

# ДИАГНОСТИКА РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МИКРОВАРИАЦИЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

**А.С. Колоколов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: kolokolov\_as@mail.ru

**П.П. Вороничев**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: voronich@ipu.ru

**Ключевые слова:** роторное оборудование, диагностика, датчик частоты вращения, микровариации вращения вала.

**Аннотация:** Предложен способ диагностики роторного оборудования, основанный на анализе микровариаций вращения вала. Эффективность метода подтверждена на примере диагностики хвостового редуктора вертолета и оценки деградации синхронного двигателя на данных, полученных в процессе проведения ресурсных испытаний двигателя. В процессе разработки способа предложена процедура нормализации результатов измерения микровариаций, позволяющая использовать его для диагностики роторного оборудования с медленно изменяющейся во времени частотой вращения ротора.

## 1. Введение

Роторное оборудование представляет собой широкий класс изделий, включающий в себя турбины, газотурбинные двигатели, турбохолодильники, трансмиссии, редукторы, двигатели, стартеры и генераторы. Характерным свойством перечисленного оборудования является наличие в нем вращающихся элементов, подвергающихся в процессе работы механическому износу. Такими элементами являются валы, роторы, шестерни и подшипники.

В процессе эксплуатации роторного оборудования крайне важной задачей является контроль состояния его элементов, выход из строя которых может приводить к весьма нежелательным последствиям, авариям и даже катастрофам. В связи с этим в настоящем сообщении предлагается способ диагностики роторного оборудования, основанный на анализе микровариаций вращения вала, и приводятся результаты его тестирования на примере синхронного двигателя.

В основе предлагаемого способа используется гипотеза, согласно которой развитие дефектов роторного оборудования обусловлено возникновением и ростом микродефектов в материале его взаимодействующих рабочих элементов. Рост микродефектов в свою очередь приводит к прогрессивному росту амплитуды микровариаций мгновенной частоты  $\omega(t)$  или мгновенного периода  $T(t) = 2\pi/\omega(t)$  вала. Таким образом, оценивая и анализируя микровариации  $\omega(t)$  или  $T(t)$  можно делать выводы относительно состояния роторного оборудования.

## 2. Описание предлагаемого способа

Поясним реализацию предлагаемого способа диагностики на примере использования для регистрации неравномерности вращения вала датчика частоты вращения (ДЧВ), создающего при вращении вала импульсы в моменты, когда угол вала принимает значения  $\varphi = \Delta\varphi n$ , где  $\Delta\varphi = 360/N$ ,  $N$  – целое число, определяющее число импульсов создаваемых датчиком на обороте вала,  $n = 0, 1, 2, \dots$  – номер импульса. В результате на выходе ДЧВ получается аналоговый сигнал  $s(t)$ , представляющий собой последовательность импульсов.

Оценка величины микровариаций вращения вала реализуется выполнением следующей последовательности операций обработки сигнала  $s(t)$  с ДЧВ:

1. Находятся моменты времени  $t_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) пересечения  $s(t)$  порогового уровня  $\theta_0$ , когда  $ds(t)/dt > 0$ . В результате образуется последовательность  $p_0(i) = \{t_i\}$ . В случае использования оцифрованного сигнала  $s(k\Delta t)$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  и  $\Delta t$  – интервал дискретизации, для обеспечения точности оценивания  $t_i$  целесообразно использовать линейную интерполяцию значений  $s(k\Delta t)$ .

2. Вычисляются разности соседних элементов  $p_0(i)$ , в результате чего получается последовательность межимпульсных интервалов  $p(i) = \{v_i\} = \{t_{i+1} - t_i\}$ , элементы которой содержат информацию о микровариациях вращения вала. При этом  $v_i$  и оценка мгновенной частоты вращения вала  $\omega_i$  связаны соотношением  $v_i = \Delta\varphi/\omega_i = 2\pi/(N\omega_i)$ . Из чего можно заключить, что как  $v_i$ , так и  $\omega_i$  могут быть использованы для оценивания величины микровариаций вращения вала. Однако в виду использования индукционного или другого подобного ДЧВ нам представляется целесообразным оценивать микровариации вращения вала на основе  $v_i$ .

