

Расчет и конструирование машин

УДК 629.7.03

К выбору параметров устройства для снижения нагрузки на элементы силовых корпусов турбореактивного двухконтурного двигателя после обрыва лопатки вентилятора*

И.И. Иванов

При обрыве лопатки вентилятора возникает значительный дисбаланс. Устройство для снижения нагрузки (слабое звено — СЗ) вводится в одну или несколько опор вала вентилятора. При заданных нагрузках СЗ разрушается, при этом усилия, передаваемые на элементы силовых корпусов и узлов крепления (подвески) двигателя, могут заметно снижаться. Предложена модель, позволяющая провести анализ поведения ротора и эффективности СЗ после обрыва лопатки вентилятора, а также выбрать соответствующие параметры СЗ.

Ключевые слова: турбореактивный двухконтурный двигатель, слабое звено, ротор, лопатка вентилятора, обрыв.

On the choice of parameters of device to reduce load on components of turbojet engine pressure vessels after fan blade breakage

I.I. Ivanov

When a fan blade breakage occurs a considerable imbalance appears in the rotor. The load reduction device is introduced in one or several supports of the fan shaft. It breaks down under the certain loads, but the loads applied to the

* Автор выражает благодарность коллективу отделения прочности ЦИАМ им. П.И. Баранова, в особенности: В.О. Бауэр, Б.С. Блиннику, Ю.А. Ножнишкому и Н.Н. Серебрякову.



ИВАНОВ
Илья Игоревич
студент кафедры
«Динамика и прочность
машин»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail: ivanovilig@yandex.ru

pressure vessels components and the engine fastener assembly (suspension) could be considerably reduced. The model for simulating the rotor behavior after the fan blade breakage and for selecting LRD parameters is presented.

Keywords: gas-turbine engine, load reduction device, rotor, fan blade, breakage.

Обозначения и сокращения:

- l — длина ротора, м;
- ρ — плотность материала вала, кг/м³;
- E — модуль Юнга материала вала, МПа;
- J — момент инерции поперечного сечения вала, мм⁴;
- e — эксцентриситет вентилятора, вызванный обрывом лопатки, мм;
- m_{rotor} — масса вала, кг;
- m_{fan} — масса облопаченного диска вентилятора, кг;
- вал НД — вал низкого давления;
- вал ВД — вал высокого давления;
- КНД — компрессор низкого давления;
- КВД — компрессор высокого давления;
- ТНД — турбина низкого давления;
- ТВД — турбина высокого давления;
- СЗ — слабое звено (устройство для уменьшения нагрузки на двигатель после обрыва лопатки вентилятора).

Рабочие лопатки вентилятора подвержены различного рода повреждениям, обусловленным значительными эксплуатационными

нагрузками (статическими, циклическими, динамическими), а также интенсивному воздействию попадающих в газотурбинный тракт двигателя посторонних предметов. Все это может привести к разрушению рабочей лопатки вентилятора, в том числе в корневом сечении. Несмотря на очень малую вероятность, такие события происходят. В виду значительной энергии фрагментов оборвавшейся лопатки разрушения, связанные с ее обрывом, могут носить катастрофический характер. Регламентирующие документы требуют, чтобы обрыв лопатки вентилятора к катастрофическим последствиям не приводил.

Наряду с обеспечением локализации разрушенных фрагментов внутри корпусов двигателя, необходимо предотвратить появление опасного отказа в результате возникшего при разрушении лопатки (рис. 1, поз. 1) значительного дисбаланса ($\sim 6\ 000\ \text{кг}\cdot\text{мм}$, что соответствует силе $\sim 10^6\ \text{Н}$).

В частности, необходимо (при минимальной массе двигателя) избежать:

- разрушения узлов крепления двигателя, или передачи недопустимых нагрузок на конструкцию летательного аппарата;
- заклинивания подшипников при работе на высоких нагрузках.

