

СОВМЕЩЕНИЕ ВЫБОРОК ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕСИНХРОННЫХ ОТСЧЕТАХ В ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ РОТОРНОЙ МАШИНЫ

Введение

Система защиты роторной машины от превышения уровня вибраций в подшипниках основана на контроле среднеквадратического значения (СКЗ) виброизмерительного сигнала $\sigma_y = \sqrt{M\{y^2(t)\}}$ [1]. Известно, что виброизмерительный сигнал $y(t)$ представляет аддитивную смесь регулярной $s(t)$ и случайной $n(t)$ составляющих

$$y(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

регулярная составляющая обусловлена, в основном, прецессией вала [2]. Использование, содержащейся в виброизмерительном сигнале, информации о прецессии вала позволяет улучшить защиту роторной машины путём дополнительного контроля СКЗ регулярной составляющей $\sigma_s = \sqrt{M\{s^2(t)\}}$.

Постановка задачи

Цель данной статьи – разработка метода измерения интенсивности регулярной составляющей виброизмерительного сигнала и структуры устройства виброконтроля, обеспечивающего защиту роторной машины от превышения уровня прецессии вала ротора.

Обоснование метода измерения интенсивности регулярной составляющей виброизмерительного сигнала

Функциональная схема типового устройства виброконтроля (рис. 1) включает линейный измерительный преобразователь L (усилитель, формирователь амплитудно-частотной характеристики, интегратор и т.п.) входного измерительного сигнала, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) устройство определения СКЗ σ_y измеряемого параметра вибрации, пороговое устройство и индикатор.

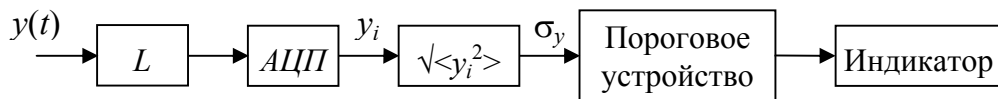


Рис. 1. Функциональная схема типового устройства виброконтроля

Предложенное устройство виброконтроля (рис. 2), в отличие от типового, включает канал селекции и измерения СКЗ σ_s регулярной составляющей $s(t)$ виброизмерительного сигнала $y(t)$.

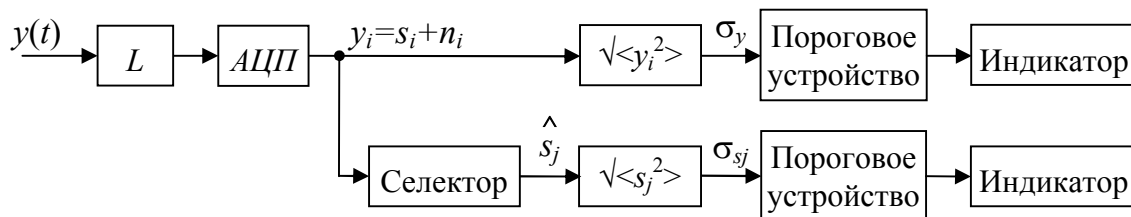


Рис. 2. Функциональная схема устройства виброконтроля с каналом СКЗ уровня прецессии вала

Для селекции регулярной составляющей использовано свойство её периодичности на ограниченных интервалах времени $T_{\text{набл.}}$

$$s(t) = s(t - T), \quad t \in T_{\text{набл.}}, \quad T \ll T_{\text{набл.}}, \quad (2)$$

где T – период полного колебания (прецессии ротора).

На вход селектора выборки y_i поступают с частотой дискретизации $F_{\text{дискр.}}$, на выходе селектора число оценок регулярной составляющей \hat{s}_j на один оборот ротора постоянно и равно K_0 . Оценки следуют с частотой $K_0 F = K_0 \frac{1}{T}$. На схеме рис. 2 частота F равна частоте вращения ротора $F = F_{\text{рот.}}$.

Селекция периодической регулярной составляющей может быть выполнена, как в частотной, так и во временной области. Выбор метода селекции определяется ограничением затрат времени на обработку виброизмерительного сигнала. Периодичность регистрации параметра вибрации в информационно-измерительной системе (ИИС) роторной машины, не должна превышать 100 ms [3]. В соответствии с этими требованиями время на обработку в типовом устройстве защиты составляет до 70...80 ms. Таким образом, время, выделенное на операцию селекции не должно превышать 20...30 ms. С этой точки зрения, более адекватной является обработка во временной области.

