

Л. А. РАСТРИГИН

БАЛАНСИРОВКА ДВИГАТЕЛЯ НА ХОДУ

Вибрации, вызываемые ротором, являются источником большинства вибраций двигателя и самолета в целом. Естественно, что уменьшение вибраций ротора позволит значительно продвинуть вперед разрешение проблемы повышения ресурса двигателя в связи с устранением основного источника вибраций в общем спектре вибраций двигателя.

Вибрации ротора двигателя возникают в основном по трем причинам:

1. вследствие механической несбалансированности ротора (нецентральное расположение масс в сечениях), которая может изменяться при переходе с одного режима двигателя на другой. Блуждание несбалансированности вызывается раскрытием стыков, несимметричным нагревом тела ротора и другими факторами (см. статью М. Е. Левита в настоящем сборнике);

2. вследствие кинематической несбалансированности (перекос вращающихся осей, несцентрированность соединительных муфт и т. д.). Этот род несбалансированности зависит от условий эксплуатации двигателя и режима работы;

3. аэродинамическая несбалансированность, возникающая в результате несимметричного действия аэродинамических нагрузок на винт, компрессор и турбину. Она также существенно зависит от режима работы двигателя.

Современные средства балансировки не обеспечивают достаточного устранения вибраций двигателя, т. к. невозможно при однократной балансировке учесть все факторы, воздействующие на ротор, тем более, что сами воздействия изменяются со временем и с изменением условий работы.

Возникает потребность балансировать ротор не только при его установке в двигатель, но и в процессе его эксплуатации. Для этого на роторе должно быть установлено устройство, изменяющее расположение некоторых подвижных масс и способное при определенном положении этих масс сбалансировать его, т. е.

уменьшить вибрации, вызываемые ротором на любом режиме работы и при действии любых факторов.

Создание такого устройства, изменяющего расположение масс на роторе, является серьезной, но разрешаемой конструкторской задачей. Оно должно удовлетворять следующему требованию: веса и траектории движения подвижных грузов на роторе выбираются так, чтобы обеспечить возможность балансировки, т. е. уменьшить вибрации двигателя при любых ситуациях.

Вопрос о том, куда должны двигаться грузы для того, чтобы сбалансировать ротор, решается автоматическим регулятором, непрерывным выбирающим в самое короткое время такое расположение подвижных грузов, при котором вибрация ротора достигала бы своего минимального значения из всех возможных вибраций для данного спектра весов и траекторий подвижных грузов.

Поставленная задача решается экстремальным регулятором, обладающим некоторым объемом памяти — для экстраполяции поведения ротора.

Существует несколько методов экстремального регулирования: метод градиента, метод наискорейшего спуска, метод поочередного изменения параметров и другие. Для решения задачи об автоматической балансировке ротора наиболее эффективным следует считать метод случайного поиска [1]. Он позволяет не только решать задачу об однократной балансировке [2], но и экстраполировать поведение ротора, т. е. определить тенденцию блуждания несбалансированности, что позволяет балансировать ротор одновременно с изменением дебаланса.

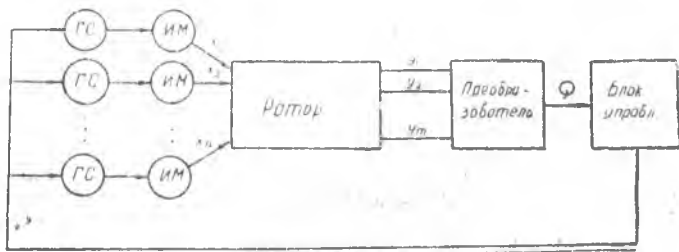
Применение метода случайного поиска к саморазбалансирующемуся ротору с целью экстраполяции его поведения сводится вкратце к следующему.

Генераторы случайности — ГС, число которых равно количеству подвижных грузов, предлагают то или иное направление медленного движения грузов. Если это движение приводит к уменьшению уровня вибрации в контролируемых точках конструкции, то генераторы случайности перестраиваются: увеличивается вероятность появления только что прошедшего варианта движения (в следующий раз вероятность появления этого варианта будет больше, чем до перестройки). Если же уровень вибраций увеличился или остался тем же, вероятность появления этого варианта движения должна быть уменьшена.

Не трудно заметить, что через несколько тактов работы ГС настроятся на направление движения подвижных грузов, прямо противоположное движению тяжелого места в роторе, т. е. регулятор экстраполировал поведение ротора. Если несбалансированность будет изменяться в одном направлении, регулятор, зная это направление (оно зафиксировано в настройке ГС), будет немедленно устранять несбалансированность, поддерживая минимальный уровень вибраций.

При изменении направления движения тяжелого места ГС также соответственно перестраиваются.

Таким образом, регулятор перестраивается каждый раз, когда меняется направление движения несбалансированности ротора, т. е. регулятор как бы обучается балансировать ротор. Блок-схема автоматической балансировки представлена на фиг. 1.



Фиг. 1.

Ротор имеет n входов по числу подвижных грузов и m выходов, по которым устанавливается уровень вибраций двигателя. Информация, которую несут эти каналы (y_1, \dots, y_m), собирается так, чтобы иметь полное представление о вибрации в наиболее ответственных точках корпуса двигателя или самолета.

Преобразователь трансформирует эту информацию в некоторую неотрицательную функцию Q — функцию качества балансировки, которая достигает нуля только, если вибрации (y_1, \dots, y_m) по всем каналам одновременно равны нулю.

