



Р и с. 2. Реакция ТНА на импульсное изменение нагрузки: 1 - эксперимент (с осциллограммы); 2 - расчет по теоретической ИИД ТНА

практически мгновенно происходит разрыв столба жидкости, что эквивалентно импульсному изменению проходного сечения потребителя. При этом давление за насосом резко падает с последующим восстановлением до прежнего уровня в соответствии с теоретической ИИД ТНА (13). Сопутствующие высокочастотные колебания обусловлены динамическими процессами в напорном трубопроводе, не учтенными в модели (1)-(5).

Библиографический список

1. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 540 с.
2. Шевяков А.А., Калпин В.М., Науменкова Н.В. и др. Теория автоматического управления ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.

УДК 534.1-621.45.00-752

И.Л.Письменный

ЯВЛЕНИЕ синхронизации в лопаточных машинах

Показано, что многим колебательным процессам в лопаточных машинах свойственна тенденция синхронизации. Частным случаем проявления этой тенденции является явление, известное как вращающийся срыв. Проводится аналогия между свойствами вращающегося срыва и характеристиками скоростей вращения планет вокруг Солнца.

Исследования периодических процессов в сложных динамических системах и взаимодействий колебательных и вращательных движений в раз-

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

личных объектах между собой все более склоняет ученых к мысли, что тенденция к синхронизации является одной из форм самоорганизации материи, что существование этой тенденции наряду с противоположной тенденцией к неупорядоченному, стохастическому движению является проявлением общего закона диалектической борьбы противоположностей в природе и технике. Именно такая точка зрения сформулирована в книгах И.И.Блехмана и в разной степени выражается в работах П.Голдрайха, А.М.Молчанова и др. [1-6].

Как известно, явление синхронизации заключается в том, что несколько объектов, которые при отсутствии взаимодействия совершали бы колебания с разными частотами, или вращательные движения с разными угловыми скоростями, или вообще бы не совершали колебательных или вращательных движений, при наличии весьма слабых взаимодействий начинают совершать колебательные или вращательные движения с одинаковыми, кратными или иным образом связанными между собой частотами.

Синхронизация в различных ее проявлениях относится к тому типу всеохватывающих явлений, которые в различных областях природы и техники открывались и продолжают открываться заново и даже зачастую в одной области техники независимо друг от друга по нескольку раз в разное время и разными исследователями.

Кроме того, достоин сожаления факт, что молодые специалисты оканчивают вузы, не будучи даже поставлены в известность о существовании такого явления, этому способствует и то обстоятельство, что будучи многократно открыто, явление синхронизации и различные его проявления получили также много наименований.

В результате специалисты по субгармоникам в двигателестроении или электротехнике, например, и не догадываются, какой ценный материал имеется в работах, скажем, по резонансным движениям в небесной механике и, вероятно, наоборот.

Вот только некоторые из распространенных названий, имеющих прямое отношение к явлению синхронизации или его проявлениям:

синхронизация, самосинхронизация, внешняя синхронизация;

синхронные изменения, синхронные колебания;

захватывание, захват (применительно к внешней синхронизации);

резонансные движения, резонансы, соизмеримость, квазисоизмеримость (в небесной механике);

дробно-частотные колебания (в ранних работах), субгармонические, супергармонические, ультрагармонические колебания (в более поздних работах по нелинейным колебаниям), параметрические колебания и др.

Необходимо учесть, что некоторые из названий весьма специфичны и поэтому могут вводить в заблуждение. Так, в отличие от привычного еще со времен школьного курса физики понятие резонанса в небесной механике движения называют "резонансными", если они обладают набором частот, удовлетворяющих соотношению $\sum n_i \omega_i \cong 0$, где n_i - целые числа" [5]. Как видим, этому условию удовлетворяют субгармонические и супергармонические колебания, даже при отсутствии в них резонанса в виде увеличения амплитуды колебаний, только в силу отношения $\omega_1: \omega_2 = m:n$, где m, n - целые числа.

Кроме того, в литературе встречаются названия, являющиеся явными недоразумениями. Так, автор встречал название "субгармонические автоколебания" по отношению к вынужденным субгармоническим колебаниям, хотя вынужденные колебания никак не могут быть автоколебаниями.