Для селекции периодической регулярной составляющей виброизмерительного сигнала в предложенном устройстве (рис. 2)

применена схема цифрового череспериодного накопителя I порядка, показанная на рис. 3.

В общем случае, при обработке одного или нескольких взаимосвязанных процессов $s(t)$, обладающих свойством периодичности (2), возникает необходимость совмещения выборок, как, например, в схеме

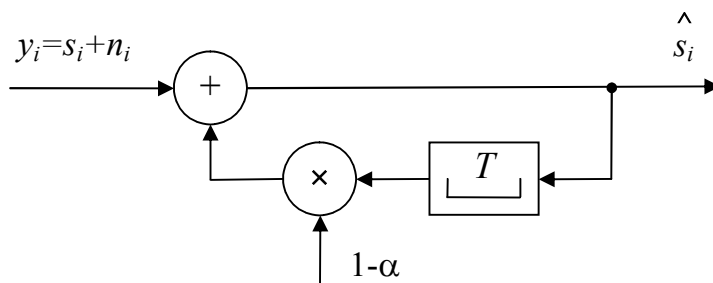


рис. 3.

Рис. 3. Схема цифрового череспериодного накопителя I порядка

Условием совмещения дискретных выборок периодического процесса является кратность частот повторения и дискретизации

$$F_{\text{дискр.}} = KF = \frac{K}{T}, \quad (3)$$

где F – фундаментальная частота прецессии ротора; K – целое число.

В реальных условиях цифровой обработки измерительных сигналов обеспечить выполнение условия (3) технологически не только затруднительно, но и нецелесообразно по следующим причинам:

- 1) частота вращения ротора есть величина, непрерывно изменяющаяся во времени $F(t)$, тогда реальные процессы обладают свойством периодичности на ограниченных интервалах времени;
- 2) АЦП имеют постоянную частоту дискретизации $F'_{\text{дискр.}} = F_{\text{дискр.}} \pm 10^{-6}$;
- 3) библиотечные процедуры обработки периодических сигналов предназначены для равномерного шага дискретизации.

Таким образом, несинхронность является неотъемлемым свойством дискретных выборок процесса, обладающего свойством периодичности.

Для количественной оценки несинхронности при фиксированной частоте дискретизации введём показатель K_F - кратность соотношения частоты дискретизации и частоты вращения ротора

$$K_F = \frac{F_{\text{дискр.}}}{F}. \quad (4)$$

Реальному виброизмерительному сигналу $y(t)$ соответствует случайный процесс $K_F(t)$.

Теоретическое исследование погрешности совмещения выборок при несинхронных отсчетах

Механизм возникновения погрешности фильтрации регулярной составляющей виброизмерительного сигнала поясняет рис. 4. Непрерывная линия соответствует измеряемому процессу $s(t)$, пунктирная – результату измерения этого процесса $s(t - \Delta t_i)$. Величина погрешности оценки СКЗ регулярной составляющей виброизмерительного сигнала зависит от статистики случайного процесса $K_F(t) = F_{\text{дискр.}} / F(t)$.

Смещение момента синхронизации $t_{ц_i}$ смещает результат измерения по оси времени t в пределах одного цикла измерения на величину Δt_i

$$\Delta t_i = T_{ц_i} - T \ll T, \quad (5)$$

где $T_{ц_i}$ – период синхронизатора при i -ом цикле синхронизации, величина случайная; T – период повторения измеряемого процесса, величина постоянная для всех циклов синхронизации.