В работе [1] рассмотрено движение разбалансированного ротора в стационарной постановке. Однако в случае обрыва лопатки вентилятора на максимальные величины усилий значительное влияние оказывает фактор внезапного прило-

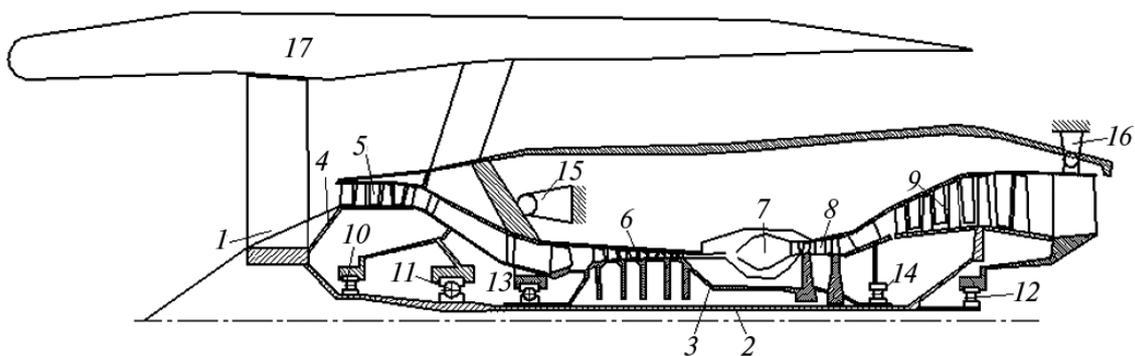


Рис. 1. Схема авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя:

- 1 — вентилятор; 2 — вал НД; 3 — вал ВД; 4 — ротор подпорных ступеней (ПС); 5 — КНД; 6 — КВД; 7 — камера сгорания (КС); 8 — ТВД; 9 — ТНД; 10 — передняя опора вентилятора; 11 — задняя опора вентилятора;
- 12 — опора ТНД; 13 — опора КВД; 14 — опора ТВД; 15 — передняя подвеска;
- 16 — задняя подвеска; 17 — мотогондола



Рис. 2. Отсоединяемая опора вентилятора

жения нагрузки. Поэтому задачу обрыва лопатки вентилятора следует решать в нестационарной постановке. Кроме того, следует учитывать, что нагрузки на опоры вала (см. рис. 1, поз. 10, 11) могут существенным образом возрасти при прохождении критических скоростей вращения. В учебнике [1] показано, что значительное влияние на амплитуды колебаний при прохождении резонанса оказывает скорость изменения частоты возбуждения. Поэтому поведение разбалансированного ротора вблизи критических частот должно быть тщательно проанализировано с учетом темпа падения угловой скорости.

Одним из элементов конструкции двигателя, предотвращающим значительные разрушения в случае обрыва лопатки вентилятора, является специальное устройство, вводимое в опоры ротора. В иностранной литературе его называют устройством для уменьшения нагрузки на двигатель (Load Reduction Device — LRD), в отечественной используют термин «слабое звено» (СЗ). Такие устройства применяются в двигателях фирм General Electric, Snecma и Rolls—Royce.

На рисунке 2 показана одна из схем СЗ в опоре вала вентилятора. При достижении определенной нагрузки болты срезаются, после чего опора перестает воспринимать нагрузку.

При обрыве рабочей лопатки СЗ позволяет перераспределить нагрузки на элементы силовой схемы двигателя и изменять динамические характеристики системы. При этом критическая частота вращения оказывается ниже рабочей частоты вращения, ротор самоцентрируется, что обеспечивает значительное снижение

нагрузки на подвеску и систему корпусов после обрыва лопатки вентилятора (рис. 3).

В данной работе методом конечных элементов выполнено численное моделирование поведения ротора после обрыва лопатки вентилятора. Анализ проведен в нестационарной нелинейной постановке. Рассмотрено влияние отсоединения одной или нескольких опор вала вентилятора на динамическую нагруженность подвески двигателя.

Постановка задачи. При расчете движения ротора под действием дисбаланса следует принимать во внимание следующие факторы:

- выжимание упруго-демпферных опор (которые, как правило, применяются в конструкции двигателей) под действием высоких нагрузок;
- контактные взаимодействия лопаток вентилятора и ротора подпорных ступеней с корпусом (см. рис. 1, поз. 1, 17), обусловленные большими перемещениями, а также касание валов низкого и высокого давления (см. рис. 1, поз. 2, 3) в районе опоры КВД (поз. 13).

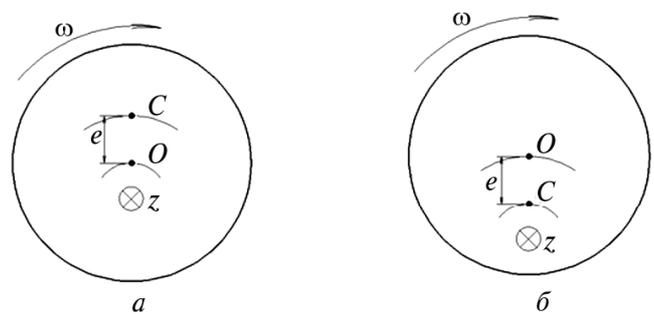


Рис. 3. Разбалансированный диск на докритической (а) и на закритической (б) скорости вращения: O — геометрический центр диска; C — центр масс диска; z — несмещенное положение оси вращения

Расчеты показали, что каждый из приведенных факторов оказывает существенное влияние на поведение ротора после обрыва лопатки вентилятора.

