

УДК 531.781.2

ДИСКРЕТНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИОННОГО
СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН
DISCRETE-PHASE METHOD FOR CONTROLLING THE VIBRATION
STATE OF STEAM TURBINE BLADES

Д.А. Степанов

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

D. Stepanov

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: в статье рассматривается дискретно-фазовый метод контроля вибрационного состояния лопаток паровых турбин. Данный метод представляет новую технологию управления виброустойчивостью лопаточных групп, основанную на использовании современных компьютерных моделей и алгоритмов обработки данных. Использование системы диагностики и прогнозирования виброволн в процессе работы турбины, в основе которого лежит дискретно-фазовый метод позволяет своевременно выявить неисправности и принять меры по их устранению. Результаты исследований показывают высокую эффективность применения предложенной технологии и ее перспективность для повышения безопасности эксплуатации паровых турбин.

Abstract: the article discusses a discrete-phase method for monitoring the vibration state of steam turbine blades. This method represents a new technology for controlling the vibration resistance of blade groups, based on the use of modern computer models and data processing algorithms. The use of a system for diagnosing and predicting vibration waves during the operation of the turbine, which is based on the discrete-phase method, allows timely detection of malfunctions and taking measures to eliminate them. The research results show the high efficiency of the proposed technology and its prospects for improving the safety of operation of steam turbines.

Ключевые слова: вибрационное состояние лопаток, дискретно-фазовый метод, колебания, число оборотов ротора турбины, датчики, динамические напряжения, полумуфта.

Keywords: vibration state of the blades, discrete-phase method, oscillations, number of revolutions of the turbine rotor, sensors, dynamic voltages, coupling halves.

Введение

При эксплуатации паровых турбин существуют режимы, при которых вибрационное состояние лопаток не может быть обследовано не только при испытаниях в Кемпбелл-машине, но даже и в экспериментальных турбинах. К таким режимам относятся, например, синхронизация турбины, сброс нагрузки, возможность и интенсивность кинематического возбуждения колебаний лопаток вследствие вибрации ротора, а также аварийные режимы работы турбоагрегата (например, останов со срывом вакуума или короткое замыкание генератора).

Естественно, что получение ответов на вопросы о вибрационном состоянии лопаток при этих режимах возможно только при осуществлении непрерывного контроля их состояния в условиях эксплуатации.

Основная часть

Одним из методов контроля является дискретно-фазовый метод (ДФМ), который представляет собой устройство, используемое для измерения времени прохождения лопатки мимо неподвижных точек на ее пути [1]. Оно состоит из двух датчиков, размещенных на разных высотах лопатки. Обычно используется индукционный датчик, который имеет магнитный сердечник круглого сечения с обмоткой из проволоки. Сердечник и обмотка помещены в стальной корпус, образуя разомкнутый магнитопровод. Когда лопатка, выполненная из магнитного материала, проходит мимо датчика, изменяется магнитный поток, проходящий через сердечник. Это приводит к индукции электродвижущей силы (э.д.с.) в обмотке датчика. Величина этой э.д.с. пропорциональна изменению магнитного потока по времени ($d\Phi/dt$). График изменения величин Φ и $d\Phi/dt$ во времени показан на рисунке 1.