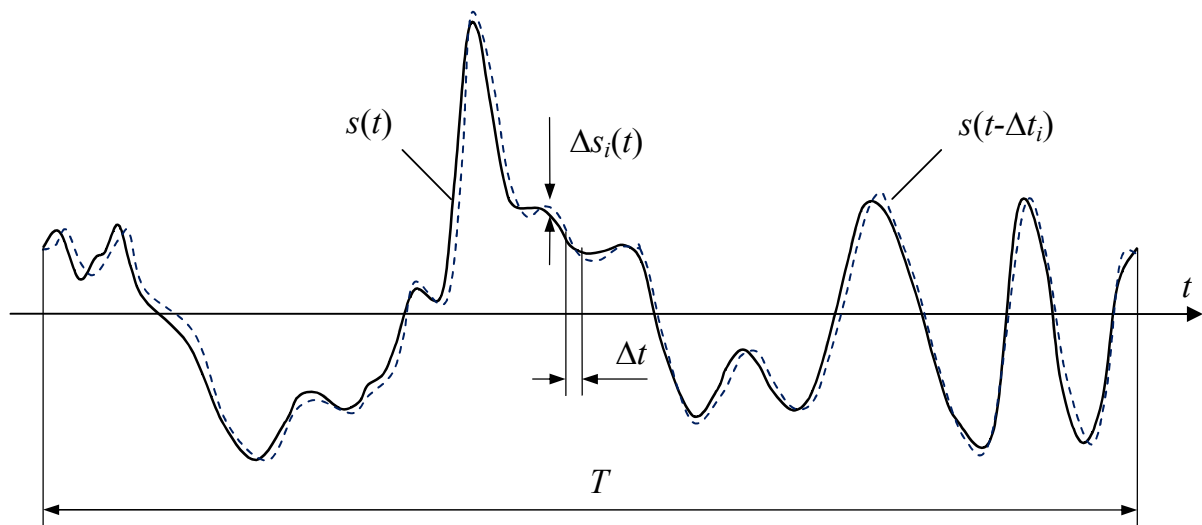


Рис. 4. Погрешность фильтрации регулярной составляющей виброизмерительного сигнала

Погрешность измерения процесса $s(t)$, вносимой синхронизатором назовем процесс

$$\Delta s_i(t) = s(t - \Delta t_i) - s(t), \text{ при } t \in T_{ц_i}$$

В пределах одного цикла измерения статистика $\Delta s_i(t)$ определяется только статистикой оценки измеряемого процесса $w[\hat{s}(\Delta t_i)]$, что позволяет считать зависимость $\Delta s_i(t)$ от Δt_i в пределах одного цикла измерения детерминированной. Найдем эту зависимость.

Мгновенные значения погрешности измерения, как видно на рис. 4, равны

$$\Delta s_i(t) = \frac{d}{dt} s(t) \cdot \Delta t_i. \quad (6)$$

Систематическая погрешность определяется соотношением

$$\Delta s_i^{\text{сист.}}(t) = \frac{1}{T_{\text{ци}} T_{\text{ци}}} \int \Delta s(t) dt = \frac{1}{T_{\text{ци}}} \left[\int_T \Delta s(t) dt + \int_{\Delta t_i} \Delta s(t) dt \right]. \quad (7)$$

Поскольку процесс $s(t)$ – периодический, то первое слагаемое тождественно равно нулю. С учетом соотношений (5), (6) и приближения систематическая погрешность равна

$$\Delta s_i^{\text{сист.}}(t) = \frac{\Delta t_i}{T_{\text{ци}} \Delta t_i} \int \frac{d}{dt} s(t) dt \cong \frac{\Delta t_i}{T} \cdot \frac{d}{dt} s(t_{\text{ци}}) \Delta t_i. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что систематическая погрешность определяется значением скорости изменения процесса $s(t)$ в момент синхронизации, что так же видно из рис. 4.

Примем, что значение скорости изменения процесса $s(t)$ определяется эффективной шириной его спектра $\Delta F_{\text{эфф.}}$. Тогда порядок систематической погрешности определим соотношением

$$|\Delta s_i^{\text{сист.}}(t)| < \frac{\Delta t_{\text{max}}^2}{T} \cdot 2\pi \cdot \Delta F_{\text{эфф.}} \cdot s_{\text{max}}.$$

Так, например, для штатного тахометра, установленного на турбоэлектрическом агрегате

$$\Delta t_{\text{max}} = T \cdot \frac{1}{3000}, \quad \Delta F_{\text{эфф.}} \leq 20 \cdot F, \quad F = 50 \text{ Hz},$$

$$|\Delta s_i^{\text{сист.}}(t)| < \left(\frac{T}{3000} \right)^2 \cdot 2\pi \cdot \frac{20F}{T} \cdot s_{\text{max}} = \frac{40\pi}{3000^2} = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot s_{\text{max}}.$$

Второй начальный момент погрешности i -го цикла измерения определяется соотношением

$$\mu_{2_i} = \frac{1}{T_{\text{ци}} T_{\text{ци}}} \int \Delta s_i^2(t) dt = \frac{\Delta t_i^2}{T_{\text{ци}} T_{\text{ци}}} \int \left[\frac{d}{dt} s(t) \right]^2 dt. \quad (9)$$

Поступая, так же, как и для оценки систематической погрешности, получим

$$\mu_2 < (\Delta t_{\max} \cdot 2\pi \cdot \Delta F_{\text{эфф.}})^2 \frac{1}{T} \int_T s^2(t) dt.$$