3. Далее для последовательности  $p(i)$  находят центрированную последовательность  $p_c(i) = \{v_i - \bar{v}\}$ , где  $\bar{v}$  – среднее значение элементов  $v_i$ , и средний квадрат  $\sigma$  элементов  $p_c(i)$ .

4. При превышении величины  $\sigma$  определенного значения делается вывод о наличии дефекта в роторном оборудовании.

Как можно видеть реализация микровариационного подхода не требует существенных вычислительных ресурсов.

Изложенный выше способ диагностики, был применен и продемонстрировал свою эффективность в задаче диагностики хвостового редуктора вертолета, обеспечивающего вращения хвостового винта с постоянной скоростью [1].

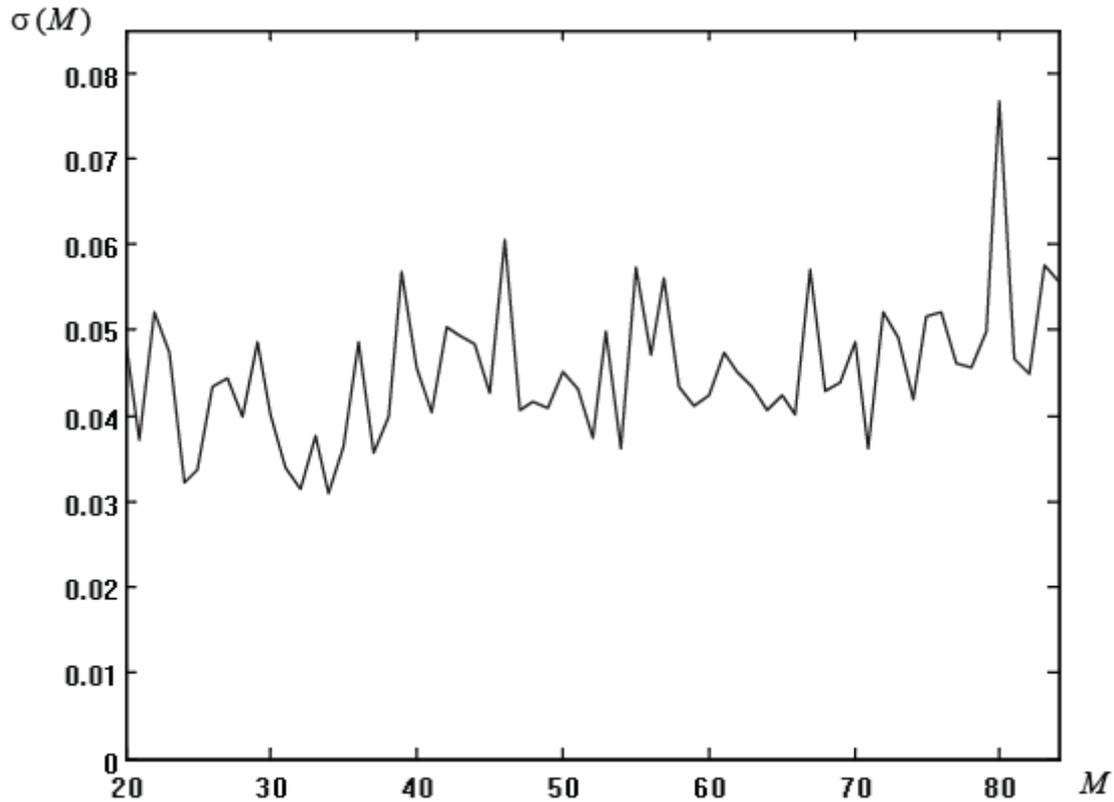
Экспериментальное исследование и развитие предложенного способа диагностики на основе анализа микровариаций вращения вала было выполнено на основе данных, полученных в процессе проведения стендовых испытаний трехфазного синхронного двигателя U5 KV400 с двухлопастным пропеллером из углеродного волокна P15x5 дюйма [2]. В процессе испытаний запуск двигателя и поддержание скорости вращения его вала, равной 100 Гц (6000 об/мин), производились с помощью контроллера AIR 40A.

