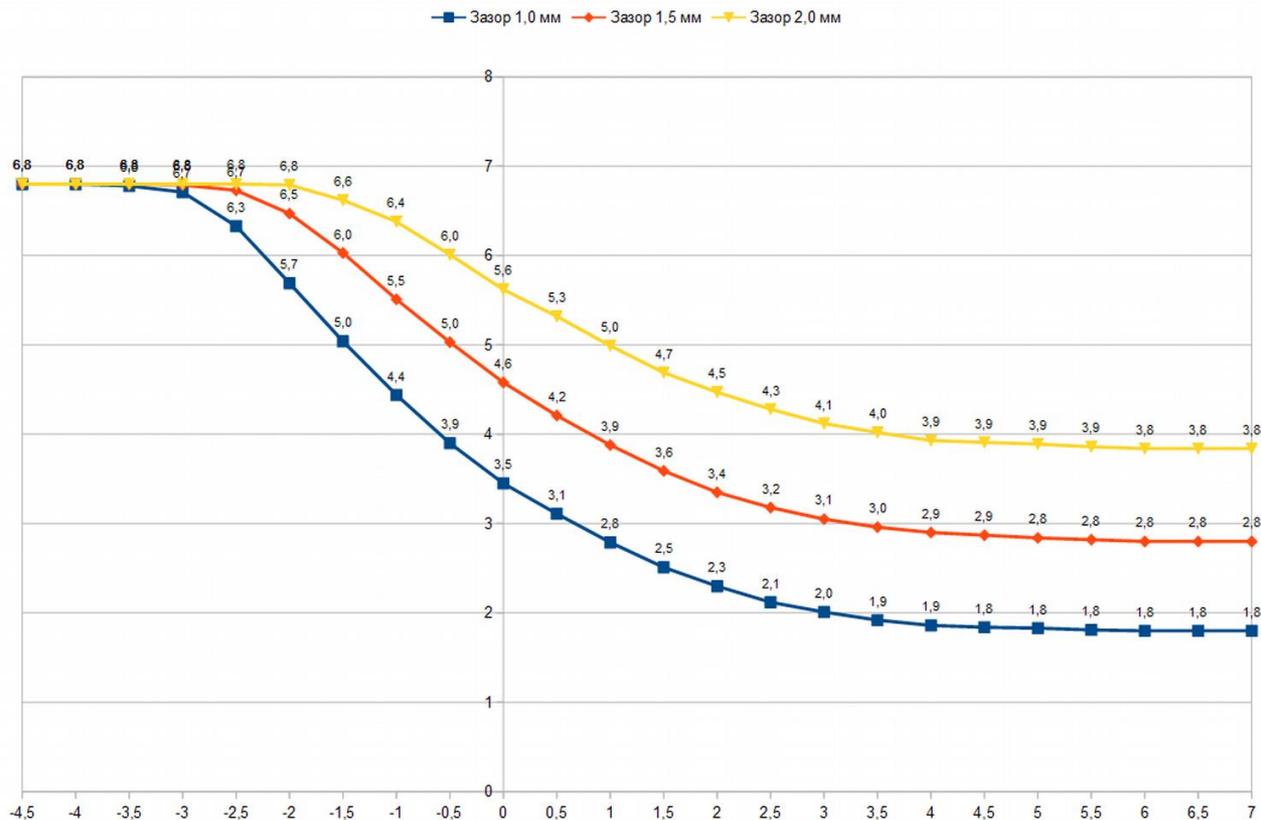
Отображение отчета работы алгоритма компенсации неточности обработки КП  
по длине меток канала измерения #01 в ПО ModuleConfigurator

## **Компенсация относительного виброперемещения КП вдоль оси датчика**

### **Влияние:**

- Вызывает смещение точки компарирования активного фронта сигнала
- Проявляется в смещении значения тактового счетчика, фиксируемого по активному фронту метки КП
- Появление ложных спектральных составляющих КК

## Компенсация относительного виброперемещения КП вдоль оси датчика



Передаточная характеристики вихретокового датчика ДВТ10 с преобразователем ИП34

## **Компенсация относительного виброперемещения КП вдоль оси датчика**

### **Методика компенсации:**

1. Не требуется наличие импульсов синхронизации
2. Для положительного и отрицательного отклонений от рабочего положения предусмотрены разные коэффициенты влияния
3. При неправильной настройке алгоритма возможна перекомпенсация, появление ложных спектральных составляющих в сигнале КК

