

УДК 517.972.5 + 62-251 + 621.438

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ВЫСОКООБОРОТНОГО РОТОРА МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ**

*П.А. Тараненко, Н.С. Пирогова*

Статья посвящена анализу собственных частот и форм ротора микрогазотурбинной установки. Такая оценка получена расчетом – методом конечных элементов – и экспериментальным путем с применением LMS технологии модального анализа, используемой в пакете LMS Test. Lab (Siemens PLM Software). Проведено исследование собственных частот ротора при различных жесткостях опор. Даны рекомендации по конструкции ротора, позволяющие увести его собственные частоты из недопустимой области.

Ключевые слова: микрогазотурбинная установка; собственная частота; собственная форма; метод конечных элементов.

Микрогазотурбинная энергоустановка (МГТУ) предназначена для выработки и децентрализованного снабжения внешних потребителей электрической энергией с номинальной мощностью 100 кВт и тепловой мощностью 200 кВт.

Микрогазотурбинные установки малой мощности используют на промышленных предприятиях, в медицинских учреждениях, жилищных котельных поселках, на магистральных газопроводах, нефтепроводах, газораспределительных станциях; в энергодефицитных районах Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока; для резервирования линий электропередач, питающих ответственных потребителей энергии, для восполнения дефицита электроэнергии, вызванного стихийными бедствиями и другими чрезвычайными ситуациями; в качестве мобильных источников электрической и тепловой энергии для нужд МЧС.

Наиболее ответственной частью МГТУ является ротор, рабочая частота которого составляет 65 000 об/мин. Он состоит из ротора турбокомпрессора (ТК) и ротора стартер-генератора (СГ), соединенных упругой связью (рис. 1). Одним из требований, предъявляемых к высокооборотному ротору, является исключение попадания его собственных частот в диапазон  $\pm 30\%$  от рабочей частоты вращения (45 500–84 500 об/мин).

Таким образом, возникает задача разработки ротора, обладающего собственными частотами, которые не попадают в запретную область, оговоренную выше. Аналогичной проблеме посвящены работы [1, 2].

Решение задачи выполнено в несколько этапов.

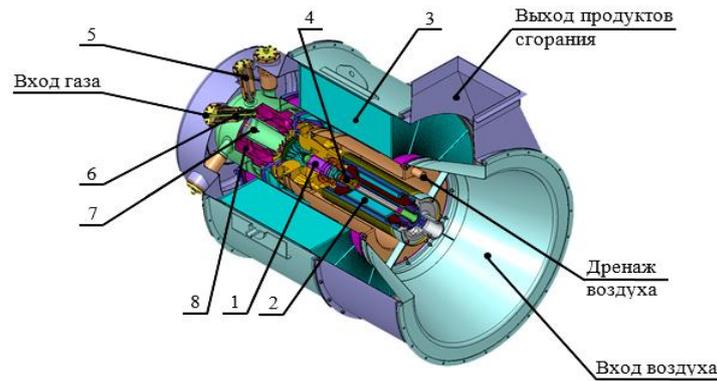


Рис. 1. Основные элементы МГТУ: 1 – турбокомпрессор; 2 – стартер-генератор высокооборотный; 3 – рекуператор кольцевой; 4 – упругий торсион; 5 – свеча зажигания; 6 – инжектор; 7 – термопара; 8 – камера сгорания

Первый этап заключался в приближенной оценке собственных частот и форм ротора МГТУ методом конечных элементов (КЭ) в пакете Ansys Workbench. Предполагалось, что все элементы ротора абсолютно жестко связаны друг с другом. Ротор считался не закрепленным. Найдены собственные частоты изгибных колебаний ротора в диапазоне частот от 0 до 120000 об/мин (2000 Гц). Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты расчета собственных частот и форм ротора МГТУ  
при его поперечных колебаниях

