

ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ СИСТЕМЫ РОТОР — КОРПУС ГТУ

**М. Ю. Темис, А. М. Егоров
ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», г. Москва**

Среди природных источников риска основное место принадлежит землетрясениям. Значительная часть поверхности Земли сейсмически активна. Поэтому при строительстве или размещении оборудования в сейсмически опасных районах необходимо рассчитывать конструкции на сейсмостойкость.

В соответствии с требованиями к стационарным машинам, предъявляемыми ГОСТ 30546.1–98, необходимо обеспечить надежную работу конструкции газотурбинной установки при сейсмическом воздействии. Исследовать отклик стационарной газотурбинной установки на сейсмические воздействия, используя специальное экспериментальное оборудование, можно только в ограниченном числе случаев для конструкций небольшой массы. При отсутствии необходимого экспериментального оборудования или при отсутствии возможности провести испытания, а также на стадии проектирования необходимо выполнить расчетное исследование отклика конструкции газотурбинной установки на сейсмическое воздействие и оценить расчетным путем ее сейсмостойкость.

Основным требованием, предъявляемым к конструкции газотурбинной установки при сейсмическом воздействии, является требование обеспечения ее работоспособности при продолжительности землетрясения более 1 минуты. Исходя из этого, следует производить оценку силовой схемы конструкции, определять переменные напряжения, действующие в зонах крепления корпусов и силовых рам. В критических элементах конструкции, определяющих ее надежность и ресурс, уровень напряжений, представляющих сумму рабочих напряжений и динамических, вызванных землетрясением, не должен превышать допускаемых. Соответственно, деформации и перемещения точек конструкции не должны превышать величин, регламентируемых инструкцией по эксплуатации. Кроме этого следует учесть, что в системе ротор-подшипники-корпус при динамическом воздействии возникают относительные смещения, которые могут привести к задеванию лопаток ротора о корпус и выводу конструкции из строя. Анализ этих относительных перемещений представляет одну из важнейших проблем оценки сейсмостойкости конструкции.

Оценка влияния сейсмического воздействия на представленные выше параметры системы ротор-корпус требует разработки моделей корпуса ГТУ, подшипников и ротора, которые бы позволяли с удовлетворительной точностью моделировать как стационарные условия эксплуатации ГТУ, так и отклик ГТУ на сейсмическое воздействие. Исследования в работе проведены для стационарной ГТУ, состоящей из газогенератора, силовой турбины, силовых рам и выходного патрубка, которую из-за большой массы,

составляющей несколько тонн, невозможно испытать на испытательном стенде. Поэтому для таких конструкций необходимо разработать методику математического моделирования, которая должна учитывать особенности конструкции и условия работы газотурбинной установки при стационарном режиме работы и при сейсмическом воздействии.

В качестве газогенератора используется авиационный ГТД большого ресурса, динамические характеристики которого хорошо изучены. Наибольший интерес для исследования при сейсмическом воздействии представляет конструкция силовой турбины с «тяжелым» ротором, вращающимся в гидродинамических подшипниках с колодками.

Для проведения исследований разработана модель ротор-подшипники-корпус рассматриваемой ГТУ. Модель включает в себя конечно-элементные стержневые модели роторов газогенератора и силовой турбины. Жесткостные характеристики ротора силовой турбины уточняются при помощи учета жесткостей упругих фланцев крепления дисков, рассчитываемых с использованием твердотельной модели ротора. Диски ГТУ моделировались с использованием элементов сосредоточенной массы.

Нелинейные характеристики жесткости и демпфирования подшипников скольжения учтены в модели ротор-подшипники-корпус при помощи специализированных конечных элементов, характеристики которых определяются для подшипников скольжения с самоустанавливающимися колодками при помощи решения задачи упругогидродинамического контакта шейки вала и колодок. При этом форма зазора для смазки определяется с учетом деформаций поверхностей скольжения, получаемых при решении задач упругого деформирования шейки вала и колодок, и с учетом поворота колодок.

Для исследования отклика ГТУ на сейсмическое воздействие разработаны три конечно-элементные модели: оболочечная модель, балочно-оболочечная модель и балочная модель. Первая модель использовалась для определения напряженно-деформированного состояния конструкции при действии сил тяжести и расчете частот и форм собственных колебаний без учета вращающихся роторов. Балочно-оболочечная модель использовалась при определении собственных частот и исследовании динамического отклика конструкции при вибрационном воздействии с учетом вращающихся роторов, но без учета нелинейного слоя смазки в подшипниках. В этой модели слой смазки в подшипниках учитывается соответствующей эквивалентной линейной жесткостью, рассчитанной для рабочих условий (50 Гц). Балочная модель применялась при определении собственных частот и исследовании динамического отклика конструкции при вибрационном воздействии с учетом вращающихся роторов и нелинейных характеристик жесткости и демпфирования слоя смазки в подшипниках.

