

ченным из блока вычисления  $V_0$  и а происходит выбор нужного ряда времён. Конечно это требует немалых затрат памяти, но возможно применить и ОЗУ, в которое заранее из ЭВМ будут загружаться требуемые ряды времён для требуемых частиц.

В блоке сравнения времён происходит сравнение номера тактового импульса с номером импульса, пришедшего с блока вычисления времён и соответствующего нахождению частицы в конце  $i$ -ого ускоряющего электрода. Когда эти номера совпадают, то блок сравнения времён формирует поступающий на разрядники строб, по которому  $i$ -ый разрядник разряжает  $i$ -ый электрод, что создаёт ускоряющее электрическое поля между парой рядом стоящих ускоряющих электродов.

После того как частица покидает ускоряющий тракт (о чём будет свидетельствовать сигнал с последнего датчика), блок питания заряжает все ускоряющие электроды до ускоряющего напряжения и весь процесс повторяется снова.

#### *Список использованных источников*

1. Мерзлевский Л.А., Титов В.Н., Фадеенко Ю.И., Швецов Г.А. Высокоскоростное металле твёрдых тел. Физика горения и взрыва., 1987, т.23, №5, с.77-91.
2. Кмар Е.Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975.
3. Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. М.: Наука, 1983.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ГТД**

В.В. Щёголев, В.А. Медников

Уровень техники измерения амплитуды колебаний лопаток на вращающемся роторе (тем более в эксплуатационном режиме турбин) оставляет желать лучшего: до настоящего времени используются методы получения информации, поступающей от датчиков, закрепляемых на лопатках, что требует коллекторных или бесконтактных ("по радио") способов передачи данных. Это существенно ограничивает возможности контроля режимов колебаний турбинных лопаток в эксплуатационных условиях.

Соответственно, целью проводимых исследований и разработок стало создание системы, способной контролировать амплитуду колебаний каждой турбинной лопатки бесконтактным способом (не прибегая к уста-

новкам датчиков на лопатках и к громоздким устройствам для передачи от них информации) в эксплуатационном режиме агрегата без нарушения конструкции и герметичности его корпуса.

Известен способ определения амплитуд гармоник вибрирующего объекта [2], заключающийся в том, что снимают с измерительного датчика электрический сигнал, проводят его спектральный анализ с помощью известных методов Фурье - преобразований.

Однако применение этого способа эффективно при использовании акустических преобразователей, которые имеют ограниченный диапазон измеряемых амплитуд вибраций.

Известен способ бесконтактного измерения колебаний объекта [3], заключающийся в том, что зондируют исследуемый объект ультразвуковыми колебаниями, принимают отраженный от этого объекта модулированный сигнал, смешивают зондирующий и отраженный сигналы, выделяют из суммарного сигнала две соседние доплеровские гармоники, по отношению мощностей этих гармоник определяют амплитуду колебаний, а по разности их частот - частоту колебаний объекта.

Однако в способе отсутствует возможность определения гармоничности колебаний, величины амплитуды второй гармоники и накладываются ограничения на точность измерений амплитуды вибраций в связи с достаточно большой длиной волны.

Известен также способ для определения амплитуды механических колебаний [4], заключающийся в том, что линейный, поляризованный, монохроматический, когерентный пучок света разлагают на два равных пучка, которые проходят взаимно перпендикулярно. При этом пучок направляют на механический движущийся с неизвестной амплитудой объект, где он отражается. Второй пучок направляют на неподвижную поверхность, от которой он также отражается. При этом между двумя взаимно перпендикулярными компонентами этих пучков обеспечивают сдвиг фазы на  $90^\circ$ . Оба пучка накладывают один на другой и затем обрабатывают. Однако для реализации способа необходимо дополнительное аппаратное оснащение для обеспечения сдвига фаз на  $90^\circ$ .

Известен также способ определения амплитуды вибрации объекта, заключающийся в том, что лазерное излучение направляют в зону колебаний объекта и на опорное зеркало через делитель, из отраженных от них лучей формируют интерференционную картину, преобразуют ее в электрический сигнал и снимают его спектр. В способе предложено находить амплитуды четырех гармоник с частотами, кратными основной частоте  $\omega$  колебания исследуемого объекта, с коэффициентом  $n = 1, 2, 3, 4$ . Рассчитывают амплитуду колебаний объекта по формуле:  $\sigma^2 = 24C_2C_3 / (C_1 + C_3)(C_2 + C_4)$ , где  $\sigma = 4\pi\xi/\lambda$ ,  $\xi$  - амплитуда вибрации исследуе-

мого объекта.  $\lambda$  - длина волны излучения лазера. Коэффициенты  $C_1, C_2, C_3, C_4$  - рассчитывают исходя из синтеза разложений сигнала на выходе измерительной системы в ряде Фурье и Бесселя. Коэффициенты  $C_n$  могут иметь как положительное, так и отрицательное значение. Однако с помощью указанного способа невозможно контролировать параметры негармонических вибраций.