№ собственной формы	Форма колебаний на собственной частоте	Собственная частота
1–4		0 Гц (0 об/мин)
7		78,2 Гц (4692 об/мин)
8		86,6 Гц (5196 об/мин)
11		488,7 Гц (29 322 об/мин)
12		498,5 Гц (29 910 об/мин)
14		1165 Гц (69 900 об/мин)
17		1453 Гц (87 180 об/мин)
15		1302 Гц (78 120 об/мин)
16		1378 Гц (82 680 об/мин)

Первые шесть собственных частот соответствуют колебаниям ротора как твердого тела. Седьмой и восьмой частотам соответствуют колебания ротора турбокомпрессора и ротора starter-генератора как абсолютно твердых тел, связанных упругим торсионом с малой изгибной жесткостью (первая изгибная форма всего ротора).

Второй изгибной форме ротора соответствуют 11 и 12 собственные частоты (колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях). Третья изгибная собственная форма ротора соответствует частотам 1165 Гц и 1453 Гц. Эта форма определяется, в первую очередь, параметрами ротора starter-генератора. Четвертая изгибная форма ротора соответствует частотам 1302 Гц и 1378 Гц. На этой форме преимущественно колеблется ротор турбокомпрессора.

На втором этапе собственные частоты роторов ТК и СГ оценены по отдельности. Основные элементы ротора ТК представлены на рис. 2. Конструкция ротора СГ изображена на рис. 3.

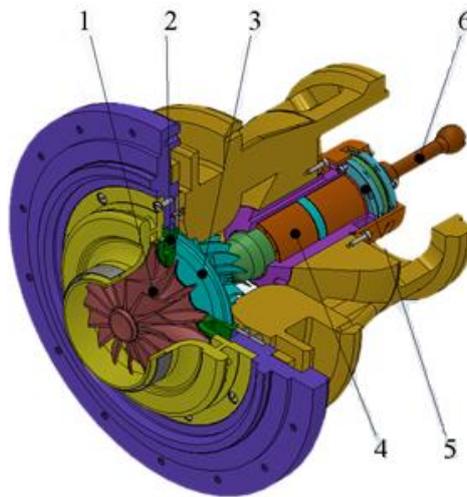


Рис. 2. Основные элементы ротора ТК: 1 – колесо центростремительной турбины; 2 – газовое уплотнение; 3 – колесо центробежного компрессора; 4 – радиальный газодинамический подшипник; 5 – торцевой газодинамический подшипник; 6 – торсион

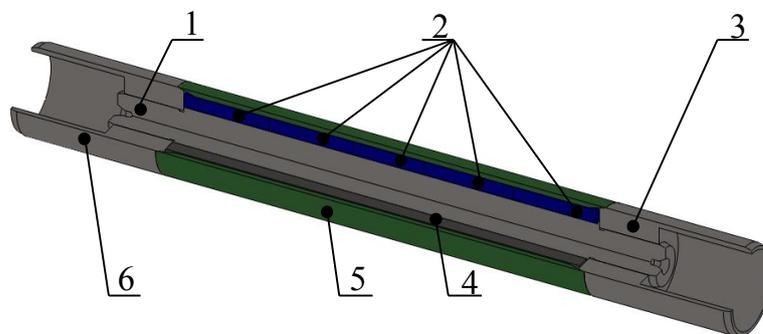
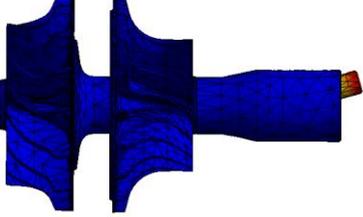
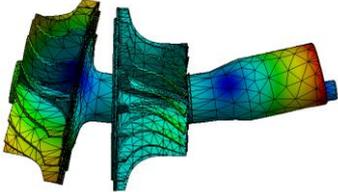


Рис. 3. Основные элементы ротора СГ: 1 – вал; 2 – магниты; 3, 6 – втулки; 4 – вставки (2 шт.); 5 – углелента