Сравнение точности трех моделей, которое проводилось при определении собственных частот и форм колебаний конструкции ГТУ в диапазоне 0-30 Гц, показало, что балочно-оболочечная и балочная модели могут быть использованы при определении отклика конструкции на сейсмическое воздействие.

В соответствии с ГОСТ 30546.1–98 расчет проводился на основе акселерограмм для сейсмической активности 9 баллов и для высоты установки конструкции над нулевой отметкой в диапазоне высот 0–10 м. Для оценки отклика конструкции на синусоидальное возбуждение основания использовались три модели установки. Применение разных моделей позволяет оценить вклад гироскопических моментов дисков и нелинейных характеристик жесткости и демпфирования в подшипниках в общий отклик конструкции.

Предполагалось, что в спектре присутствуют все частоты из диапазона 1–30 Гц. Поэтому в качестве возбуждения на опорные узлы силовых рам задавались перемещения, изменяющиеся по гармоническому закону. При этом значения амплитуд перемещений, соответствующих той или иной частоте возбуждения, определялись на основе амплитуд ускорений по формуле $A_u(f) = A_a(f) / (2\pi f)^2$, где A_u и A_a — амплитуды перемещений и ускорений соответственно, f — частота возбуждения.

Гармоническое возбуждение основания задавалось в следующих направлениях: в вертикальном направлении; в горизонтальной плоскости — в направлениях вдоль оси установки и перпендикулярно оси установки. Амплитуды перемещений для воздействия в вертикальном направлении учитывались с коэффициентом 0,7 по сравнению с величинами в горизонтальной плоскости. Решение проводилось для всего диапазона частот возможного сейсмического воздействия (1–30 Гц) с шагом 1 Гц и для частот возбуждения, равных собственным частотам конструкции.

Большие гироскопические моменты при динамическом воздействии приводят к росту напряжений в опорах роторов и корпусах установки, что наиболее ярко проявляется при сейсмическом воздействии. Большие гироскопические моменты возникают, если при движении ротора его ось в опорах разворачивается. Такие перемещения возможны при совместных изгибных колебаниях корпуса и ротора. Если в диапазоне частот 0–30 Гц присутствуют формы колебаний, приводящие к повороту оси ротора, то вынужденные колебания по таким формам могут иметь место при сейсмическом воздействии.

Выполненный анализ собственных колебаний ГТУ показал, что в диапазоне 0–30 Гц находятся три собственные частоты колебаний конструкции: 15,8 Гц, 21,1 Гц и 26,3 Гц, при которых за счет деформаций силовой схемы происходит разворот оси ротора. В зонах этих частот более детально исследовалось влияние сейсмического воздействия.

По результатам исследования динамики ротора получены значения перемещений точек ротора в подшипниках и в наиболее критических местах газодинамического тракта для трех моделей, а также орбиты ротора в подшипниках для модели с учетом нелинейных характеристик подшипников. Для оценки работоспособности ГТУ определены относительные перемещения диска ротора силовой турбины и корпуса силовой турбины, по которым можно получить представление о возможном изменении зазоров между лопатками и корпусом. Так для 9-бального землетрясения

максимальное изменение зазора может составить 0,35–0,4 мм, и его необходимо учитывать вместе с другими перемещениями, вызванными удлинением лопаток и дисков и эксцентриситетом диска. Также для модели с учетом нелинейных характеристик подшипников по орбитам в ротора в подшипниках, которые при сейсмическом воздействии существенно отличаются от круговых, сделаны выводы о работоспособности подшипников, устойчивости орбит вращения и при помощи спектрального анализа орбит определены частоты колебаний ротора при сейсмическом воздействии.

В критических элементах, от которых зависит работоспособность газотурбинной установки, напряженно-деформированное состояние существенно изменяется. В первую очередь это касается опор силовой рамы и опор ротора. Так, например, для опор рамы возможны шестикратные перегрузки. В зонах концентрации напряжений конструкций опор ротора также возрастают напряжения.

Динамический отклик ГТУ на сейсмическое воздействие существенно зависит от гироскопических моментов роторов. Результаты динамического анализа показывают, что при проектировании желательно добиваться, чтобы частоты собственных колебаний конструктивных элементов ГТУ находились вне частотного диапазона сейсмического воздействия.

Максимальная величина изменения зазора определена для гармонического воздействия, соответствующего 9-бальному землетрясению. Однако, учитывая, что землетрясение представляет случайный процесс, изменение зазора необходимо скорректировать, предполагая, что одновременно могут реализоваться несколько воздействий из спектра, что может привести к росту величины относительного смещения лопаток и корпуса. Поэтому для землетрясений с такой магнитудой требуется разработка специальных конструктивных решений для обеспечения работоспособности установки.