## **Компенсация относительного виброперемещения КП перпендикулярно оси датчика**

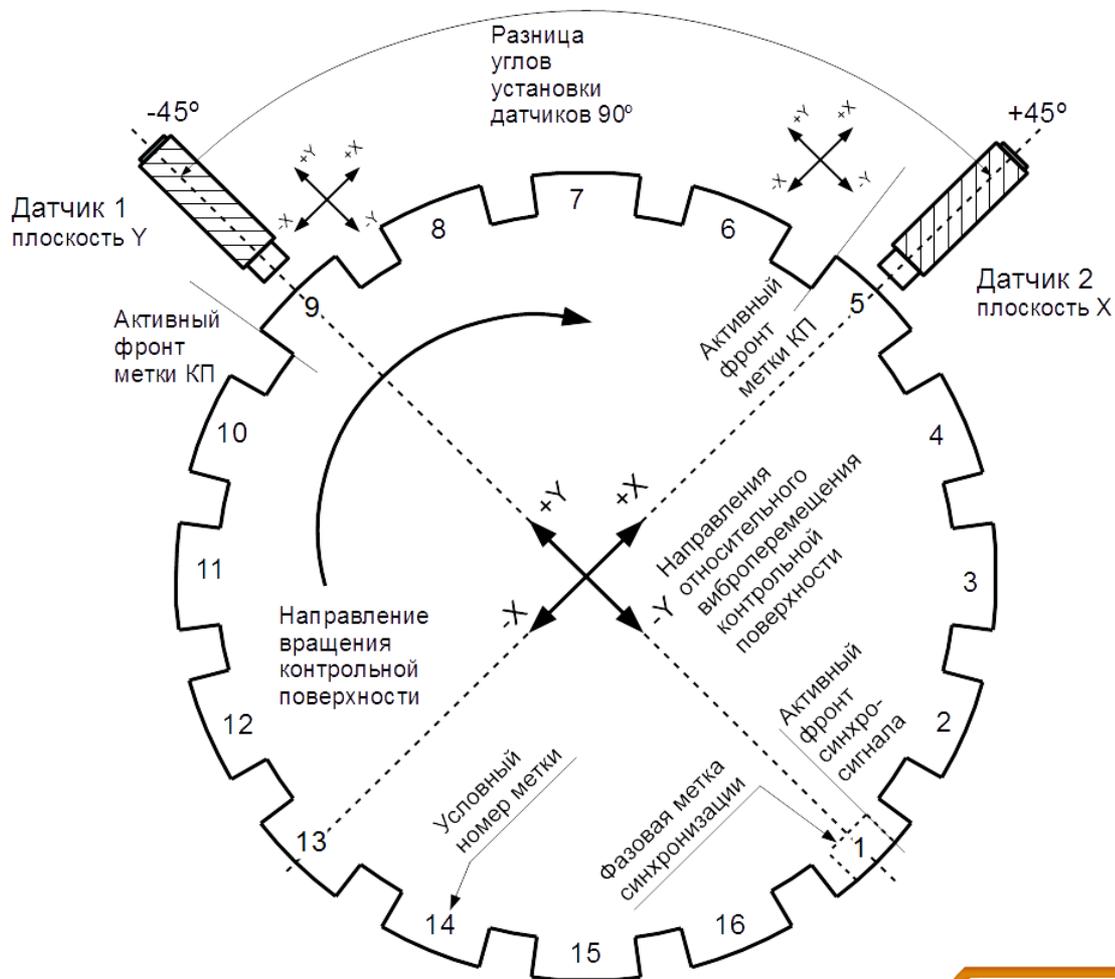
### **Влияние:**

- Смещение активного фронта логического сигнала, выделяемого компаратором
- Появление ложных спектральных составляющих КК

### **Методика компенсации:**

1. Не требуется наличие импульсов синхронизации
2. Наличие комплементарного датчика измерения мгновенного зазора до КП
3. Компенсация выполняется для каждой метки КП с учетом разницы углов установки датчиков