Расчетная схема вала низкого давления приведена на рис. 4.

При моделировании приняты следующие допущения:

- перемещения вала низкого давления ограничены лопатками вентилятора (см. рис. 1,



Рис. 4. Расчетная схема вала низкого давления

поз. 1) и валом ВД (поз. 3) в районе опоры КВД (поз. 13);

- все взаимодействия в системе полагаются упругими;

- опоры выжаты, их жесткость повышена, демпфирования в них нет;

- при перекрытии зазора между валами пренебрегаем инерционными характеристиками ротора высокого давления (см. рис. 1, поз. 3) (рассматривается одновальная схема), считаем, что в случае обрыва лопатки нагрузка непосредственно воспринимается опорой КВД (поз. 13);

- ввиду того, что скорость распространения волны в материале вала на порядок выше окружной скорости на периферии вентилятора, полагаем, что СЗ разрушается в момент обрыва лопатки, т. е. ротор сразу становится двухопорным (если не считать контактных ограничений).

Для рассматриваемой модели взяты характерные на практике параметры:

- жесткости опор и лопаток приведены на рис. 4 в долях от размерной величины

$$k_0 = 31\,300 \frac{EJ}{l^3};$$

- зазоры в дальнейшем измеряются в долях от значения $\Delta = 3,8 \cdot 10^{-3} l$;

- зазор между лопатками вентилятора и металлическим корпусом первоначально принят равным Δ ;

- зазор между валами в районе опоры КВД принят равным $\Delta/2$;

- скорость вращения ротора в дальнейшем измеряется в долях от рабочей частоты вращения:

$$\omega_0 = 35 \sqrt{\frac{EJ}{m_{\text{rotor}} l^3}};$$

- время измеряется в долях от периода одного оборота со скоростью ω_0 : $\tau = 2\pi / \omega_0$;

- усилия далее приведены в долях от усилия, вызванного дисбалансом, на частоте вращения ω_0 : $F_0 = m_{fan} \omega_0^2 e$.

Расчет проведен в комплексе MSC NASTRAN с использованием двухузлового балочного элемента CBEAM, при этом учитывались большие перемещения и гироскопический эффект. Каждый узел в рассматриваемой модели имеет четыре степени свободы (две поступательные, две вращательные). Опоры смоделированы одномерным элементом CBUSH. Инерционные характеристики вентилятора и турбины смоделированы точечным массовым элементом CONM2. Контактные взаимодействия лопаток вентилятора с корпусом и между валами учтены с помощью элемента NLRGAP.

Таким образом, принятая модель позволяет учитывать эффекты, связанные как с прохождением ротором критической скорости вращения, так и с внезапным приложением нагрузки, а также контактные взаимодействия лопаток вентилятора с корпусом и между валами.

Результаты расчетов исходной системы. Был проведен ряд расчетов представленной модели при первоначально принятых параметрах. Для удобства сравнительного анализа рассматриваемых вариантов в систему введено значительное конструктивное демпфирование. На рисунке 5 приведены зависимости от времени усилия на переднюю подвеску (см. рис. 1, поз. 15) двигателя после обрыва лопатки вентилятора при частоте вращения ω_0 . Рассмотрены два случая:

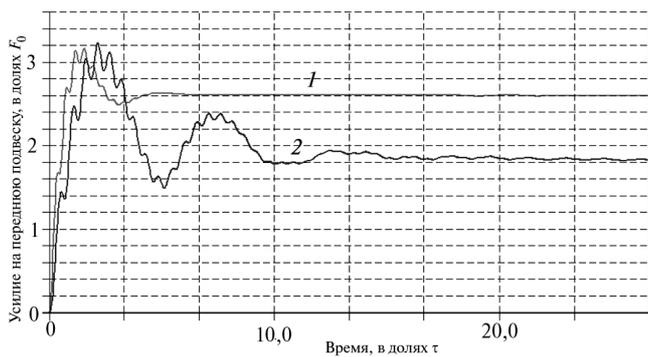


Рис. 5. Зависимости нагрузки на переднюю подвеску от времени после обрыва лопатки вентилятора на частоте вращения ω_0 :
1 — без разрушения СЗ; 2 — с разрушением СЗ