Для фиксации микровариаций вращения вала двигателя использовался оптический ДЧВ с параметром  $N = 2$ , который создавал импульсы в моменты пересечения пропеллером инфракрасного луча.

Сигнал  $s(t)$  с ДЧВ регистрировался с помощью 16-разрядного АЦП серии E-502 (производитель L-Card). Регистрация  $s(t)$  производилась в заданное время раз в сутки при частоте дискретизации 100 кГц и времени измерения 0,5 мкс. При каждой регистрации записывалось 1000000 отсчетов  $s(k)$ . Для каждой полученной записи  $s(k)$  в соответствии с вышеописанной процедурой находились последовательность

межимпульсных интервалов  $p(i) = \{v_i\} = \{t_{i+1} - t_i\}$ , центрированная последовательность  $p_c(i) = \{v_i - \bar{v}\}$  и средний квадрат  $\sigma$  элементов  $p_c(i)$ .

На рис. 1 приведены значения  $\sigma(M)$  в функции номера записи  $M$ . Из него можно видеть, что в полученной зависимости возрастание  $\sigma(M)$  с номером  $M$  плохо выражено и не позволяет сделать однозначного вывода о развитии процесса деградации двигателя.



**Рис. 1.** Зависимость  $\sigma(M)$ , полученная по результатам испытаний синхронного двигателя.

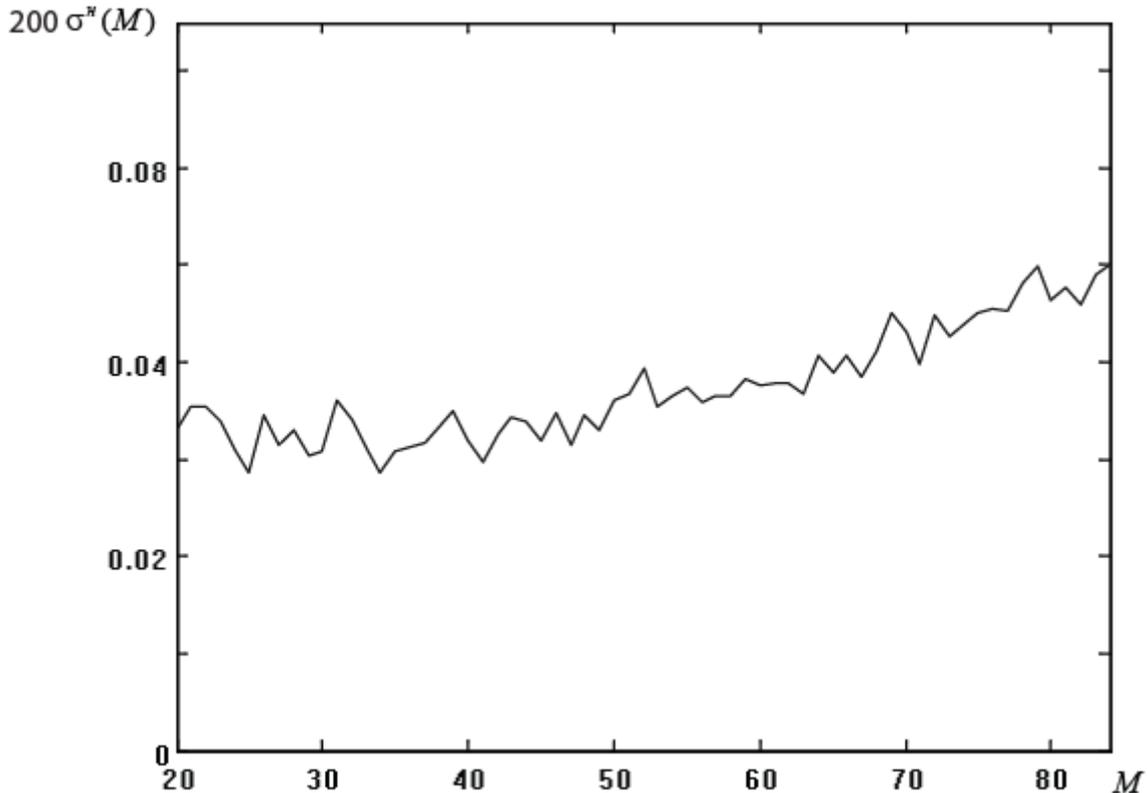
Проведенное исследование выявило, что причиной этого является не точное поддержание контроллером AIR 40А скорости вращения вала испытываемого двигателя при изменении температуры окружающей среды, что приводило к медленным флюктуациям частоты вращения и вносило значимую ошибку в измерение межимпульсных интервалов  $p(i)$ .