Известен также способ измерения амплитуды вибраций, заключающийся в следующем. Излучение лазера делят на два пучка, опорный и предметный, направляют пучки на опорное зеркало и исследуемый объект соответственно, получают интерференционную картину из лучей, отраженных от эталонного и исследуемого объектов, по ней формируют разнополярные импульсы и используют их для подсчета интерференционных полос. По полученным данным определяют амплитуду колебаний объекта. Однако для осуществления данного способа требуется специальная электронная аппаратура, часто достаточно сложная.

Все оптические методы имеют один общий недостаток - сложность применения в процессе эксплуатации двигателя. В двигателе используется графитовая смазка (токопроводящая), которая быстро перекроет оптический канал такого датчика, и не позволит получать от него информацию.

Наиболее современным и оптимальным из существующих методов является дискретно-фазовый метод бесконтактного определения амплитуд колебаний лопаток, при котором регистрируют момент прохождения кромки свободного конца вращающейся лопатки мимо определенных точек корпуса (или его неподвижных деталей) и одновременно измеряют угловую или окружную скорости движения лопатки. В упомянутых точках корпуса устанавливаются на определенных расстояниях друг от друга по направлению траектории движения кромки лопатки один, два, три (или больше) датчика (электроразрядного, емкостного, электродинамического, оптического, акустического или иного типа), способных подавать четкий сигнал, соответствующий моменту прохождения кромки лопатки точки, в которой расположен датчик.

Можно отметить существенные преимущества этого метода по сравнению с методами, использующих тензодатчики: избавление от необходимости закреплять датчики на лопатках, монтировать соответствующую электропроводку и приспособливать коллектор или беспроводные устройства для передачи информации. Без всего этого можно обойтись, значительно упростив и удешевив контрольно-измерительную аппаратуру, тем самым, сделав возможным установку этой аппаратуры на каждый реальный агрегат, что обеспечит своевременность выявления опасных вибраций лопаток и предотвратит многие аварийные ситуации.

Если кромка лопатки или все ее перо не колеблется, то для каждого значения скорости вращения вала (или диска с лопатками) промежутки времени между сигналами датчиков будут неизменными. В случае колебаний лопатки в плоскости, совпадающей (полностью или частично) с плоскостью вращения лопаток, промежутки времени между сигналами от датчиков изменятся и не будут оставаться одинаковыми в процессе вращения. Они будут оставаться неизменными лишь в частном случае, когда частоты вращения и колебания лопатки будут точно кратными друг другу, что практически трудно реализуется в течение существенного отрезка времени, а одинаковыми с теми промежутками времени, которые имеют место при не колеблющейся лопатке, фиксируемые при колебаниях лопатки промежутки времени будут тогда, когда (при соблюдении указанного кратного соотношения между частотами) колебания лопатки будут всегда такими, что момент прохождения датчика кромкой лопатки всегда будет совпадать с моментом ее среднего положения в процессе колебаний, это условие соблюсти еще более трудно, чем предыдущее, и вероятность этого случая практически нулевая.

Поэтому изменение промежутка времени между сигналами датчиков, а тем более изменение его от оборота к обороту вала, - это достаточный признак того, что лопатка колеблется и амплитуда ее колебаний тем больше, чем значительно изменяются фиксируемые для каждого оборота указанные промежутки времени.

Для задач оценки базовой считается конструкция агрегата с валом, вращающимся со скоростью 10000 оборот/мин, с диаметром облопаченного диска 1 м (диаметр собственно диска 0,5 м, длина пера лопаток 0,25 м) при частоте первой формы изгибных колебаний лопаток около 330 Гц. Для агрегатов более скоростных, с меньшими размерами и с более высокими частотами колебаний, техническая сторона реализации регистрирующей системы может лишь несколько усложниться, но принципиальные затруднения отсутствуют. Для менее скоростных агрегатов с большими габаритами регистрация амплитуды колебаний лопаток предлагаемым способом тем точнее, чем меньше скорости вращения вала.