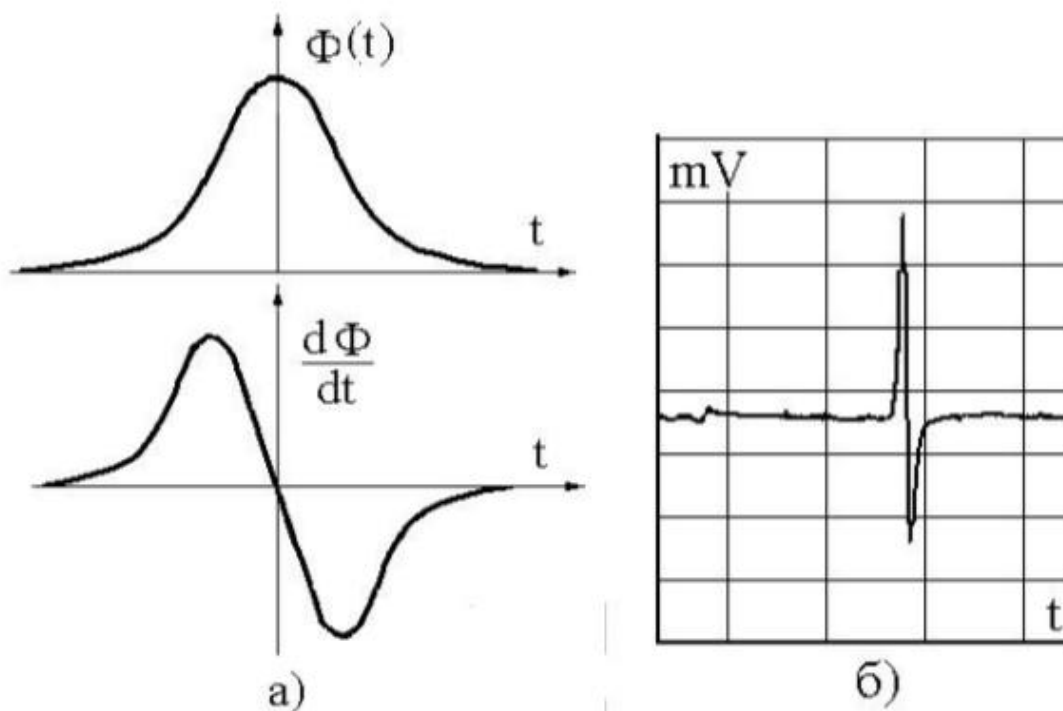
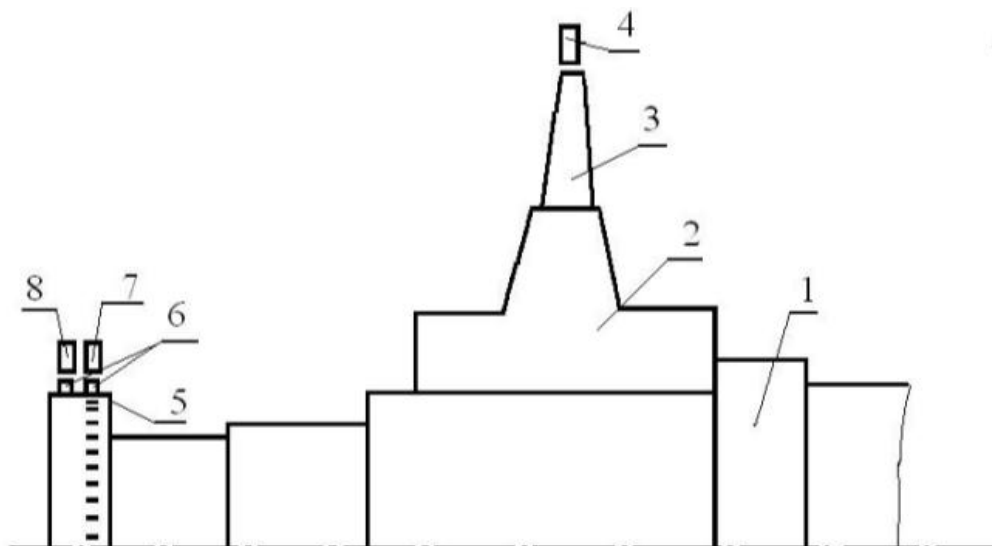


Рисунок 1 – Зависимость величин Φ и $d\Phi/dt$ от времени (а) и типичная зависимость от времени показаний индукционного датчика (б) [2]

При прохождении лопатки мимо датчика, необходимо точно зарегистрировать момент, когда происходит условие $d\Phi/dt=0$ ($\Phi=\Phi_{\max}$). Разница в моментах прохождения лопатки мимо первого и второго датчиков, установленных в разных поперечных сечениях, будет характеризовать только разницу в их окружных положениях, если нет колебаний. После возникновения колебаний, изменение этой разницы будет пропорционально разнице амплитуд колебаний лопатки в сечениях, где установлены датчики. Для правильной нумерации лопаток и определения коэффициента пропорциональности между временными и линейными величинами, необходимо установить датчик, который

будет регистрировать число оборотов ротора турбины (оборотный датчик) [1]. Естественно, что целесообразно один из датчиков установить вблизи вершины лопатки (периферийный датчик), а другой – в сечении, где колебания отсутствуют (корневой датчик). Кроме того, для правильной нумерации лопаток и определения коэффициента пропорциональности между временными и линейными величинами, необходимо установить датчик, регистрирующий число оборотов ротора турбины (оборотный датчик). Периферийный датчик целесообразно разместить против торцов вращающихся лопаток, а корневой и оборотный – вообще вынести из пределов проточной части. Установка датчиков в проточной части может привести к изменению окружной неравномерности потока и увеличению динамических напряжений в лопатках. Кроме того, при переходных режимах возможны осевые задевания и механические повреждения лопаток и датчиков. В паровых турбинах корневой и оборотный датчики изначально размещались в корпусе подшипника рядом с полумуфтой ротора. Для измерения оборотов на цилиндрической поверхности полумуфты необходимо создать специальный выступ или прорезь. Для измерений с помощью корневого датчика количество равномерно расположенных выступов или прорезей должно быть равно количеству лопаток в исследуемой ступени. В современной регистрирующей аппаратуре ДФМ замер интервалов времени осуществляется следующим образом: в момент перехода через нуль сигнала корневого датчика начинается отсчёт числа временных импульсов, вырабатываемых аппаратурой с весьма высокой стабильной частотой; отсчёт заканчивается в момент перехода через нуль сигнала периферийного датчика. Частота следования импульсов выбирается столь высокой (например, 40 МГц), чтобы достаточно точно измерить даже весьма малые амплитуды колебаний лопаток. Действительно, погрешность при определении амплитуд зависит от расстояния, проходимого периферийным сечением лопатки за время между двумя последующими импульсами. В отечественных паровых турбинах максимальная окружная скорость в периферийных сечениях лопаток достигает 660 м/с. Даже при столь высокой окружной скорости и частоте опроса 40 МГц погрешность определения амплитуды составляет всего 0,0165 мм. Для более коротких лопаток, а также при пусковых режимах погрешность уменьшается прямо пропорционально окружной скорости периферийного сечения лопатки [2]. Погрешность при определении оборотов с использованием частоты опроса 40 МГц даже при номинальной частоте вращения составит всего 0,00375 об/мин. Типовая схема размещения датчиков ДФМ при стандартном способе измерений имеет вид, изображённый на рисунке 2.



