

## О РЕГИСТРАЦИИ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Представлен обзор методов регистрации крутильных колебаний валопровода турбогенератора. Рассмотрен принцип реализации данных методов, особенности работы и получения зависимости собственной частоты, формы и интенсивности крутильных колебаний. Показано, что крутильные колебания постоянно присутствуют в рабочем режиме турбогенератора.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, крутильные колебания, дискретно-фазовый метод, фазохронометрический метод.

Теоретические исследования качаний — крутильных колебаний вращающегося ротора синхронной электрической машины были начаты работами А. А. Горева и И. Д. Урусова. Важность изучения этого явления в прошлые годы была обусловлена необходимостью обеспечения устойчивой работы синхронной электрической машины, применяемой в качестве привода механизма, ходовая часть которого совершает возвратно-поступательное движение (поршневой компрессор) [1], [2].

Практический интерес они представляют для синхронных генераторов большой мощности, функционирующих в составе турбоагрегатов. При их включении в единую энергетическую систему начальное, рассогласование фаз токов ротора и статора в момент включения, может привести к формированию рывка, соответствующего динамическому удару. Они приводят к накоплению усталостных повреждений в материале ротора генератора в области его соединения с секцией валопровода цилиндра низкого давления турбины и, в конечном счете, к снижению прочности.

Среди методов измерения, контроля и регистрации динамических деформационных параметров лопаток известны оптоэлектронные способы реализации дискретно-фазового метода (ДФМ), предназначенные для определения деформаций динамически нагруженных лопаток вращающихся колес турбоагрегатов посредством определения угловых положений торцов лопаток. Сущность метода заключается в том, что торец лопатки, деформированной при вращении лопаточного колеса, отклоняется от первоначального положения на некоторый ее угол [3–5].

К таким методам исследования также относят фазохронометрический метод измерения с использованием токовых вихревых и индуктивных датчиков (рис. 1). В качестве информационной поверхности используется чередование условной пары «выступ — паз», к примеру, шестерни валопроводного устройства, имеющиеся на всех турбоагрегатах и расположенных, как правило, на роторе низкого давления со стороны генератора.

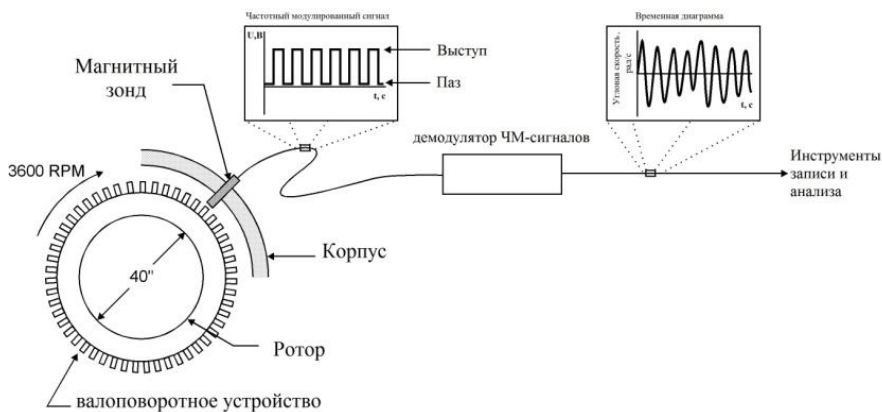


Рис. 1. Измерение закручивания валопровода

В их основу положен физический принцип зависимости отражающих свойств поверхностей материалов от качества их обработки и частоты электромагнитного излучения. Сущность такого метода измерения базируется на преобразовании дискретных перемещений контролируемых элементов в пределах каждого оборота [6–7].

К процессам, которым уделяется внимание, относятся включение генератора во внешнюю сеть и его отключение от нее. До внедрения автоматических систем управления синхронизация взаимодействия (согласование фаз токов) ротора генератора и сети осуществлялась перед включением генератора в ручном режиме, а поэтому была не всегда удачной.

Измерения крутильных колебаний ротора проводятся, если возможно, в трех местах. Расположение «крутильных» датчиков основаны на сочетании таких параметров как доступность к валу, наличие уже существующих датчиков, которые могут дублировать необходимые типы датчиков (частота вращения вала) и участки валопровода, с которых можно получить результаты.