Хорошо известно, что одним из замечательных свойств колебаний в нелинейных системах является возбуждение колебаний больших амплитуд на одних частотах Ω при воздействии на другие частоты ω с относительно малыми амплитудами. В зависимости от соотношений между частотами и амплитудами принято говорить о возбуждении суб- или супергармонических колебаний или резонансов. В соответствии с определением синхронизации, приведенным выше, эти нелинейные многочастотные колебания являются проявлением синхронизации.

Из объектов и систем, у которых наиболее часто проявляется синхронизация, можно выделить те, в которых по физике их работы присутствует вращательное движение. Именно поэтому синхронизация должна проявляться у лопаточных машин, в частности, у газотурбинных двигателей, причем тем сильнее, чем больше роторов у двигателя. Действительно, хорошо известно, что дисбаланс ротора вызывает механическую вибрацию с частотой вращения ротора и с кратными ей частотами. Кроме того, вращение ротора вызывает пульсации потока, связанные с прохождением через поток лопаток с частотами, равными произведению частоты вращения ротора ω_p на число лопаток Z

$$\omega = \omega_p Z .$$

В свою очередь, пульсации давления вызывают механическую вибрацию лопаток уже с этими частотами. Эти колебания описываются в литературе.

Так, в [7] говорится о том, что можно "видеть" поле неустановившихся колебаний лопаток ротора, не проникая внутрь корпуса, а просто измеряя его вибрацию на наружной поверхности. Это возможно благодаря тому, что вибрация поверхности корпуса возбуждается силами двух

типов. Силы первого типа передаются через различные стыковочные соединения двигателя механическим путем. Ко второму типу относятся силы аэродинамического происхождения, создаваемые полями давления вращающихся лопаток: акустическими волнами, распространяющимися в кольцевом канале проточной части, и пульсациями давления, вызванными вращением полей давления в межлопаточных каналах ротора.

Названные здесь в качестве примера синхронные колебания хорошо известны, и их механизм не вызывает серьезных возражений. Существуют, однако, проявления синхронизации, которые не так очевидны и поэтому таковыми не признаются многими специалистами, традиционно занимающимися этими и смежными вопросами.

У этих проявлений синхронизации в газотурбинных двигателях имеется много общего с проявлениями синхронизации в небесной механике. Несмотря на различие в физических процессах, протекающих в этих объектах и системах, можно выделить следующие основные общие свойства:

в обеих системах имеется мощная синхронизирующая сила, навязывающая единый ритм всей системе, — вращение вокруг оси: в Солнечной системе — вокруг Солнца, в лопаточных машинах — вращение роторов;

в обеих системах явно выражена целочисленность соотношений между частотами вращений или частотами колебаний.

Среди наиболее интересных проявлений синхронизации в лопаточных машинах можно назвать следующие:

увеличение уровня вибрации при определенных целочисленных соотношениях частот вращения роторов;

целочисленные отношения частот колебаний, воспринимаемых как вращающийся срыв, и частот вращения роторов;

целочисленные отношения частот колебаний газа при вибрационном горении в форсажной камере сгорания с частотами вращения роторов.

Прежде чем подробнее остановиться на этих явлениях, целесообразно вкратце сообщить о соотношениях между частотами вращения и обращения некоторых планет и спутников в Солнечной системе.

Отношение средней угловой скорости вращения Луны вокруг Земли к угловой скорости вращения Луны вокруг своей оси составляет 1:1, с чем связано известное явление: Луна всегда обращена к Земле одной стороной своей поверхности. Еще Лаплас изучал соизмеримости средних движений спутников Юпитера Ио, Европы и Ганимеда (n_1, n_2, n_3), подчиняющихся соотношению $n_1 - 3n_2 + 2n_3 = 0$, причем с точностью до девятой значащей цифры. Отношение частоты вращения Меркурия вокруг своей оси и частоты его обращения составляет 2:3 (что П. Голдрайх и С. Пил назвали резонансом первого рода). Период вращения Венеры вокруг своей оси ра-

вен 2/3 периода обращения Земли (что Голдрайх и Пил называли резонансом второго рода) [4]. Скорости вращения спутников Сатурна Тилерона и Титана относятся, как 3:4, Энцелада и Диона, как 1:2, Мимаса и Тетиды, как 1:2 [3]. Угловые скорости обращения Плутона и Нептуна относятся между собой, как 3:2, Плутона и Урана, как 1:3, Юпитера и Сатурна, как 5:2. Список можно было бы продолжать и продолжать.