Для устранения этого нежелательного явления была предложена процедура нормализации измерений микровариаций с учетом текущего периода вращения вала. В результате этой процедуры из последовательности  $p(i)$  формируется новый, нормализованный временной ряд

$$p_c^H(i) = \frac{p(i)}{p(i)+p(i+1)} - 0.5,$$

где сумма  $p(i) + p(i + 1)$  является оценкой текущего периода вращения вала  $T(i)$ .

Полезность такой нормализации демонстрирует рис.2, на котором представлена полученная для нормализованных временных рядов  $p_c^H(i)$  зависимость  $\sigma^H(M)$ , где  $M$  – номер записи. Для упрощения сопоставления результатов на рис.1 и 2 значения  $\sigma^H(M)$  на рис. 2 были увеличены в 200 раз.



**Рис. 2.** Зависимость  $\sigma^H(M)$ , полученная по результатам испытаний синхронного двигателя.

Из приведенной на рис. 2 зависимости с очевидностью следует, что предлагаемая процедура нормализации позволяет снизить влияние медленных флуктуаций частоты вращения вала двигателя при оценке микровариаций вращения вала и обеспечит более качественное отслеживание развитие дефекта двигателя в процессе проведения ресурсных испытаний.

В связи с этим следует заметить, что предложенный способ диагностики состояния роторного оборудования, основанный на анализе микровариаций вращения вала и дополненный процедурой нормализации, имеет явное преимущество перед методами диагностики, базирующимися на анализе вибрации [3,4], применимыми исключительно в случаях постоянной скорости вращения вала.

### 3. Заключение

Предложен способ диагностики роторного оборудования на основе анализа микровариаций вращения вала. Эффективность способа продемонстрирована на задачах диагностики хвостового редуктора вертолета и отслеживания деградации синхронного двигателя при проведении ресурсных испытаний. В процессе исследования способа предложена процедура нормализации результатов измерения микровариаций, позволяющая существенно улучшить качество отслеживания деградации роторного оборудования при медленных изменениях скорости вращения вала.

Впоследствии в процессе проведения стендовых испытаний синхронного двигателя планируется провести работы по разработке безпропеллерного ДЧВ с улучшенными метрологическими характеристиками, что обеспечит меньшую погрешность измерения

микровариаций вращения вала для получения более точной оценки степени деградации произвольного роторного оборудования.

### Список литературы

1. Колоколов А.С., Вороничев П.П. Способ диагностики роторного оборудования на основе анализа микровариаций вращения вала // Датчики и системы. 2022. № 2. С. 35-40.
2. Колоколов А.С. , Вороничев П.П. Диагностика подшипников роторного оборудования на основе анализа микровариаций вращения вала // Датчики и системы. 2020. № 12. С. 54-58.
3. Mark W.D. Analysis of the vibratory excitation of gear systems: Basic theory // J. Acoust. Soc. Am. 1978. Vol. 63, No. 5. P. 1409-1430.
4. Колоколов А.С., Вороничев П.П. Исследование составляющих вибрационного процесса роторного оборудования на примере синхронного двигателя // Датчики и системы. 2023. № 6. С. 52-55.