В качестве примера на рис. 2 схематически представлена ступень лопаточной ЭУ. Здесь элементы конструкции ротора (диск колеса и вал) при их вращении совершают угловые статические (в виде закрутки) и динамические (в виде колебаний) перемещения относительно оси вала  $OO$ , а также линейные перемещения в направлении осей  $X$  и  $Y$ .

Под действием рабочего тела (газовоздушной смеси или жидкости) на лопатки ЭУ их торцы подвергаются осевым перемещениям (ОП) вдоль оси  $X$  и радиальным перемещениям (в пределах рабочего зазора — РЗ) вдоль оси  $Y$  (рис. 3). Торец лопатки в результате закрутки её пера может совершать статические и динамические угловые перемещения (УП) в пределах некоторого угла  $\varphi$  [3].

Расстояние между датчиками было выбрано таким образом, чтобы при возникновении срывных или дисковых колебаний показания были близкими к максимальным.

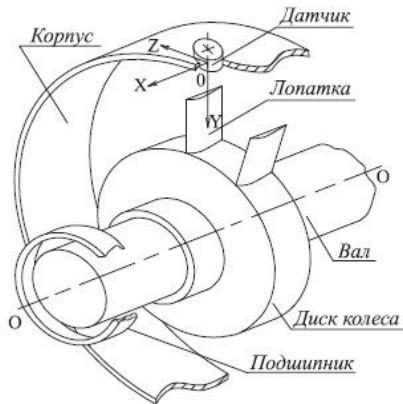


Рис. 2. Элементы ротора лопаточной энергетической установки

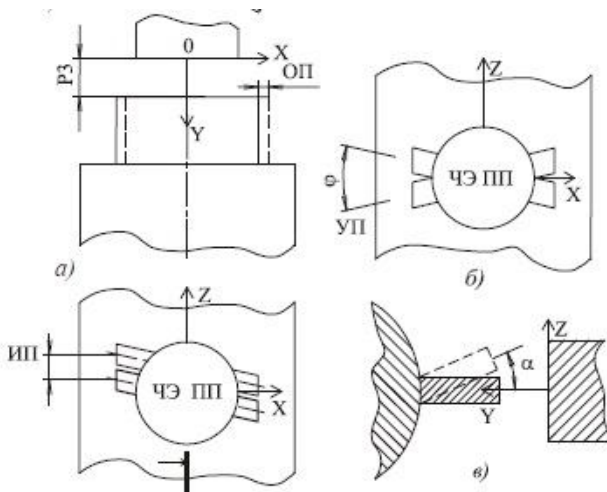


Рис. 3. Развёртка лопаточного венца с линейными (а) и угловыми (б, в) перемещениями лопаток

Программой обработки результатов измерений предусмотрена возможность определения оборотов ротора не только с помощью «обычного оборотного», но и «лопаточного» датчика ДФМ, для чего при измерениях учитывается сигнал, поступающей только от одной лопатки. С помощью этого способа была одновременно определена интенсивность крутильных колебаний в 4 сечениях по длине валопровода.

Непосредственным результатом измерений является время между заданными метками, определенное с очень высокой точностью, а при большом количестве меток за один оборот или некоторое конечное количество оборотов вала — «Перидиограмма». Перидиограмма характеризует не крутильные колебания, а переменную угловую скорость валопровода или ротора.

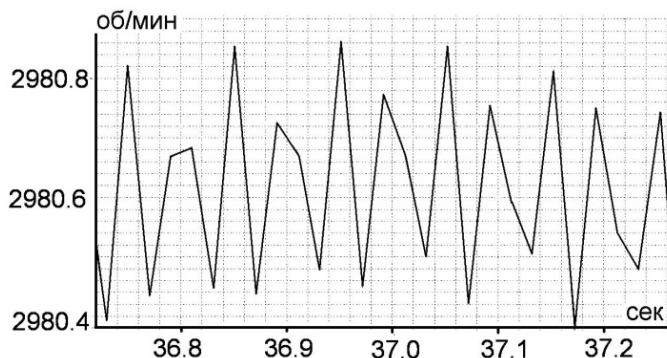


Рис. 4. Зависимость скорости от времени в процессе сброса нагрузки

Измерения проводились, как правило, в процессе сброса нагрузки. Также обнаружено влияние импульсов из внешней цепи на вращение валопровода в процессе функционирования, влияние которых адекватно учитывалось при оценке ресурса валопровода включениям и выключениям генератора из внешней сети.