Оценка собственных частот роторов ТК и СГ выполнена методом КЭ. Значения частот и соответствующие им формы представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

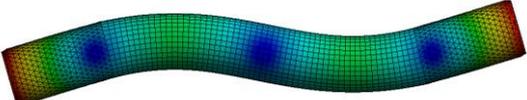
Результаты расчета собственных частот и изгибных форм ротора ТК

 <p>870 Гц (52 200 об/мин) 873 Гц (52 380 об/мин)</p>	 <p>2228 Гц (133 680 об/мин) 2229 Гц (133 740 об/мин)</p>
--	---

Первой изгибной частоте соответствуют колебания элемента ротора ТК. Эта форма не является опасной. Наибольший интерес представляет вторая форма изгибных колебаний ротора ТК (табл. 2). Однако соответствующая ей частота 133 680 об/мин расположена далеко за пределами диапазона 45 500–84 500 об/мин. Таким образом, ротор ТК обладает достаточно высокой изгибной жесткостью.

Таблица 3

Результаты расчета собственных частот и форм ротора СГ

Собственная форма	Собственная частота
	1023 Гц (61 380 об/мин)
	1024 Гц (61 440 об/мин)
	2437 Гц (146 220 об/мин)
	2438 Гц (146 280 об/мин)

Первая собственная частота, соответствующая изгибным колебаниям ротора СГ и найденная расчетным путем, составила 1023 Гц (табл. 3) и оказалась недопустимо близкой к рабочей частоте вращения.

На третьем этапе работы выполнена экспериментальная оценка собственных частоты и формы ротора СГ. В эксперименте ротор вывешивали на податливых тросах (рис. 4). Как показали предварительные эксперименты, частота колебаний ротора как твердого тела на упругой подвеске составила около 9,4 Гц (при первой частоте изгибных колебаний 672 Гц). Такая подвеска является податливой и практически не оказывает влияния на собственные частоты и формы ротора при его изгибных колебаниях. С целью определения частот и форм изгибных колебаний, на внешней поверхности ротора наклеены десять однокомпонентных акселерометров. Возбуж-

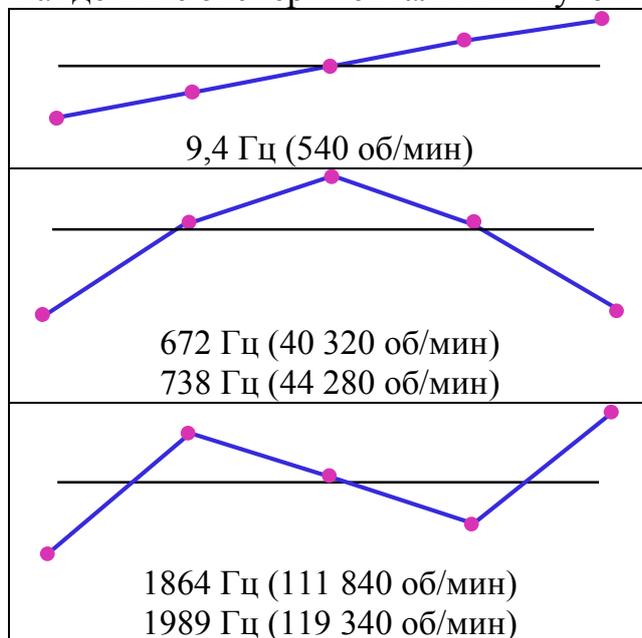
дение колебаний осуществлялось при помощи ударного молотка. Испытания проведены в модуле Impact Testing пакета LMS Test.Lab 13A с использованием технологии модального анализа [3]. Внешний вид установки показан на рис. 4. Результаты эксперимента представлены в табл. 4.



Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 – однокомпонентные акселерометры (10шт.); 2 – податливые тросы (4 шт.)

В результате численного определения собственных частот и форм ротора СГ и экспериментальной проверки установлено, что результаты расчета отличаются от эксперимента на 30 %.