Такую функцию образовать несложно. Вот несколько примеров:

$$Q = \sum_{i=1}^m y_i; \quad Q = \sum_{i=1}^m |y_i|; \quad Q = \max_{i=1, \dots, m} \{y_i\},$$

где под y_i подразумевается амплитуда вибраций в i -той точке двигателя.

Таким образом функция качества является мерилем несбалансированности ротора и перед регулятором ставится цель уменьшить Q в кратчайшее время.

Значение функции качества Q поступает на блок управления, который определяет режим работы всей схемы, реализуя при помощи ГС описанный выше алгоритм случайного поиска.

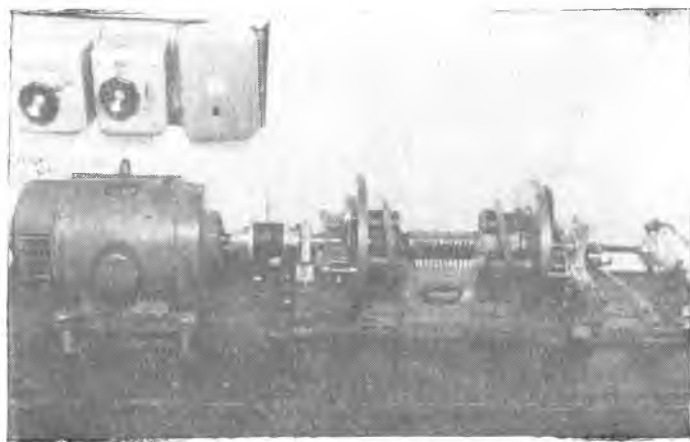
Выбранный ГС вариант движения подвижных грузов поступает на исполнительные механизмы ИМ, которые смещают подвижные грузы в заданном ГС направлении.

Можно доказать (интуитивно это ясно), что описанная система регулирования после нескольких тактов работы уменьшает функцию качества и, тем самым, сбалансирует ротор. Более того,

система будет отслеживать входящую в ротор расстройку (блуждание тяжелого места) и устранять ее, т. е. поддерживать вибрацию ротора на минимальном уровне, если эта расстройка нерезко меняет направления. При быстром изменении направления расстройки ротора описанное устройство несколько увеличит вибрации, пока не приспособится к новому направлению, т. е. пока не перестроятся генераторы случайности, после чего вибрации ротора опять станут минимальными.

Чаще всего входящая расстройка бывает достаточно гладкой, без скачков (например, неравномерный нагрев). В этом случае перестройка регулятора будет происходить одновременно с балансировкой ценной незначительного увеличения вибраций.

Таким образом, описанное устройство может уменьшать вибрации в выбранных точках конструкции, несмотря на факторы (внешние и внутренние), вызывающие их увеличение. Степень уменьшения вибраций зависит от выбранной конструкции исполнительных механизмов.



Фиг. 2.

Рассмотренная схема автоматической балансировки ротора проверялась на электронной модели ротора и на малой натурной модели (см. фиг. 2). Результаты экспериментов подтвердили правильность исходных предпосылок.

Несколько слов о быстродействии. Быстродействие автоматической балансировки ротора двигателя, установленного на самолете, имеет существенную, а иногда и определяющую роль в выборе средств балансировки. Скорость балансировки описанным способом определяется скоростью движения подвижных грузов, т. е. мощностью исполнительных механизмов и числом регулируемых параметров, т. е. количеством подвижных грузов.

Рассмотрим оба фактора. Скорость движения подвижных грузов нельзя произвольно увеличить, так как она ограничена переходными свойствами ротора, которые зависят от собственной частоты, частоты вращения и характеристик рассеяния энергии ротора. Переходный процесс, возникающий при изменении положения грузов, не должен мешать определению поведения функции качества. В противном случае регулятор может быть дезинформирован о значении функции качества успокоенной системы и вместо балансировки расбалансирует ротор. Такие случаи наблюдались на электронной модели при слишком больших скоростях подвижных грузов.

Второй фактор относится не столько к ротору, сколько к выбранному методу поиска. Для того, чтобы определить, в каком направлении двигать грузы, регулятор должен сделать несколько «экспериментов» над ротором, т. к. о расположении тяжелого места неизвестно ничего. На «обучение» регулятора требуется какое-то количество шагов, которое в оптимальном случае должно быть наименьшим. Естественно, что это количество возрастает с увеличением количества степеней свободы балансируемого ротора, т. к. обучение в более сложной ситуации требует большего времени.

Оптимальные характеристики обучения регулятора зависят от объема памяти регулятора и вида функции качества. Пока трудно дать общие рекомендации по выбору оптимального, с точки зрения обучения, вида функции качества, однако уже сейчас ясно, что для обучения лучше, когда функция качества не имеет «углов», т. е. в n -мерном пространстве параметров (x_1, \dots, x_n) поверхности $Q(x_1, \dots, x_n) = \text{const}$ гладкие. Здесь x_i — дебаланс, вносимый i -м подвижным грузом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Растрин, Экстремальное регулирование методом случайного поиска. Автоматика и телемеханика, № 9, 1960.
2. Л. А. Растрин, Автоматическая балансировка ротора методом случайного поиска. Труды Института машиноведения, Семинар по теории машин и механизмов, вып. 88, 1961.