Как показывают измерения, синхронизация ротора генератора с внешней сетью сопровождалась резким торможением валопровода ТА с последующими его затухающими крутильными колебаниями.

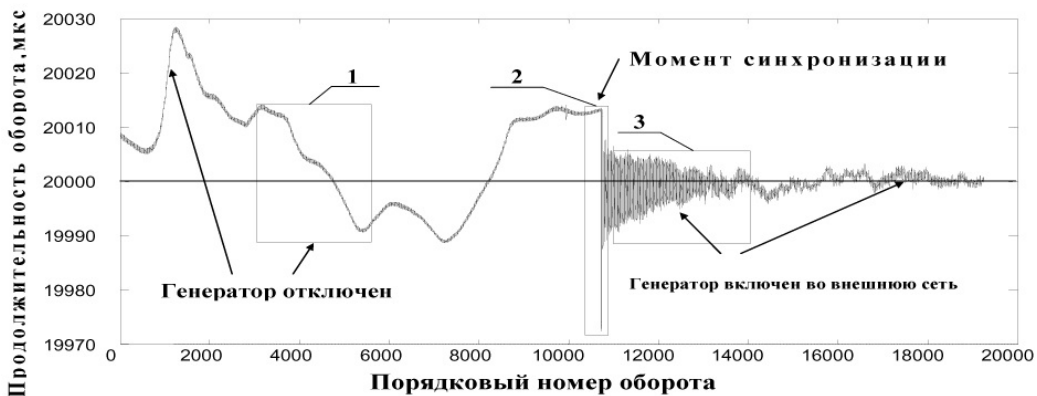


Рис. 5. Автоматическое включение генератора в сеть

При более подробном рассмотрении переходного процесса (рис. 5) на несущей частоте вращения наблюдаются крутильные колебания малой амплитуды, являющиеся суперпозицией двух частот, соответствующих крутильной жесткости ротора генератора и валопровода турбины.

Установлено, что данная особенность вращения валопровода ТА сохраняется на всех режимах его работы. После включения генератора в единую энергетическую систему регистрируется значительное уменьшение вариаций продолжительности оборотов валопровода [7].



Рис. 6. Включение генератора в сеть

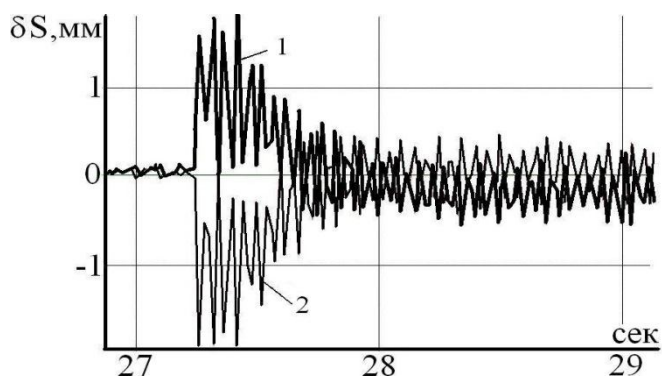


Рис. 7. Влияние нестабильности угловой скорости ротора на показания датчиков в начальный момент сброса нагрузки: 1 и 2 — первая и последняя по счёту лопатки

На рис.7 приведены результаты взаимного смещения лопаток практически одновременно проходящих мимо двух датчиков измерительной пары, когда влияние нестабильности угловой скорости на показания отсутствует.

Как видно, в начальный момент сброса нагрузки несинфазные колебания лопаток практически полностью отсутствовали. Естественно, что за этот промежуток времени влияние нестабильности угловой скорости на показания датчиков должно проявиться.