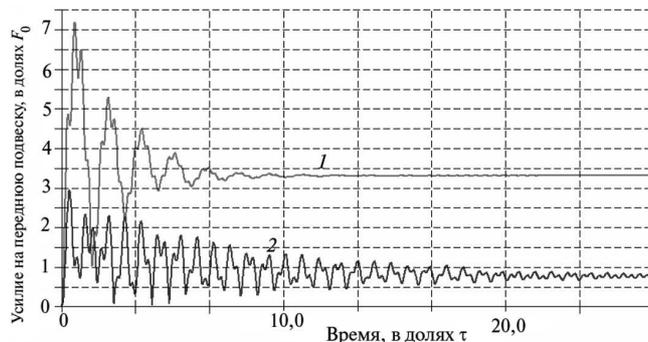


Рис. 6. Зависимости нагрузки на переднюю подвеску от времени после обрыва лопатки вентилятора на частоте вращения $2\omega_0$:
1 — без разрушения СЗ; 2 — с разрушением СЗ

- 1) СЗ отсутствует, все опоры передают нагрузку;
- 2) СЗ введено в первую опору вентилятора, в результате чего после обрыва лопатки опора отсоединяется.

Усилие на переднюю подвеску вычислялось как векторная сумма сил, передающихся через лопатки вентилятора, переднюю (если не введено СЗ) и заднюю опоры вала НД и опору КВД (вследствие касания валов).

Аналогичные зависимости для частоты вращения $2\omega_0$ приведены на рис. 6.

На рисунках видно:

- 1) максимальное усилие на передней подвеске достигается через время порядка периода одного оборота ротора после обрыва лопатки;
- 2) из-за введенного демпфирования колебания нагрузки затухают к некоторому постоянному значению, что соответствует прямой прецессии изогнутой оси вала.

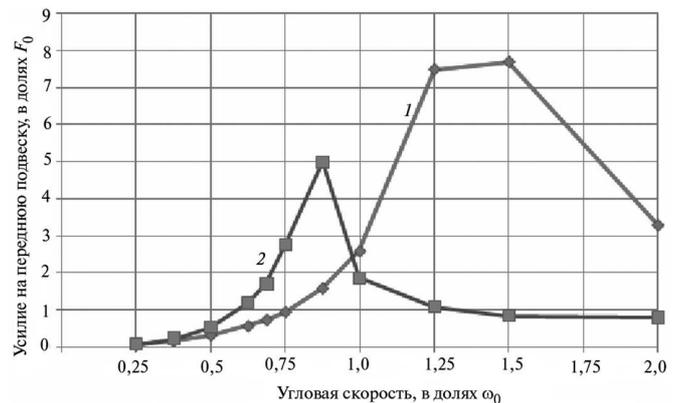


Рис. 7. Зависимости установившейся нагрузки на переднюю подвеску от частоты вращения, на которой произошел обрыв лопатки вентилятора:
1 — без разрушения СЗ; 2 — с разрушением СЗ

Расчеты, аналогичные представленным на рис. 5, 6, проведены для набора угловых скоростей в интервале $0,25\omega_0 \dots 2\omega_0$. Для каждого случая определялось установившееся значение нагрузки на переднюю подвеску. Полученное соответствие частоты вращения, на которой произошел обрыв лопатки вентилятора, и установившегося значения нагрузки на переднюю подвеску представлено на рис. 7. Рассмотрены случаи наличия и отсутствия СЗ в передней опоре вала НД (см. рис. 1, поз. 10).

По рисунку можно сделать промежуточные выводы для рассмотренной модели с данными параметрами:

- 1) частота вращения, которой соответствует максимум нагрузки на переднюю подвеску (в дальнейшем будем называть ее критической частотой вращения), изменяется в меньшую сторону при разрушении СЗ;
- 2) значение максимальной нагрузки также уменьшается;
- 3) при работе на низкой частоте вращения ($\omega < 0,9\omega_0$) разрушение СЗ производит отрицательный эффект (увеличивает нагрузку);
- 4) при работе на высокой частоте вращения ($\omega > 1,15\omega_0$) в случае отсоединения передней опоры вентилятора происходит уменьшение нагрузки, как на рабочей, так и на критической частоте вращения (ее нужно будет проходить при замедлении ротора);
- 5) при работе на промежуточной частоте вращения ($0,9\omega_0 < \omega < 1,15\omega_0$) разрушение СЗ,

с одной стороны, позволяет снизить уровень установившейся нагрузки на переднюю подвеску на рабочей частоте вращения, а с другой стороны, приводит к необходимости прохождения критической частоты вращения при замедлении ротора.