Тогда относительная величина второго начального момента погрешности составит

$$\mu_{2_i}^{\text{отн.}} = \frac{\mu_{2_i}}{\sigma_S^2} < (\Delta t_{\max} \cdot 2\pi \cdot \Delta F_{\text{эфф.}})^2.$$

Для тех же численных значений параметров получаем

$$\mu_{2_i}^{\text{отн.}} < \left(\frac{T}{3000} \cdot 2\pi \cdot 20F \right)^2 = 0,04.$$

Сравнив численные значения оценок (1) и (2) можно считать, что погрешность синхронизации оценку измеряемого процесса не смещает, тогда оценка второго начального момента практически совпадает с оценкой дисперсии. С учетом принятых допущений, СКЗ погрешности оценки измеряемого процесса, вносимой погрешностью синхронизации, составляет $\sigma_{\text{синхр.}} < 0,2$.

Оценку погрешности, вносимой синхронизатором на каждом цикле измерения, можно выполнить численно. Для этого заменим в формуле (6) производную первой конечной разностью на сетке (t_{i-1}, t_i, t_{i+1}) с равномерным шагом дискретизации $h = 1/F_{\text{дискр.}}$.

$$\frac{d}{dt} s(t_{i,j}) \cong \Delta_{i,j} = \frac{s_{i,j+1} - s_{i,j-1}}{2h}, \quad (10)$$

где $s_{i,j}$ – отсчеты процесса $S(t)$, отнесенные к i -му циклу измерения, $j=1, N = T \cdot F_{\text{дискр.}}$.

Дисперсию погрешности найдем, представив формулу (9) для вычисления в дискретной форме

$$\sigma_i^2 = \frac{\Delta t_i^2}{T} \sum_{j=1}^N \left(\frac{s_{i,j+1} - s_{i,j-1}}{2h} \right)^2 h = \Delta t_i^2 (2h)^{-2} \frac{1}{N} (s_{i,j+1} - s_{i,j-1})^2, \quad (11)$$

Формула (11) позволяет вести мониторинг ошибки синхронизации.

Экспериментальное исследование метрологических характеристик устройства виброконтроля

Для экспериментального исследования метрологических свойств устройства виброконтроля использованы два показателя.

Относительная погрешность селекции регулярной составляющей

$$\delta s(K_F) = \frac{\Delta s(K_F)}{\sigma_s(K_F)}, \quad (12)$$

где $\Delta s = \sqrt{\langle \Delta s_j \rangle}$, область усреднения определяется двумя факторами: верхняя граница – длительностью состояния квазипериодичности; нижняя граница – требованием быстродействия;

$$\Delta s_j = \sqrt{\frac{1}{K_0} \sum_{k=0}^{K_0-1} (\hat{s}_{j-k} - s_{j-k})^2}.$$

Относительная погрешность показателя прецессии вала

$$\delta \sigma_s(K_F) = \frac{\Delta \sigma_s(K_F)}{\sigma_s(K_F)}, \quad (13)$$

где $\Delta \sigma = \sqrt{\langle \Delta \sigma_{s_j} \rangle}$, область усреднения определяется двумя факторами аналогично с формулой (12);

$$\Delta \sigma_{s_j} = \sigma_{\hat{s}_j} - \sigma_{s_j}.$$

Исследование погрешностей несинхронности выполнено тремя способами:

– путем обработки фрагментов записей виброизмерительных сигналов на действующей роторной машине;

– путём расчета, по методике теоретического исследования погрешности совмещения выборок при несинхронных отсчетах, зависимости верхнего уровня погрешности несинхронности от частоты дискретизации;

– численно на «ИИС аттестации электронных элементов и образцов контрольно-измерительной техники».

При исследовании погрешностей частота вращения ротора находилась в диапазоне $F = 50 \pm 0,5$ Hz.