При отключении генератора от сети (рис. 8) регистрируется резкое замедление вращения, вызванное увеличением момента сопротивления. Разброс значений продолжительности оборота валопровода до отключения генератора от сети не превышает 2–2,5 мкс, что соответствует штатному режиму функционирования ТА. Вариации интервалов времени отражают суперпозицию различных режимов крутильных колебаний валопровода. Амплитуда крутильных колебаний в данном режиме вращения составляет ~ 4 угловых минуты.

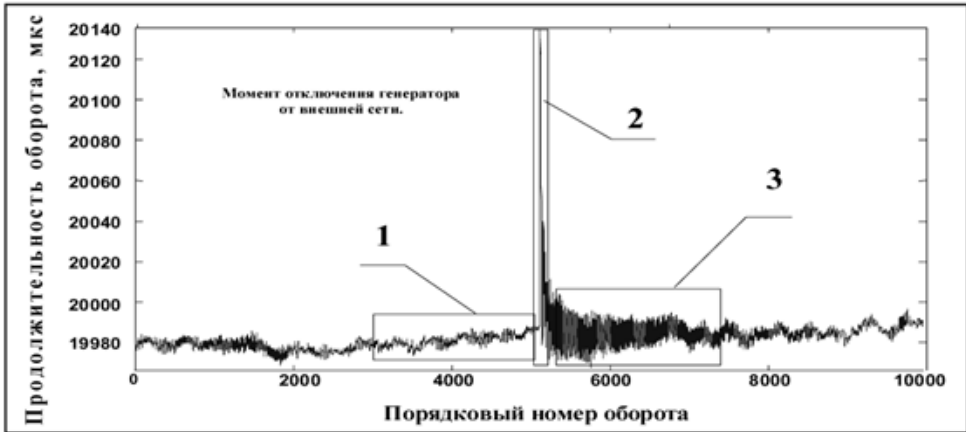


Рис. 8. Отключение генератора от внешней сети

После кратковременного возрастания момента сопротивления при отключении от сети генератора вариации продолжительности оборота валопровода в 3–4 раза больше, чем при штатном режиме, амплитуда крутильных колебаний возрастает до 17 угловых минут, а возврат в исходное состояние происходит в течение 25–30 оборотов валопровода.

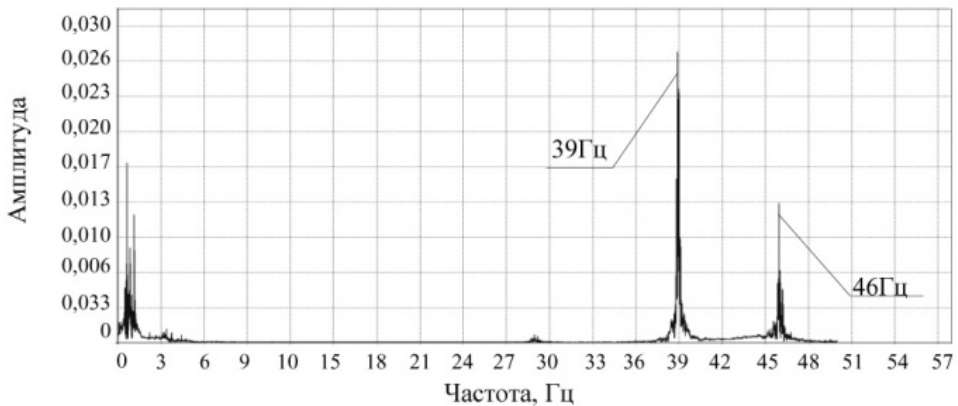


Рис. 9. Спектры крутильных колебаний

На рис. 9 изображены спектры зарегистрированных некратных крутильных колебаний в сечениях валопровода (ЦСВ и ЦСД). Здесь наиболее явно выражена высокочастотная составляющая в диапазоне 38–47 Гц, причём уровень вибрации на частоте 39 и 46 Гц превосходит другие составляющие от 2 до 3 раз. Таким образом, можно оценивать наличие резонансных режимов работы колебательной системы валопровода. По уровню вибраций в высокочастотной области можно судить о наличии ударных процессов в подшипниках скольжения валопровода, вызываемых крутильными колебаниями.