Варианты частичного разрушения опоры. Помимо полного отсоединения опоры существуют схемы ее частичного разрушения.

Схема частичного снижения жесткости опоры при разрушении СЗ представлена на рис. 8. При срезании болта 1 коническая оболочка 3 перестает передавать нагрузку, следовательно, податливость опоры определяется податливостью элемента 2. Таким образом, варьируя параметрами 2 и 3, можно добиваться различных характеристик опоры до и после разрушения СЗ.

Более сложная схема, позволяющая полностью отсоединить переднюю опору вала вентилятора, а характеристику второй опоры при разрушении болтов заменить на кусочно-линейную, изображена на рис. 9.

Болты 1 разрушаются под действием растягивающей нагрузки, полностью отсоединяя опору 3. Болты 2 срезаются, после чего задняя опора вентилятора 4 продолжает передавать нагрузку только в случае перекрытия зазора (показан на рисунке).

Таким образом, СЗ позволяют не только полностью отсоединить опору, но и заменить ее характеристику:

- на более податливую;
- на кусочно-линейную.

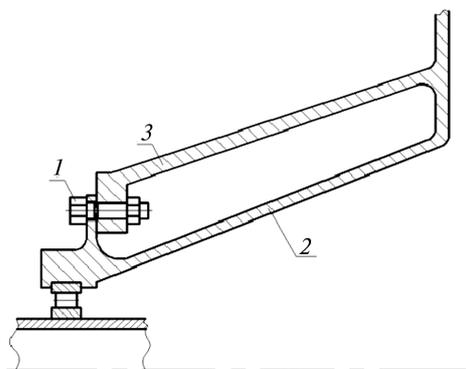


Рис. 8. Вариант опоры с изменяемой при разрушении СЗ жесткостью:
1 — СЗ; 2, 3 — элементы передней опоры вала вентилятора

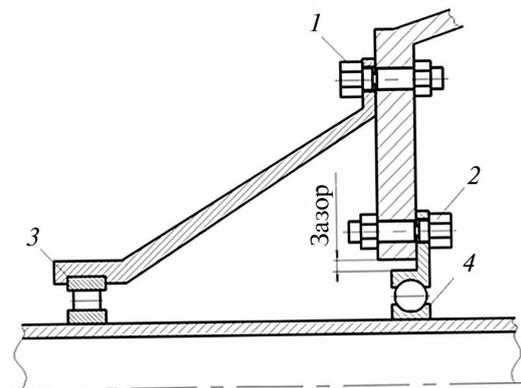


Рис. 9. Конструктивное внедрение двух СЗ:
1, 2 — СЗ; 3 — передняя опора вентилятора;
4 — задняя опора вентилятора

Анализ влияния параметров системы на нагруженность передней подвески двигателя. Выше при исследовании варьировалась угловая скорость вала НД и изучалось изменение его поведения под действием дисбаланса после разрушения СЗ. Однако на практике варьировать частоту вращения ротора авиационного ГТД не представляется возможным. Дальнейшие расчеты будем проводить, задавшись рабочей частотой вращения ω_0 . Выше было показано, что на этой частоте выигрыш по нагрузке в момент времени после обрыва лопатки нивелируется уменьшением критической частоты вращения. С целью снижения нагрузки на подвеску после обрыва лопатки вентилятора проанализируем влияние параметров системы на поведение ротора. Далее, исходя из проведенного исследования, изменим параметры модели так, чтобы разрушение СЗ давало наибольший выигрыш по нагрузке на переднюю подвеску.

Из приведенных ранее параметров изменить возможно следующие:

- зазор между лопатками вентилятора и металлическим корпусом;
- зазор между валами;
- характеристику задней опоры вала вентилятора.

На рисунке 10, а приведены зависимости установившейся нагрузки на переднюю подвеску двигателя от жесткости задней опоры вентилятора (для случаев наличия и отсутствия СЗ в передней опоре); на рис. 10, б — от зазора между лопатками вентилятора и металлическим кор-

пусом, а на рис. 10, в от зазора между наружным кольцом подшипника и статором в задней опоре вентилятора (в случае разрушения СЗ по схеме, представленной на рис. 9). Все графики построены для частоты вращения ω_0 .