На основании подобных наблюдений А.М.Молчанов в 1968 г. выдвинул гипотезу о синхронности (полной резонансности) средних угловых скоростей обращений больших планет Солнечной системы, которая заключается в том, что средние частоты обращений этих планет удовлетворяют некоторым линейным однородным соотношениям с небольшими целочисленными коэффициентами типа

$$\omega_{\text{Земли}} - 2\omega_{\text{Марса}} + \omega_{\text{Юпитера}} - \omega_{\text{Сатурна}} + \omega_{\text{Урана}} = 0.$$

Ограничившись этим примером, вернемся к лопаточным машинам.

1. Увеличение уровня вибрации при целочисленных отношениях частот вращения роторов [8]. Анализ вибрационных характеристик более 100 экспериментальных и серийных трехроторных двухконтурных газотурбинных двигателей показывает, что некоторые из них имели максимальные уровни вибрации на передней опоре при соотношениях частот вращения роторов 1:2, 2:3, 3:4 и р др.

2. Целочисленность отношений частот колебаний при так называемом вращающемся срыве к частотам вращения роторов [9]. Анализ опубликованных в отечественной и зарубежной печати работ более десяти авторских коллективов по экспериментальным исследованиям вращающегося срыва (библиография работ приведена в конце статьи [9]) показал, что с хорошей точностью отношения между частотами колебаний и частотами вращения роторов соответствуют 1:3, 1:4, 2:5, 2:3, 2:9, 3:4, 3:7, 3:8, 4:7, 4:5 и т.д.

После опубликования [9] автор продолжал следить за публикациями по вращающемуся срыву и имеет возможность продолжать список примеров.

В [10] Б.А.Локштанов, Л.Е.Ольштейн и Л.И.Семерняк приводят данные об отношении частоты вращающегося срыва к частоте ротора 0,33 (1:3) и 0,41 (скорее всего 2:5).

В [11] американские исследователи К.Ф.Лоренцо, Ф.П.Чиарамонте и Ч.М.Мехалик также называют величину 0,41, т.е. также примерно 2:5.

В связи с изложенным хотелось бы привести цитату из [5]: "Наблюдения и исследования последних лет свидетельствует в пользу особой и неслучайной роли резонансных явлений (т.е. синхронизации) в природе (добавим: и в технике). Это наводит на мысль, что на множестве возмож-

ных движений резонансные движения являются особыми и что какие-то характеристики силовых полей, в которых происходит движение, достигают экстремальных значений на резонансах. Грубо говоря, на резонансах "силы действуют сильнее", что и удерживает движение в устойчивом резонансном режиме.

3. Связь частот колебаний при вибрационном горении в Форсажной камере с частотами вращения роторов. Материалы анализа по данному вопросу получены автором несколько лет тому назад, но публикуются впервые, так как автора удерживали от публикации неизбежные возражения, что приводимые соотношения между частотами весьма условны, что между любыми частотами можно найти приблизительные целочисленные соотношения и т.д. Однако знакомство с [1-6] придало автору достаточно смелости, чтобы опубликовать следующую гипотезу: между частотами колебаний в форсажной камере при вибрационном горении и комбинациями частот вращения роторов газотурбинного двигателя на режиме виброгорения могут иметь место целочисленные соотношения, что также является одним из проявлений синхронизации в двигателе.

Вибрация, измеренная на форсажной камере трехроторного двухконтурного двигателя на режиме вибрационного горения, имела частоту порядка 160-500 Гц или 250-280 Гц (измерения проводились примерно на 10 экземплярах двигателей). Сравнение частот вибрации с частотами вращения роторов показало, что частоты вибрации f определяются следующими формулами:

$$f = \frac{2}{3} (f_{ng} + f_{cg} + f_{bg}); \quad f = \frac{5}{7} (f_{ng} + f_{cg} + f_{bg});$$

$$f = \frac{3}{4} (f_{ng} + f_{cg} + f_{bg}); \quad f = 1(f_{ng} + f_{bg}); \quad f = \frac{4}{3} (f_{ng} + f_{cg});$$

$$f = 1f_{bg}; \quad f = \frac{8}{5} f_{bg}; \quad f = \frac{5}{3} f_{bg}; \quad f = 2f_{bg}; \quad f = 3f_{bg}; \quad f = 2f_{cg}; \quad f = 3f_{ng}.$$

Таким образом, газотурбинный двигатель можно считать хорошим примером проявления синхронизации в технике.