Фрагмент результатов обработки записей виброизмерительных сигналов опорных подшипников роторной машины показан в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты обработки записей виброизмерительных сигналов

Номер выборки	Частота вращения ротора F , Hz	Кратность отношения частот дискретизации и вращения ротора, K_F	Отношение регулярной и случайной составляющих виброизмерительного сигнала, $q = \sigma_s / \sigma_n$	Эффективная полоса спектра, $\Delta F_{эфф.}$, Hz	Относительная погрешность селекции регулярной составляющей, $\delta s(K_F)$	Относительная погрешность показателя прецессии вала, $\delta \sigma_s(K_F)$
1	49,4969	82,7527	0,7115	525	0,1384	-0,0314
2	49,4967	82,7530	0,7384	520	0,1025	-0,0117
3	49,5718	82,6276	0,7183	540	0,1853	-0,0218
4	49,5774	82,6183	0,6903	547	0,1813	-0,0212
5	49,6842	82,4407	0,7138	509	0,1275	-0,0185
6	49,6782	82,4507	0,7467	508	0,1862	0,0042
7	49,8276	82,2034	0,6885	488	0,1281	-0,0107
8	49,8450	82,1747	0,7375	508	0,1662	-0,0094
9	49,9924	81,9325	0,7554	497	0,1050	-0,0083
10	50,0023	81,9162	0,7193	461	0,1155	-0,0103
11	50,0810	81,7875	0,7238	473	0,1080	-0,0212
12	50,0812	81,7872	0,6954	454	0,2444	0,0093

Частота дискретизации типового устройства виброконтроля (рис. 1) составляла $F_{дискр.} = 4096$ Hz. Для этой частоты кратность соотношения частот дискретизации и вращения ротора лежит в пределах $K_F = 81,11...82,75$.

Результаты расчета по методике теоретического исследования погрешности совмещения выборок при несинхронных отсчетах показывают, что погрешность минимизируется, если удовлетворяется соотношение

$$K_0 - 0,95 < K_F < K_0 + 0,95. \quad (14)$$

Зависимость относительной погрешности селекции регулярной составляющей от кратности отношений частот дискретизации и частоты повторения регулярной составляющей виброизмерительного сигнала для параметров типового устройства виброконтроля представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что выбор параметров может быть улучшен путем симметрирования рабочего предела K_F по сравнению с несимметричным пределом ($K_F = 81,11...82,75$). Найдём частоту дискретизации, обеспечивающую

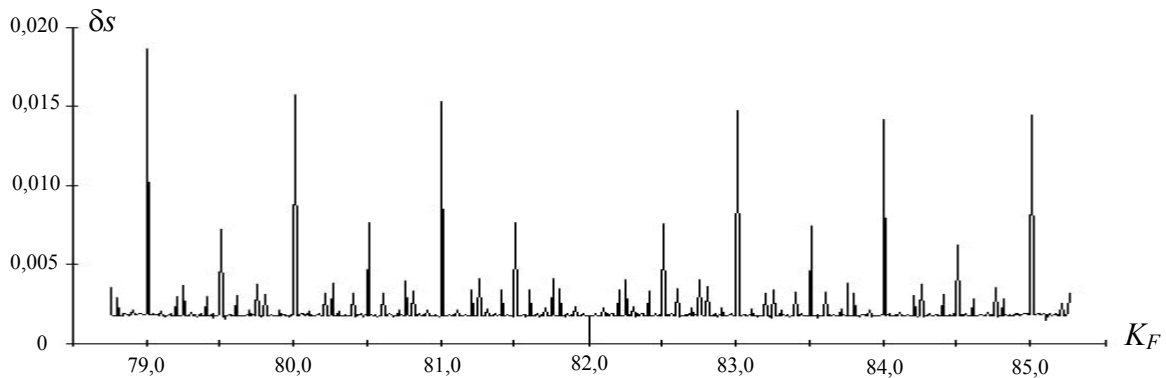


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности селекции регулярной составляющей от кратности соотношения частот дискретизации и вращения ротора

выполнение условия (14). Для этого, используя условие (14), получаем два уравнения

$$\frac{F_{\text{дискр.}}}{F_{\text{ном.}} + \Delta F} = K_0 - 0,95, \quad \frac{F_{\text{дискр.}}}{F_{\text{ном.}} - \Delta F} = K_0 + 0,95.$$

Совместное решение уравнений относительно $F_{\text{дискр.}}$ имеет вид

$$F_{\text{дискр.}} = 0,95 \frac{(F_{\text{ном.}} + \Delta F)(F_{\text{ном.}} - \Delta F)}{\Delta F}. \quad (15)$$