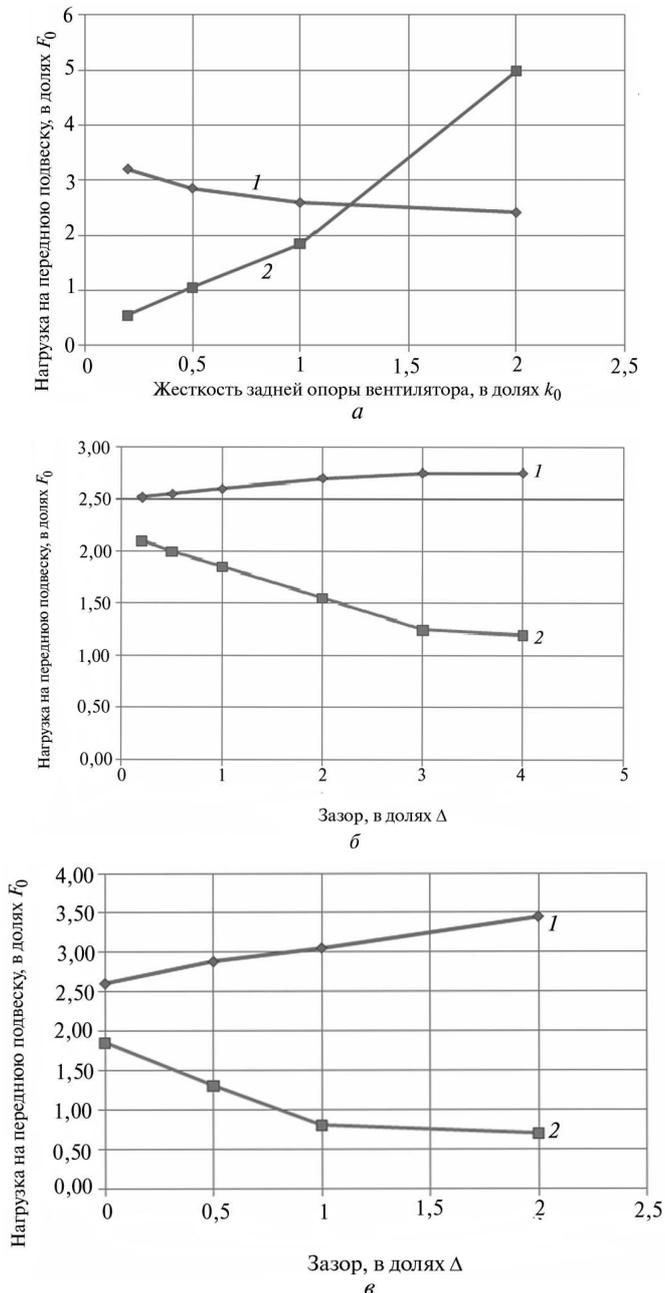


Рис. 10. Зависимость нагрузки на переднюю подвеску:

а — от жесткости задней опоры вентилятора;
 б — от зазора между лопатками вентилятора и металлическим корпусом; в — от зазора между наружным кольцом подшипника и статором в задней опоре вентилятора;

1 — без обрыва СЗ; 2 — с обрывом СЗ

Расчеты показали, что зазор между валами незначительно влияет на движение ротора под действием дисбаланса.

Принципиальное различие между рисунками для разрушенного и не разрушенного СЗ объясняется тем, что на рассматриваемой частоте вращения ω_0 при отсоединении передней опоры вентилятора ротор переходит из докритической в закритическую область. Таким образом, кривые 1 на рис. 10 характеризуют влияние соответствующего параметра на нагрузку передней подвески при работе ротора в докритической области, а кривые 2 — в закритической.

Из проведенных расчетов, можно сделать вывод: в случае разрушения СЗ увеличение зазоров и уменьшение жесткости задней опоры вентилятора позволяет усилить выигрыш по нагрузке на подвеску. В случае, когда СЗ в переднюю опору вентилятора не вводится, подобное изменение параметров будет давать, наоборот, отрицательный эффект.

Результаты расчетов оптимизированной схемы. Исходя из исследований, проведенных выше, оптимизируем параметры модели. Для случая разрушения СЗ в передней опоре вентилятора изменим модель, представленную ранее:

- увеличим зазор между лопатками вентилятора и корпусом от Δ до 3Δ ;
- во вторую опору ротора введем СЗ, при разрушении уменьшающее ее жесткость в 5 раз: с $1,0k_0$ до $0,2k_0$.