Таблица 4  
Собственные частоты и формы изгибных колебаний ротора СГ, найденные экспериментальным путем



Выдвинуто предположение о том, что одной из возможных причин такого недопустимого различия являются условия сопряжения магнитов и стального вала. Для подтверждения этой гипотезы выполнена серия расчетов методом КЭ при условии, что магниты абсолютно жестко прилегают только к углеренте, не соединены друг с другом и с валом. Результаты расчета представлены в табл. 5.

В изготовленной конструкции реальные условия сопряжения магнитов и вала находятся между двумя предельными случаями – когда магниты соединены с валом по всей цилиндрической поверхности, и когда магниты не связаны с валом, но жестко прилегают к углеренте. Таким образом, собственная частота изготовленного ротора стартер-генератора, полученная экспериментальным путем, является достоверной и составляет 672 Гц (40 320 об/мин) в вертикальной и 738 Гц

(44 280 об/мин) в горизонтальной плоскости. Результаты определения собственных частот и форм ротора стартер-генератора приведены в табл. 6.

По результатам анализа (табл. 6) принято решение построить эквивалентную модель ротора стартер-генератора, собственные частоты и формы которой будут близки к результатам эксперимента.

Такая модель построена по критериям равенства масс, длин и первых собственных частот изгибных колебаний. Результаты расчета собственных частот эквивалентного ротора приведены на рис. 5 и в табл. 7.

Таблица 5

Собственных частот и форм скорректированной модели ротора СГ

Форма колебаний на собственной частоте	Собственная частота
	612 Гц (36 720 об/мин) 631 Гц (37 860 об/мин)

Таблица 6

Первая собственная частота изгибных колебаний ротора стартер-генератора

Численное определение («жесткий контакт элементов ротора»)	Экспериментальный модальный анализ	Уточненный расчет («мягкий» контакт элементов ротора)
1023 Гц	672 Гц	612 Гц
1024 Гц	738 Гц	631 Гц

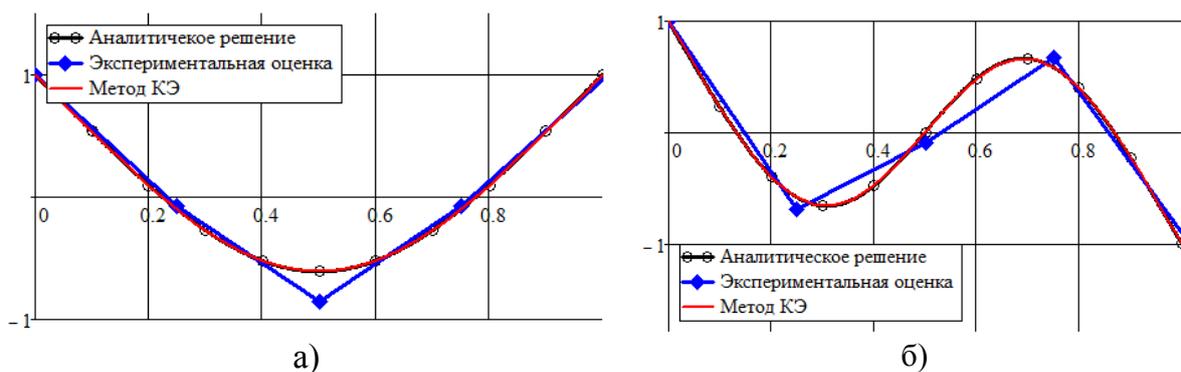


Рис. 5. Сравнение собственных форм ротора СГ, полученных аналитически, экспериментально и методом КЭ: а) – первая изгибная собственная форма; б) – вторая изгибная собственная форма

Таким образом, построена эквивалентная модель ротора СГ, у которой близки к эксперименту оказались не только первая, но и вторая собственные частоты и формы изгибных колебаний.