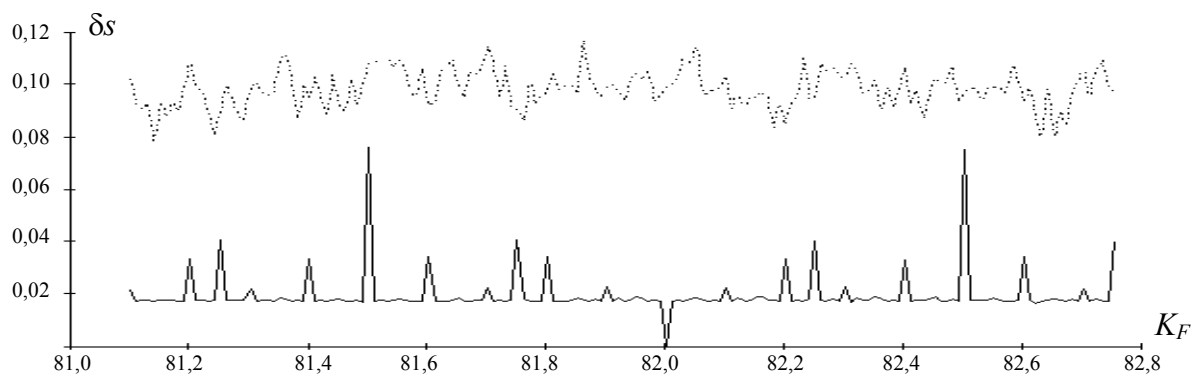
Тогда для предложенного устройства виброконтроля (рис. 2) получаем значение частоты дискретизации, минимизирующее погрешность измерения, $F_{\text{дискр.}} = 4600$ Hz.

Результаты численного исследования погрешностей несинхронности представлены на рис. 6 – рис. 8 и табл. 2. На рис. 6, б (непрерывная линия) показан эффект снижения относительной погрешности селекции регулярной составляющей в предложенном устройстве по сравнению с типовым (рис. 6, а) за счет применения частоты дискретизации, удовлетворяющей условию (14). На этих же рисунках показана

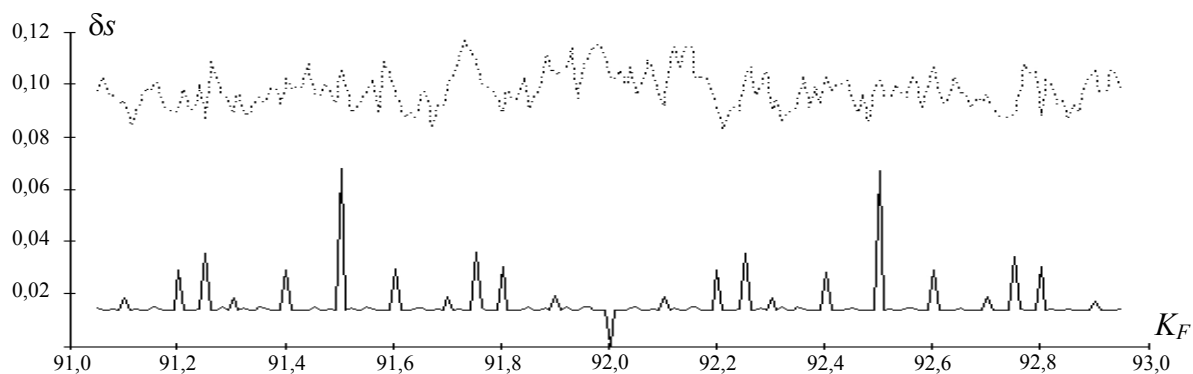
погрешность, вносимая случайной составляющей $n(t)$ независимо от ошибки регулярной составляющей (пунктирная линия).

Погрешность предложенного устройства виброконтроля (рис. 2) при обработке виброизмерительного сигнала вида (1) показана на рис. 7. Причем, на рис. 7, *а* показана зависимость относительной погрешности селекции регулярной составляющей от кратности соотношения частоты дискретизации и частоты вращения ротора при частоте дискретизации предложенного устройства равной частоте дискретизации типового устройства виброконтроля. На рис. 7, *б* показана эта же зависимость, но при значении частоты дискретизации, минимизирующей погрешность измерения.

Результаты на рис. 6 и рис. 7 получены для одной и той же реализации случайной составляющей. Уровень случайной составляющей соответствует данным табл. 1.