Для случая, когда СЗ в систему не вводится, оставим параметры модели прежними. Таким образом, сравним варианты при наличии и отсутствия СЗ в опорах вентилятора при оптимизированных (с точки зрения минимизации нагрузки на переднюю подвеску) для каждого случая параметрах системы.

Зависимости установившейся величины нагрузки на переднюю подвеску двигателя от частоты вращения, на которой произошел обрыв лопатки, приведены на рис. 11. Рассмотрены три случая:

- 1) СЗ отсутствует;
- 2) СЗ введено только в переднюю опору, при его разрушении опора отсоединяется полностью;
- 3) СЗ введены в обе опоры, при их разрушении передняя опора отсоединяется полно-

стью, а жесткость задней снижается в пять раз (см. рис. 8).

На рисунках видно, что частичное разрушение задней опоры вентилятора в совокупности с полным отсоединением передней приводит:

- к снижению нагрузки на переднюю подвеску на рабочей частоте вращения;
- к удалению критической частоты вращения от рабочей;
- к снижению нагрузки при прохождении критической частоты вращения.

Заметим, что нагрузки на переднюю подвеску на критической частоте вращения при наличии СЗ в опорах выше, чем нагрузка на рабочей частоте вращения при отсутствии СЗ. Поэтому принципиальное значение принимает скорость прохождения критической частоты вращения при замедлении ротора.

В работе [2] выполнены трехмерные расчеты поведения ротора после обрыва лопатки вентилятора без учета аэродинамических сил. Согласно полученным результатам, за время, соответствующе 10 оборотам на рабочей частоте вращения, после обрыва лопатки угловая скорость падает приблизительно на $0,25\omega_0 \dots 0,5\omega_0$. Поэтому для оценки максимальной нагрузки на подвеску двигателя зададимся законом изменения угловой скорости вала НД от времени, прошедшего после обрыва лопатки вентилятора (рис. 12):

- предполагаем, что в течение времени, соответствующем первым нескольким десяткам

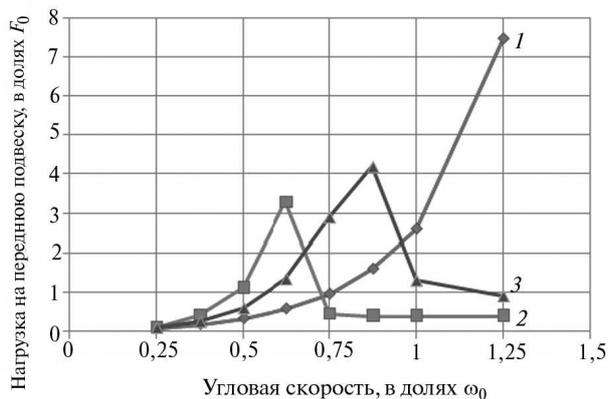


Рис. 11. Зависимости установившейся величины нагрузки на переднюю подвеску от частоты вращения, на которой произошел обрыв лопатки вентилятора:

- 1 — без СЗ; 2 — СЗ введены в обе опоры;
- 3 — СЗ введено только в переднюю опору

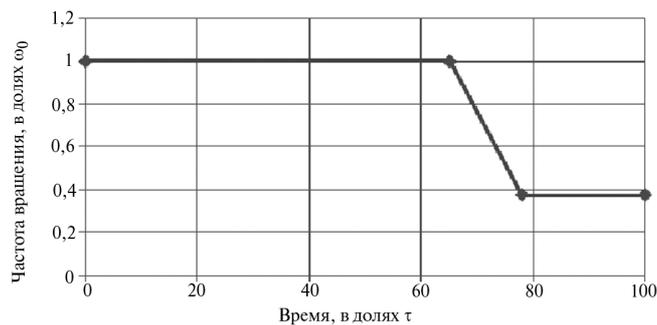


Рис. 12. Принятая зависимость угловой скорости вала НД от времени, прошедшего с момента обрыва лопатки вентилятора

оборотов вала после обрыва лопатки вентилятора, подача топлива не отключается и вращение продолжается с рабочей частотой;

- затем происходит отключение подачи топлива, и скорость вращения вала за время 13τ падает до частоты авторотации ($\sim 3/8 \omega_0$), поддерживаемой набегающим потоком;
- скорость вращения вала не изменяется до посадки самолета.

На рисунке 13 представлены соответствующие принятому закону изменения угловой скорости зависимости нагрузки на переднюю подвеску двигателя от времени, прошедшего с момента обрыва лопатки вентилятора. Изображены три графика, соответствующие трем зависимостям, приведенным на рис. 11.