Необходимо отметить, что, по-видимому, первым занялся поиском связей между вибрацией газотурбинного двигателя и явлением самосинхронизации С.М.Дорошко. В частности, он указал на возможность самосинхронизации несбалансированных роторов двигателей двухдвигательной силовой установки вертолета. Кроме того, он же рассматривал возможность синхронизации, приводящей к увеличению уровня вибрации, в случае кратности

частот вращения неуравновешенных роторов двухвалных двигателей. По мнению С.М.Дорошко, проявлению синхронизации и сопутствующих ей эффектов в данном случае способствует наличие межвалных опор в конструкции двигателя [12].

Хотя в работе [8] рассматривается другой механизм увеличения уровня вибрации у многороторных двигателей при кратности частот вращения роторов важен сам факт совпадения взглядов на возможность проявления синхронизации в газотурбинных двигателях.

Библиографический список

1. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971.
2. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. 352 с.
3. Голдрайх П. Объяснение частой встречаемости соизмеримых средних движений в солнечной системе // Приливы и резонансы в солнечной системе. М.: Мир, 1975. С. 217-247.
4. Голдрайх П., Пил С. Динамика вращения планет // Приливы и резонансы в солнечной системе. М.: Мир, 1975. С. 130-167.
5. Белецкий В.В., Шляхтин А.Н. Экстремальные свойства резонансных движений // ДАН, 1976. Т. 231. № 4. С. 829-932.
6. Молчанов А.М. О резонансной структуре Солнечной системы // Современные проблемы небесной механики и астродинамики. М.: Наука, 1973.
7. Мафиудакис, Лукис, Папаилю. Вибрация корпуса и условия работы газовых турбин // Современное машиностроение: Тр. *ASME*. 1991. № 3. С. 67-74.
8. Письменный И.Л. О влиянии проточной части на вибрационные характеристики многороторных ГТД // Аэроупругость лопаток турбомашин: Тр. ЦИАМ; № 1293. 1991. Вып. 6. С. 198-205.
9. Письменный И.Л. О связи колебаний параметров потока в газотурбинном двигателе с роторными частотами // Ученые записки ЦАГИ. 1989. Т. XX. № 4. С. 96-103.
10. Локштанов Е.А., Олыштейн Л.Е., Семерняк Л.И. Экспериментальное исследование влияния пульсаций потока на границу устойчивости ступени осевого компрессора // Лопаточные машины и струйные аппараты: Тр. ЦИАМ. № 1157. 1985. Вып. 7. С. 96-105.
11. Лоренцо К.Ф., Чиарамонте Ф.П., Мехалик Ч.М. Определение срывных характеристик компрессора на режиме перехода от помпажа к вращающемуся срыву // Аэрокосмическая техника. 1988. № 12. С. 97-110.

И. Дорошко С.М. Явление самосинхронизации и вибрация газотурбинного двигателя //XXI Всесоюзное научное совещание по проблемам прочности двигателей: Тез. док. М.: АН СССР, 1986.

УДК 539.3:519.6

В.Г.Кинелев, О.Е.Селенская

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ

Выполнен оптимизационный расчет параметров поперечного сечения трубчатой конструкции по минимуму массы при ограничениях, наложенных на размеры сечения и на значение собственной частоты колебаний конструкции. Разработан пакет прикладных программ, позволяющий осуществить оптимизацию конструкции со сложными граничными условиями.

Трубчатые конструкции находят широкое применение в системах гидро- и пневмоавтоматики. Возрастающие требования надежности работы этих систем ставят различные проблемы оптимизации параметров трубчатых конструкций.

Рассматривается задача определения проектных параметров трубчатой конструкции, минимизирующих ее массу при ограничениях, наложенных на значение нижней частоты ее собственных колебаний и на величины внешнего и внутреннего диаметров поперечного сечения.

Решение проблемы собственных значений конструкции выполнено с использованием метода конечных элементов. При формировании матриц жесткости и масс конструкции использована пространственная стержневая расчетная схема с конечными элементами в виде прямолинейного стержня, работающего на растяжение-сжатие, изгиб и кручение.

Рассматриваемые трубчатые конструкции имеют участки различной протяженности с большим диапазоном изменения жесткостей. Это обстоятельство обуславливает выбор размеров конечных элементов при дискретизации расчетной схемы, поскольку результаты расчета собственных чисел и векторов могут иметь существенные ошибки для конструкции, элементы матрицы жесткости которой значительно отличаются. Разбиение начинается с коротких участков, при этом размеры полученных конечных элементов определяют

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.