Для базовой модели агрегата с диском, имеющим несколько десятков лопаток, расстояние между свободными торцами соседних лопаток в плоскости вращения составляет около 5 см при 10000 оборот/мин, это расстояние проходит кромкой лопатки примерно за 0,1 мс. Если размах колебаний (двойная амплитуда) торца лопатки будет около 1 см, то это означает, что необходимо регистрировать промежутки времени, отличающиеся друг от друга, примерно на 0,02 мс, т.е. на 20 мкс. Регистрация таких промежутков времени и их различий (вплоть до единиц и долей микросекунд) отработана во многих отраслях техники и не представляет

каких-либо трудностей.

Определим возможности устройства с одним датчиком.

На внутренней стороне корпуса агрегата в точке, находящейся над траекторией движения всех лопаток данного диска, датчик указанного выше типа устанавливается так, чтобы его сигнал максимально четко и однозначно отражал момент прохождения пера лопатки мимо точки расположения датчика. Автоматическое устройство оценивает разницу в промежутках времени между сигналами. Во втором случае запись ведется на тот или иной носитель также с использованием в качестве метки сигнала от вспомогательного датчика, сопряженного с валом. Для удобства идентификации лопаток диска (при анализе отображенной на экране осциллоскопа или записанной информации) с валом агрегата может связываться несколько вспомогательных датчиков (вплоть до числа их, равного количеству лопаток на диске), сигналы которых помечаются тем или иным способом, позволяющим отличить их друг от друга.

Если при вращении вала колебания лопаток отсутствуют, то сигналы от корпусного датчика будут следовать через равные промежутки времени. При умеренных колебаниях лопаток различия в указанных промежутках времени не будут превышать некоторую, установленную заранее экспериментальным или расчетным путем допустимую величину. Если же колебания всех лопаток (при некоторых критических скоростях вращения вала) или одной или нескольких лопаток (вследствие технологических погрешностей изготовления или закрепления лопатки, или развившейся в ней усталостной трещины) будут чрезвычайно интенсивными, то различия соответствующих промежутков времени, устанавливаемые указанными выше способами, превысят предельные значения и этот режим должен считаться аварийным: в этом случае должны приниматься соответствующие меры.

Однако, определение синхронных колебаний при использовании одного датчика невозможно, кроме того, значительно увеличивается запаздывание определения параметров колебаний лопаток за счет необходимости использования информации, получаемой за несколько оборотов ротора.

Таким образом, устройство с одним корпусным датчиком, как наиболее простое, может использоваться в качестве индикатора чрезмерно интенсивных колебаний лопаток, опасных с точки зрения их разрушения.

Как инструмент для измерения амплитуды колебаний лопатки - это устройство не очень эффективно, ибо значение промежутка времени между сигналами корпусного датчика, относящихся к соседним лопаткам, зависит не только от амплитуды колебаний выбранной лопатки, но и от

интенсивности колебаний той соседней лопатки, с сигналом от которой ведется сравнение. Для устранения этого недостатка необходимо использовать устройство с двумя корпусными датчиками.

По траектории движения кромок вращающихся лопаток устанавливается не один, а два одинаковых датчика, аналогичных указанному выше. Расстояние между этими датчиками выбирается, исходя из значений скорости вращения ротора, частоты колебаний лопаток и величины промежутка между кромками соседних лопаток.

Если значение  $\omega$  относительно мало, а  $f$  велико (т.е. полупериод колебаний лопаток меньше времени прохождения лопаткой расстояния  $d$ ), то указанные два датчика можно размещать на расстоянии, не большем  $d$ , вдоль траектории движения кромок лопаток. В этом случае, если выбранная лопатка при вращении ротора не колеблется, то промежутки времени между сигналами датчиков (при одной и той же скорости вращения) будут одинаковыми. При колебаниях лопатки эти промежутки будут изменяться от оборота к обороту ротора. Разница между максимальным и минимальным значением этих промежутков, установленная на статистически достоверной (большой) совокупности замеров, будет соответствовать размаху колебаний, а произведение этой разницы на линейную скорость кромки вращающейся лопатки будет равно размаху, т.е. двойной амплитуде колебаний. При этом сигналы датчиков от соседних лопаток не будут влиять (как в устройстве с одним датчиком) на определение временных промежутков, ибо они устанавливаются только по сигналам от выбранной лопатки.

Если частота вращения ротора близка или кратна частоте колебаний лопаток (везде имеются ввиду резонансные частоты колебаний лопатки), расстояние между точками расположения рассматриваемых двух корпусных датчиков (по траектории вращения кромок лопаток) должно быть увеличено так, чтобы полупериод колебаний лопатки всегда был меньше времени прохождения лопаткой этого расстояния между датчиками. В этом случае необходима система выделения рассматриваемых двух сигналов, соответствующих моментам прохождения выбранной лопаткой первого и второго датчиков из совокупности сигналов от других лопаток, или система подавления этой совокупности сигналов. Такие системы легко конструируются с использованием упомянутых выше вспомогательных датчиков, связанных с валом агрегата, при помощи которых отмечается угловое положение ротора (и закрепленных на нем лопаток) по отношению к корпусным датчикам, расположенным над кромками лопаток.