## Установка датчиков в плоскости измерения



## Виртуальные каналы

### Назначение:

- Оценка механической нагрузки на элементы конструкции контролируемого агрегата

### Вычисляемые параметры:

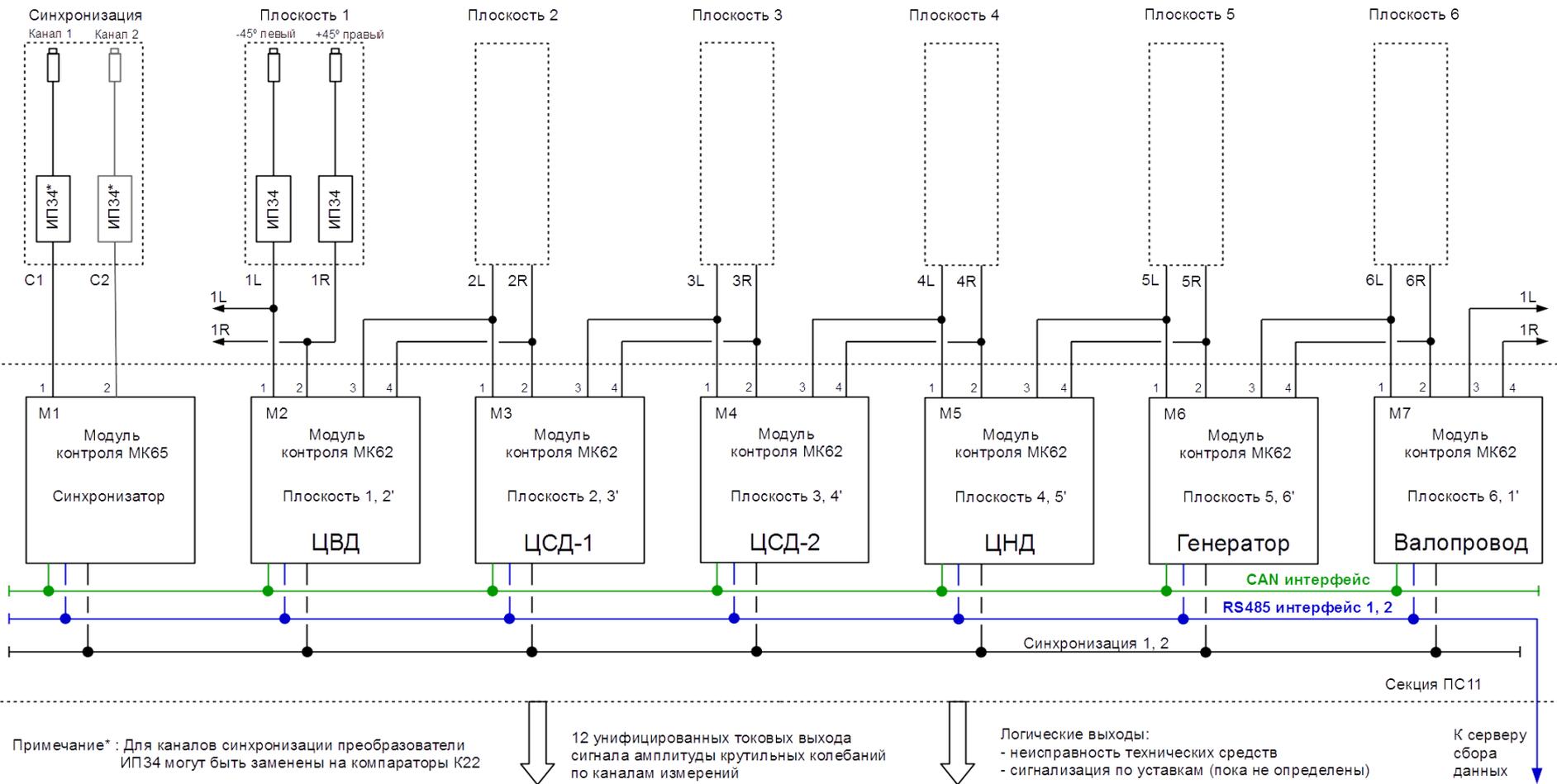
- Размах крутильных колебаний
- Результирующий спектр КК
- Статическое скручивание

## Виртуальные каналы

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

Пример настройки виртуальных каналов в ПО ModuleConfigurator

## Структурная схема подсистемы КК



Примечание\*: Для каналов синхронизации преобразователи ИП34 могут быть заменены на компараторы К22

12 унифицированных токовых выходов сигнала амплитуды крутильных колебаний по каналам измерений

Логические выходы:  
- неисправность технических средств  
- сигнализация по уставкам (пока не определены)