## Выводы

1. Применение данных методов регистрации показывает, что крутильные колебания валопровода постоянно присутствуют в рабочем режиме и их амплитуда, как правило, увеличивается в переходных режимах (синхронизация, отключение генератора от сети, процессы во внешней сети), а также наличие собственных крутильных колебаний при разгоне турбогенератора. Однако воздействия со стороны сети на режим вращения валопровода штатной контрольно-измерительной аппаратурой не регистрируются и их влияние на остаточный ресурс валопровода в настоящее время не учитывается [4].

2. Главным достоинством Дискретно-фазового метода является то, что определение деформаций лопаток осуществляется при отсутствии корневых датчиков. Таким образом, они могут быть эффективно использованы для регистрации крутильных колебаний валопровода мощных паровых турбин, возникающих при переходных режимах работы турбоагрегата. Однако, поскольку с помощью датчиков ДФМ регистрируется не весь колебательный процесс, а только его дискретные значения один раз за оборот. Также не позволяет определить появление динамических напряжений в валопроводе в силу разницы собственных частот валопровода и лопаточного венца. Внедрение данных методов измерений ограничивается из-за необходимости глубокого препарирования турбоагрегата для внедрения датчиков в его внутреннем тракте. Также дополнительно требуется установка крепежных, токосъемных датчиков, что значительно усложняет их применение.

3. Фазохронометрические измерения также позволяют провести количественный анализ быстропотекающих переходных процессов, не регистрируемых штатным контрольно-диагностическим оборудованием, выполнить регистрацию крутильных колебаний и их количественный анализ и подтверждают, что турбоагрегаты, испытывая воздействие системы управления и внешней сети, постоянно работают в переходных режимах. С большей эффективностью дают определить динамическое напряжение в валопроводе в переходных режимах. Но поскольку датчики находятся в агрессивной среде, с большой вероятностью возможны погрешности в их показаниях.

## Литература

1. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины // М.: ГЭИ. 1950. 335 с.
2. Урусов И.Д. Линейная теория колебаний синхронной машины. Изд-во АН СССР, 1960.
3. Боришанский К.Н. Особенности регистрации с помощью дискретно-фазового метода колебаний лопаток и валопровода при переходных режимах работы турбоагрегата / К. Н. Боришанский // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 10 (57). С. 169–173.
4. Вибрационное состояние лопаток и валопровода мощной паровой турбины при сбросе нагрузки / К. Н. Боришанский, Б. Е. Григорьев, С. Ю. Григорьев, А. В. Груздев, М. М. Ивахов, А. В. Наумов // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 9 (56). С. 76–80.
5. Witos, M. Turbine engine health/Maintenance status monitoring with use of phase-discrete method of blade vibration monitoring / M. Witos, R. Szczepanik // *Solid state phenomena*. 2009. Vols. 147, Transtech publications, Switzerland. P. 530–541.
6. Киселёв М. И., Пронякин В. И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // *Измерительная техника*. 2001. № 9. С. 15–18.
7. Киселёв М. И., Новик Н. В., Пронякин В. И. Регистрация параметров крутильных колебаний валопровода турбогенератора // *Измерительная техника*. 2000. № 12. С. 34–36.

*Об авторе*

**Кодолитч Денис Алексеевич** — аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, электромеханический факультет, Псковский государственный университет, Россия.

E-mail: razelim@list.ru

*D. A. Kodolich*

## REGISTRATION METHODS OF TORSIONAL VIBRATIONS

*This article provides an overview of methods for detecting torsional vibrations of turbine generator shaft line. The principle of implementation given hmetodov, and features of the preparation according to the natural frequency, shape and intensity of the torsional oscillations. It is shown that torsional vibrations are constantly present during operation of the turbogenerator.*

**Key words:** *turbo, torsional vibrations, discrete phase method, phase chronometric method.*

*About the author*

**Kodolich Denis Alexeevich**, Postgraduate student of the Department of the electric drive and automation of plants, Faculty of Electromecanics, Pskov State University, Russia.

E-mail: razelim@list.ru