Предлагается применение одновременно 2-х датчиков, расположенных на расстоянии, равном шагу между лопатками, что

позволяет существенно увеличить количество получаемой информации о мгновенном положении лопаток. При этом получаем сразу 3 полезных сигнала: интервал времени между 1-й и 2-й лопатками, интервал времени между 2-й и 3-й лопатками, и разностный сигнал 1-го и 2-го датчика - интервал времени, пропорциональный мгновенному отклонению 1-й и 2-й лопаток от положения равновесия.

Устройство с тремя корпусными датчиками и с большим их числом.

Эти датчики, аналогичные указанным выше, устанавливаются над кромками лопаток в плоскости их вращения по тем же рекомендациям, которые изложены выше. Целесообразность установки трех и более датчиков объясняется появляющейся возможностью более простого, чем в случае предыдущих устройств, экспериментального установления формы колебаний кромок лопаток (а значит и их амплитуды). При этом подразумевается, что закон колебаний лопатки - гармонический, и предварительно производится (но это не обязательно) расчёт основных резонансных частот (гармоник) колебаний лопатки.

При работе двигателя производится периодическое изменение частоты вращения ротора, что при прохождении через положения резонанса вызывает значительное увеличение амплитуды колебаний лопаток, величина которых зависит и от скорости прохождения через резонанс.

Составлена математическая модель, которая позволяет на основе собранной информации о мгновенных положениях лопаток в дискретные моменты времени определять амплитуды, частоты и фазы колебаний всех лопаток рабочего колеса, производить выделение опасных рабочих частот.

Задача обслуживающего агрегат персонала или автоматического устройства - определить величину амплитуды колебаний той или иной лопатки и, сопоставляя значение этой амплитуды с заранее установленным предельно доступным значением, принимать соответствующие меры при чрезмерных колебаниях лопатки.

Область применения - это стационарные и транспортные энергетические установки (гидро-, паро- и газотурбинные), компрессоры к ним, а также агрегаты газо- и гидротранспорта, воздухоудвки и др., - которые могут попадать в аварийные ситуации из-за чрезмерных вибраций турбинных и компрессорных лопаток, приводящих к их разрушению вследствие усталости.

Практическая полезность такого устройства очень велика, вследствие того, что основная часть энергетических и транспортных машин оснащена турбинами и компрессорами, в которых лопатки по причине их

чрезмерных вибраций, нагрузок являются главным источником аварий с тяжёлыми последствиями.

#### Список использованных источников

1. Заблочный И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение, 1977. – 160с.
2. А.А. Харкевич. Спектры и анализ. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1962, 236с.
3. Авторское свидетельство СССР № 1262295, О 01 Н 9/00. 1985.
4. Патент ГДР № 276989, О 01 Н 9/00. 1987.
5. Патент РФ № 2060475, G 01 Н 9/ 00, 1996.
6. Патент РФ № 2063519, F 01 D 25/ 06, 1996.
7. Патент РФ № 2143103, G 01 Н 11/ 06, 1999.
8. Левин А.В., Боришанский К.Н., Консон Е.Д. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин. Л.: Машиностроение, 1981. – 710с.
9. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972. – 470с.

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОДИРОВАНИЯ ЦВЕТА

Белозёров Д.А., Глазунов В.А., Солицев С.В.

Лабораторная установка построена на современной элементной базе, позволяющей простыми средствами создать устройство с высокими техническими характеристиками и малыми габаритами, и предназначена для лучшего усвоения студентами основных сигналов в области телевидения. К данным сигналам относятся:

- сигналы RGB:  
полный синхросигнал;
- полные цветные телевизионные сигналы, кодированные в стандартах PAL и SECAM;
- полный чёрно-белый телевизионный сигнал;
- трёхуровневый импульс (SSC).

Основными блоками установки являются:

- генератор телевизионных сигналов [1];
- блок синхронизации;
- информационный стенд.

Генератор вырабатывает полный телевизионный сигнал в системах PAL и SECAM, соответствующий основным требованиям [2].

Он формирует следующие изображения:

вертикальные цветные полосы (в последовательности: белая, серая, жёлтая, голубая, зелёная, пурпурная, красная, синяя, чёрная; при