Таблица 7

Сравнение собственных частот эквивалентной модели ротора СГ

Собственная частота, Гц		
Эквивалентный ротор СГ	Эксперимент	Метод КЭ
738	738	727
2040	1989	1963

Следующий этап работы заключался в определении влияния жесткостей подшипниковых опор ротора МГТУ. С этой целью в КЭ пакете Ansys Mechanical APDL создана упрощенная балочная модель ротора (рис. 6) и выполнен расчет собственных частот ротора в широком диапазоне жесткостей опор.

Как показал расчет (рис. 7), при жесткостях опор меньших, чем  $10^6$  Н/м, упругие опоры практически не оказывают влияния на собственные частоты и формы ротора, т.е. его можно считать не закрепленным.

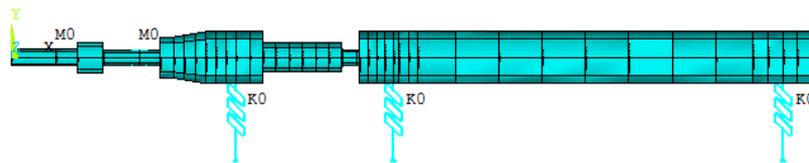


Рис. 6. Балочная модель ротора МГТУ

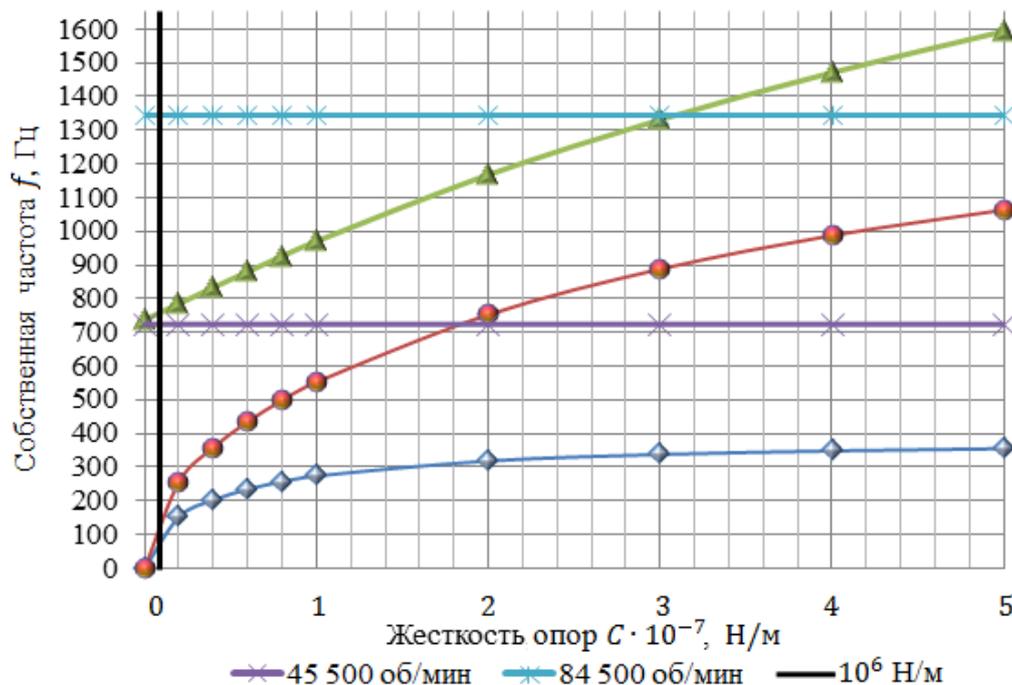


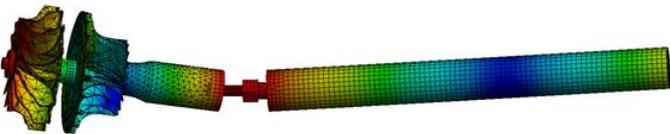
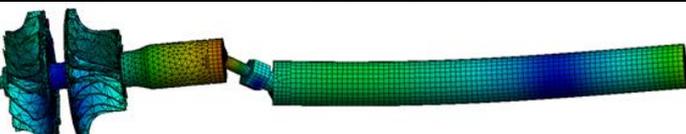
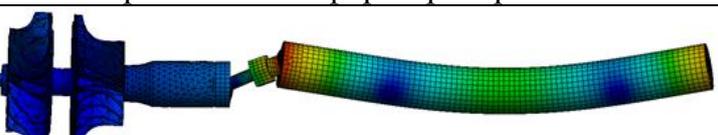
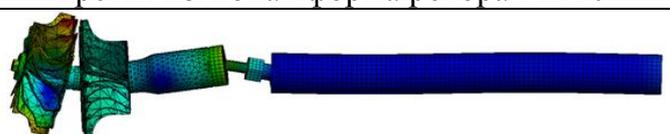
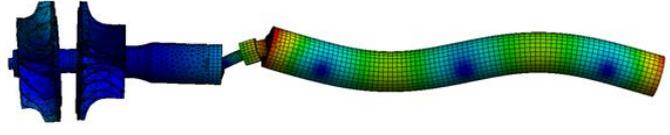
Рис. 7. Зависимость собственных частот ротора от жесткостей опор

На следующем этапе работы выполнен расчет собственных частот ротора МГТУ в условиях свободного вивешивания (что соответствует подшипниковым опорам с жесткостями меньшими, чем  $10^6$  Н/м), с учетом эквивалентной модели ротора СГ и при различных конструктивных исполнениях элемента связи между ротором стартер-генератора и ротора турбокомпрессора. Результаты расчета конструкции ротора МГТУ, собственные частоты которой расположены в допустимом диапазоне оборотов, приведены в таблице 8.