а)



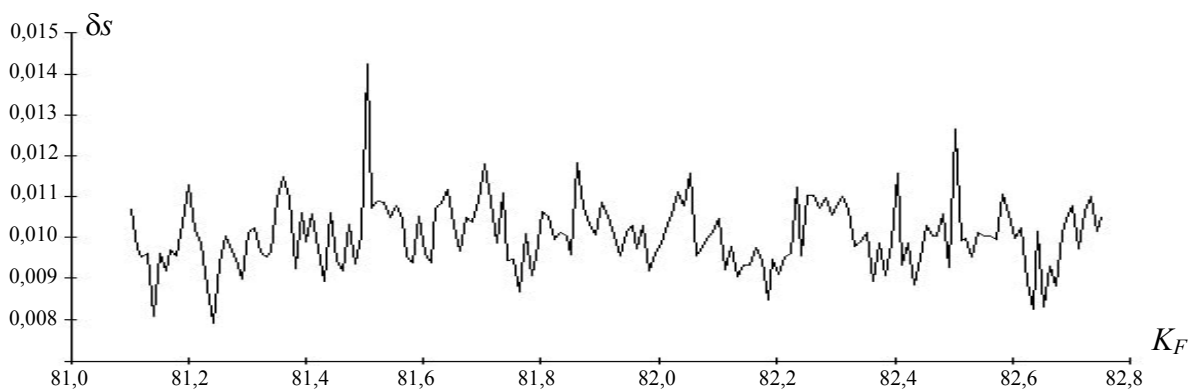
б)

Рис. 6. Зависимость относительной погрешности селекции регулярной составляющей от кратности соотношения частоты дискретизации и частоты вращения ротора $\sigma_{\hat{s}} = \sigma_{\hat{s}}(K)$ при раздельном воздействии регулярной (непрерывная линия) и случайной (пунктирная линия) составляющих виброизмерительного сигнала: *а*) – при параметрах типового устройства; *б*) – в предложенном устройстве

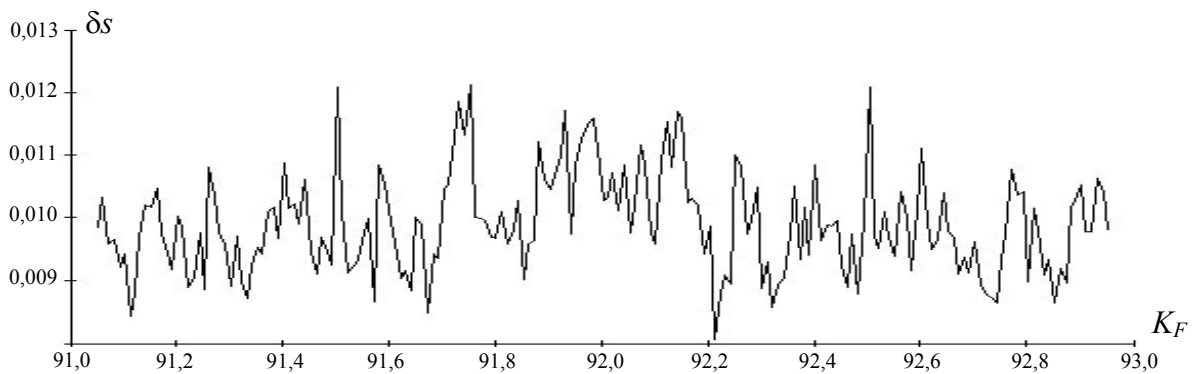
На рис. 8 показана зависимость относительной погрешности показателя прецессии вала от частоты повторения регулярной составляющей $\delta\sigma_s = \delta\sigma_s(F)$. На этом же рисунке показана плотность распределения частоты вращения ротора $w(F)$. Совместная обработка этих зависимостей позволяет количественно оценить и сравнить качество предложенного устройства при типовых и оптимизированных параметрах

$$\delta\sigma_s^{\text{обобщ.}} = \int_{\{F\}} \delta\sigma_s(F) \cdot w(F) \cdot dF. \quad (16)$$

Результаты вычисления обобщенного показателя (16) представлены в табл. 2.



a)



б)

Рис. 7. Зависимость относительной погрешности селекции регулярной составляющей от кратности соотношения частоты дискретизации и частоты вращения ротора $\sigma_s = \sigma_s(K)$ при совместном воздействии регулярной и случайной составляющих виброизмерительного сигнала: а) – при параметрах типового устройства; б) – в предложенном устройстве

Таблица 2.