К серверу сбора данных

## Виртуальные каналы

### Перечень узлов контроля КК для турбоагрегата ст.9 ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»

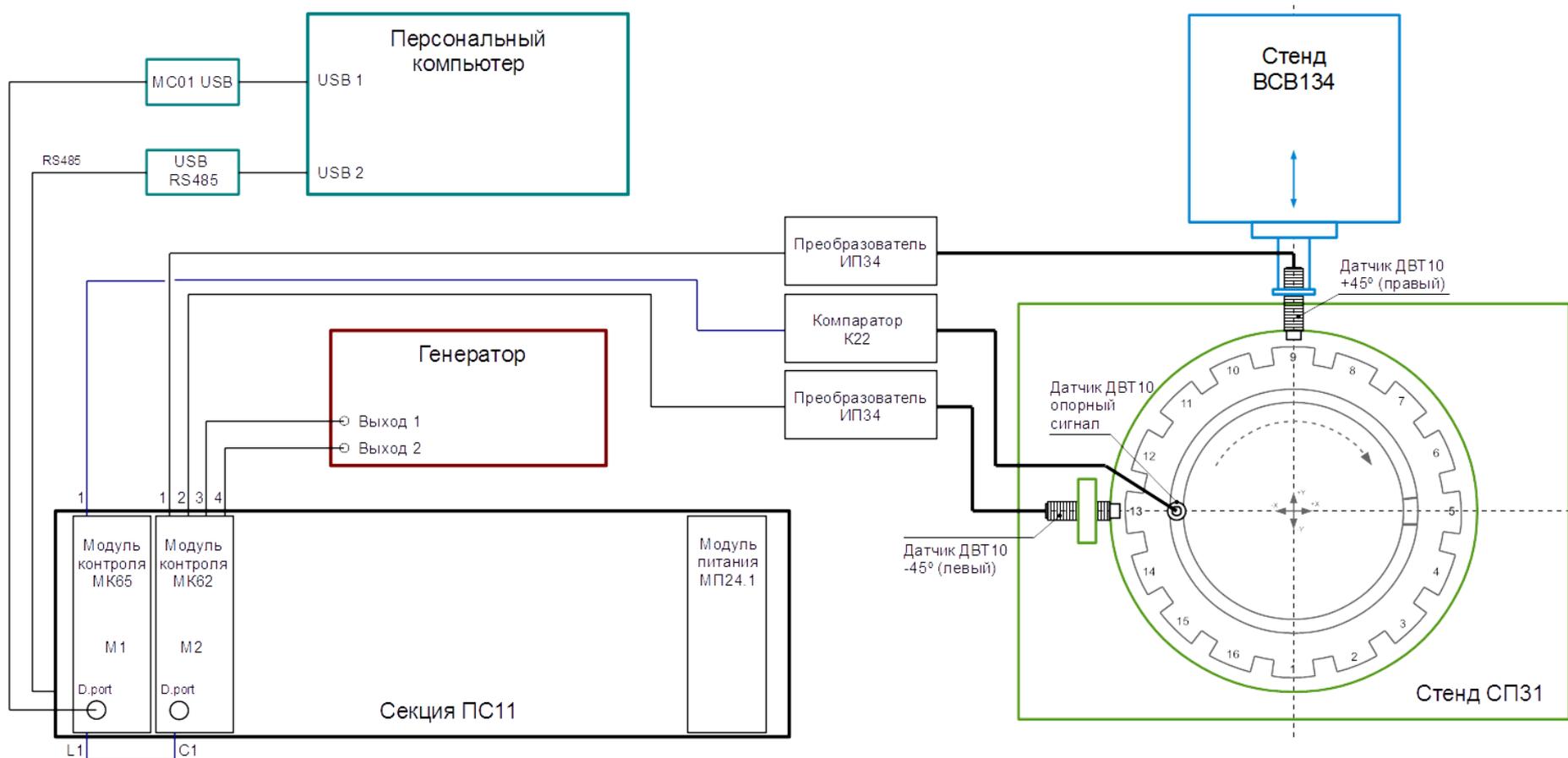
- Ротор высокого давления (РВД)
- Ротор среднего давления №1 (РСД1)
- Ротор среднего давления №2 (РСД2)
- Ротор низкого давления (РНД)
- Ротор генератора (РГ)
- Валопровод ТГ

## Испытательная установка

### Состав:

- Стенд СП31, содержащий диск с 16 метками
- Датчики контроля КК, размещенные во взаимно-перпендикулярном направлении
- Датчик опорного сигнала (фазовой метки)
- Вибростенд имитации относительного виброперемещения КП
- Цифровой генератор сигналов произвольной формы
- Персональный компьютер
- Модули МК65, МК62 аппаратуры «Вибробит 300»

## Испытательная установка



## Заключение

Проведен полный цикл исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке аппаратных средств и ПО построения систем контроля КК

Испытания, 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 типа СИ

## **Информационные материалы**

### **Сборник докладов ОАО «ВТИ»**

### **IX Международной научно-технической конференции**

- Разработка подсистемы контроля крутильных колебаний АСКВМ «Вибробит 300» для турбоагрегата ст.№9 ТЭЦ-22 ПАО «Мосэнерго»

### **Документация ООО НПП «Вибробит», инструкции по настройке:**

- ВШПА.42.1412.3062 Модуль контроля МК62
- ВШПА.42.1412.3065 Модуль контроля МК65
- ВШПА.421412.318.10 И1 Подсистема КК

Спасибо за внимание!