1 – ротор турбины; 2 – диск; 3 – рабочая лопатка; 4 – периферийный датчик; 5 – полумуфта ротора; 6 – выступы (или прорези) на полумуфте; 7 – корневой датчик; 8 – оборотный датчик
Рисунок 2 – Стандартная методика размещения датчиков ДФМ [2]

Процесс измерений осуществляется следующим образом: после прохождения выступа на полумуфте мимо обратного датчика, на одном из каналов измерительной аппаратуры начинается отсчет временных импульсов, который заканчивается в момент повторного прохождения выпуклости мимо обратного датчика. Таким образом, узнается число импульсов, которое соответствует длине окружности в периферическом сечении лопатки и, следовательно, линейное расстояние, которое пройдет вершина лопатки за время между последующими импульсами при данных оборотах ротора. При прохождении одного из выступов на полумуфте мимо корневого датчика начинается отсчет временных импульсов на другом канале измерительной аппаратуры, который заканчивается при прохождении лопатки мимо периферического датчика. Посчитанное число импульсов сохраняется в памяти компьютера, и вычисления повторяются для остальных "пар" выступов на полумуфте и лопатках на колесе. Поскольку на основе показаний обратного датчика известно, какое окружное расстояние пройдет периферическое сечение лопатки за время между двумя последующими импульсами, то для каждой из лопаток можно вычислить расстояния S_i , которые определяются разницей угловых координат данного выступа на полумуфте и "соответствующей" ей лопатки. При увеличении оборотов и отсутствии колебаний лопаток, а также закручивания участка ротора между лопатками и полумуфтой, величины S_i теоретически остаются неизменными, так как уменьшение числа импульсов за время между прохождением выступа мимо корневого датчика и лопатки мимо периферического полностью компенсируется увеличением расстояния, пройденного периферическим сечением лопатки между двумя последующими импульсами [2]. Если при изменении оборотов возникнут резонансные колебания лопаток, то при последующих измерениях из-за постепенного увеличения амплитуды и изменения фазы колебаний величины S_i будут иметь изменения $\Delta S_{i(n)}$, которые являются функцией оборотов. В зависимости от

угловой координаты установки периферического датчика, величина $\Delta S_{i(n)}$ может быть как больше, так и меньше нуля или даже менять знак при прохождении резонанса. При отсутствии систематических погрешностей измерений величины S_i до и после прохождения резонанса должны быть одинаковыми. Если в определенной зоне оборотов возникнут рывковые колебания или автоколебания (не кратные числу оборотов ротора), то величины S_i при последующих измерениях будут иметь "хаотические" изменения разных знаков, так как фаза рывковых или автоколебаний при последующих измерениях будет изменяться произвольным образом.

Заключение

В данной работе был рассмотрен дискретно-фазовый метод контроля вибрационного состояния лопаток паровых турбин. Результаты исследований позволили сделать несколько выводов.

Во-первых, использование дискретно-фазового метода позволяет достичь высокой точности и надежности при контроле вибраций лопаток паровых турбин. Благодаря анализу фазовых сдвигов между сигналами, получаемыми от различных точек лопатки, можно точно определить место возникновения вибраций и их характер. Во-вторых, дискретно-фазовый метод позволяет проводить контроль вибраций в реальном времени. Это важно для оперативного реагирования на изменения вибрационного состояния лопаток, что в свою очередь позволяет предотвращать возможные аварийные ситуации и обеспечивает безопасность и надежность работы паровых турбин. Кроме того, дискретно-фазовый метод является достаточно простым в реализации и не требует сложного оборудования. Это позволяет его эффективно использовать как при осуществлении диагностики существующих паровых турбин, так и при проектировании новых.

Таким образом, использование дискретно-фазового метода контроля вибрационного состояния лопаток паровых турбин является перспективным и эффективным подходом. Он позволяет добиться высокой точности и надежности контроля, обеспечивает оперативность реагирования на изменения вибрационного состояния и может быть легко реализован как в диагностике, так и в проектировании паровых турбин.

Литература

1. Разновидности автоколебаний лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними [Электронный ресурс] / Разновидности автоколебаний лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raznovidnosti-avtokolebaniy-lopatok-parovyh-turbin-i-mery-borby-s-nimi/viewer/>. – Дата доступа: 10.10.2023.
2. Колебания рабочих лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними / К.Н. Боришанский. – Санкт-Петербург: [б.и.], 2011. – 323 с.