Зависимость значения обобщенного показателя от входного сигнала

Частота дискретизации, Hz	4096	4600
$\delta\sigma_s^{\text{обобщ.}} (Y = S, N = 0)$	0,0199	0,0148
$\delta\sigma_s^{\text{обобщ.}} (Y = N, S = 0)$	0,0998	0,0994
$\delta\sigma_s^{\text{обобщ.}} (Y = S + N)$	0,1016	0,1006

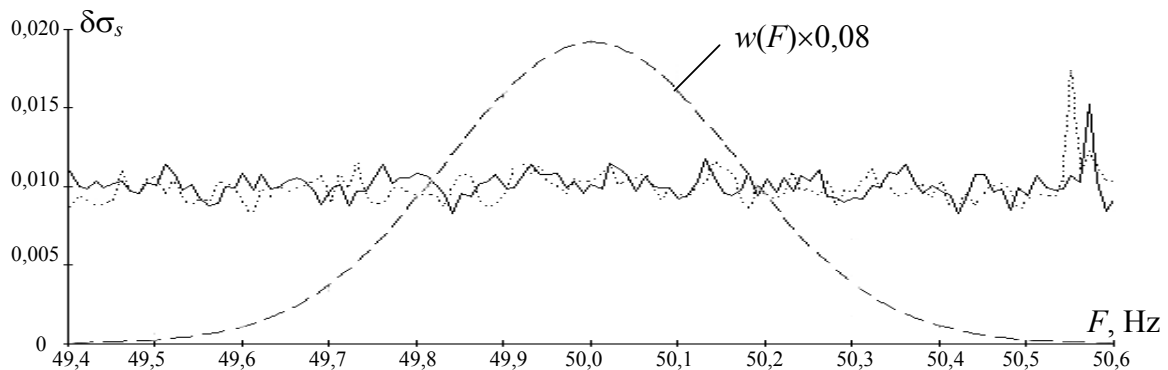


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности показателя прецессии вала от частоты повторения регулярной составляющей типовой (непрерывная линия) и предложенного (пунктирная линия) устройств виброконтроля и плотность распределения частоты вращения ротора

Анализ экспериментальных результатов позволяет обосновать методику выбора значений рабочих параметров селектора регулярной составляющей виброизмерительного сигнала: частоты дискретизации; времени релаксации.

Результаты оценки статистики СКЗ виброскорости $w(\sigma_y)$ и статистики СКЗ прецессии вала $w(\sigma_s)$ позволяют оценить повышение информативности предложенного устройства виброконтроля по сравнению с типовым. Для действующей роторной машины при равных условиях принятия решения в основном и вспомогательном каналах предложенного устройства виброконтроля информативность возрастает примерно в два раза по сравнению с типовым устройством виброконтроля. Отмеченное свойство позволяет улучшить защиту роторной машины за счёт повышения информативности устройства виброконтроля.

Выводы

Разработан метод измерения интенсивности регулярной составляющей виброизмерительного сигнала и предложено устройство виброконтроля, которое обеспечивает защиту опорных подшипников роторной машины по двум показателям (СКЗ виброскорости σ_y и СКЗ прецессии вала σ_s), в отличие от типового устройства виброконтроля и защиты ВВК-331М. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность предложенного устройства виброконтроля.

Установлены параметры предложенного устройства виброконтроля для электромеханических агрегатов, работающих на частоте $50 \pm 0,5$ Hz, что обеспечивает требование [1] на время реакции защиты на отказ роторной машины. Показана принципиальная возможность применения обработки несинхронных выборок во временной области, что, по сравнению с обработкой в частотной области, уменьшает время реакции защиты на отказ роторной машины.

Выполнена оценка метрологических характеристик предложенного устройства виброконтроля и найдена максимальная погрешность оценки показателя интенсивности воздействия на опорные подшипники прецессии вала ротора.

Результаты теоретического и экспериментального исследований совмещения выборок периодического процесса при несинхронных отсчетах позволяют принимать обоснованные решения при разработках устройств защиты в условиях периодических воздействиях в других диапазонах частот.

Дальнейшие исследования предложенного метода измерения интенсивности регулярной составляющей виброизмерительного планируется провести с целью определения эффективности устройства виброконтроля с применением селекции периодической регулярной составляющей в частотной области.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 25364-97 Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – К.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
2. *Генкин М.Д., Соколова А.Г.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов. –М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.: ил.
3. BS ISO 10816-2-2001 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 2. Наземные паровые турбины и генераторы мощностью свыше 50 МВт

со скоростями вращения 1500, 1800, 3000 и 3600 об/мин. – М.: Издательство стандартов, 2002.

4. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. –М.: Мир, 1989. – 540 с.: ил.