Таким образом, на основе расчетно-экспериментального подхода разработаны рекомендации для конструкции ротора МГТУ: жесткости подшипниковых опор не должны превышать  $10^6$  Н/м; ротор турбокомпрессора и ротор стартер-генератора должны быть связаны упругим элементом с малой изгибной жесткостью; найдено конструктивное исполнение такого элемента, при котором собственные частоты ротора оказываются вне диапазона  $\pm 30\%$  от рабочей частоты вращения (45 500–84 500 об/мин).

Таблица 8

Собственные частоты и формы ротора МГТУ

Форма колебаний на собственной частоте	Собственная частота
 Первая изгибная форма ротора МГТУ	51,324 Гц (3079,44 об/мин) 52,158 Гц (3129,48 об/мин)
 Вторая изгибная форма ротора МГТУ	307,56 Гц (18 453 об/мин) 308,87 Гц (18 532 об/мин)
 Третья изгибная форма ротора МГТУ	729,72 Гц (43 783 об/мин) 730,31 Гц (43 818 об/мин)
 Четвертая изгибная форма ротора МГТУ	1496,8 Гц (89 808 об/мин) 1497,7 Гц (89 862 об/мин)
 Пятая изгибная форма ротора МГТУ	1766,6 Гц (105 996 об/мин) 1766,9 Гц (106 014 об/мин)

*Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013 г.*

### Библиографический список

1. Lee, Y.-B. Rotordynamic performance measurement of an oil-free turbocompressor supported on gas foil bearings / Y.-B. Lee, S.-B. Cho, T.-Y. Kim, C.H. Kim, T.H. Kim // The 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics (September 12–15, 2010, Korea). 2010. Pp. 420–426.
2. Kim, K.-S. Rotordynamic characteristics of 65kw micro turbine with compliant air foil bearings / K.-S. Kim, B.-C. Cho, M.-H. Kim // The 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics (September 12–15, 2010, Korea). 2010. Pp. 799–803.
3. Хейлен, В. Модальный анализ: теория и испытания / В. Хейлен, С. Ламменс, П. Сас. – М.: Новатест, 2010. – 319 с.