Наиболее показательные значения нагрузки на переднюю подвеску приведены в таблице.

Таблица

Характерные значения нагрузки на переднюю подвеску двигателя после обрыва лопатки вентилятора, в долях F_0

Рассматриваемый случай	Наибольшая нагрузка		
	в первые моменты времени после обрыва лопатки	при прохождении критической частоты вращения	достигаемая
СЗ в опоры не вводится	3,1	—	3,1
СЗ введено только в переднюю опору вентилятора	2,55	3,6	3,6
СЗ введены в обе опоры вентилятора	1,35	1,65	1,65

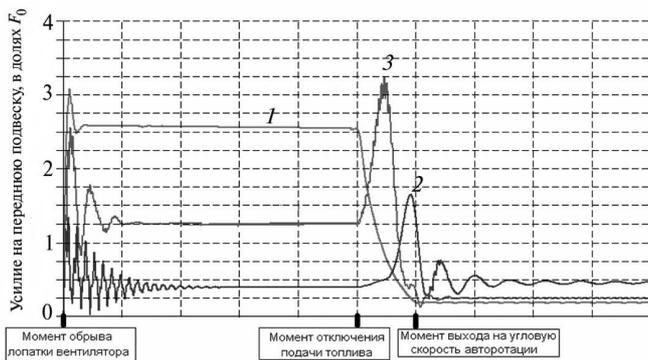


Рис. 13. Зависимости нагрузки на переднюю подвеску двигателя от времени после обрыва лопатки вентилятора:

1 — без СЗ; 2 — СЗ введены в обе опоры;
3 — СЗ введено только в переднюю опору

Из представленных зависимостей следует, что:

- введение СЗ позволяет снизить максимальную величину нагрузки на переднюю подвеску в первые моменты времени после обрыва лопатки вентилятора, а также установившуюся величину нагрузки на рабочей частоте вращения;
- введение СЗ в переднюю опору приводит к необходимости прохождения критической частоты вращения при замедлении вала НД;
- вводить СЗ только в переднюю опору вентилятора для представленной модели нецелесообразно, так как максимальная нагрузка, достигаемая при прохождении критической частоты вращения, в этом случае оказывается выше, чем нагрузка, воспринимаемая передней подвеской в первые моменты времени после обрыва лопатки вентилятора в случае, когда СЗ в опоры не вводятся;
- оптимальным вариантом с точки зрения снижения наибольшей нагрузки на подвеску после обрыва лопатки вентилятора является введение СЗ в обе опоры вентилятора.

Выводы

В представленной работе построена конечно-элементная модель, позволяющая изучать поведение ротора после обрыва лопатки вентилятора с учетом больших перемещений, эффектов внезапного приложения нагрузки и прохождения критической частоты вращения, а также фактора контактных взаимодействий ротора со статором.

С помощью предложенной модели изучено влияние СЗ, введенного в опоры вентилятора, на поведение ротора после обрыва лопатки вентилятора. Показано, что при отсоединении передней опоры вентилятора при частоте вращения ω_0 ротор в данной модели переходит из докритической в закритическую область вращения и самоцентрируется, снижая нагрузку на переднюю подвеску двигателя. Кроме того, в работе рассмотрено влияние зазора между лопатками вентилятора и корпусом, а также разрушения СЗ в задней опоре вентилятора, на нагруженность передней подвески двигателя при работе ротора как в докритической, так и в закритической области.

Показано, что введение СЗ только в переднюю опору вала вентилятора для данной модели может дать отрицательный эффект, вызванный необходимостью прохождения критической скорости вращения при замедлении вращения. Кроме того, после отсоединения передней опоры вентилятора критическая частота вращения опасно приближается к рабочей частоте ω_0 . Однако введение разрушаемых элементов дополнительно во вторую опору позволяет добиться того, чтобы максимальная нагрузка, достигаемая при быстром прохождении критической скорости вращения, оказалась ниже нагрузки, достигаемой в первые моменты времени после обрыва лопатки вентилятора для исходной системы.

Представленная модель может быть обобщена для многовальной системы. Также в ней могут быть учтены динамические характеристики статора. Таким образом, модель может использоваться при рассмотрении реальных конструкций.

Литература

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.
2. Kelly S. Carney, Charles Lawrence, Dorothy V. Carney. Aircraft Engine Blade-Out Dynamics. 7th International LS-DYNA Users Conference. P. 17–26.

Статья поступила в редакцию 03.07.2012