

УДК 621.452.3.034

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ОПОРАХ РОТОРОВ

Н. В. КИКОТЬ
С. А. ДЕГТЯРЕВ
М. К. ЛЕОНТЬЕВ
Е. И. СНЕТКОВА

В статье рассматривается методика анализа деформированного и силового состояния радиально-упорных подшипников качения в составе роторных систем. Разработанные на ее основе модель и алгоритмы включены в программную систему DYNAMICS R4. Модель подшипника имеет 5 степеней свободы, учитывает его геометрию, количество тел качения, их инерцию, зазор. Алгоритмы программной системы позволяют получить для любого режима, характеризующегося частотой вращения, радиальными и осевыми силами, температурными факторами, с учетом веса ротора положение наружного и внутреннего колец подшипника, для каждого тела качения определить углы контакта, все силовые факторы, действующие по 5-ти степеням свободы. Эта информация является исходной для последующего получения действующих напряжений в зонах контакта тел качения с кольцами. Полученные данные позволяют более обоснованно подойти к определению долговечности подшипника в составе конкретной роторной системы. Разработанные средства и методика анализа применены к анализу деформированного и силового состояния радиально-упорного подшипника качения опоры КВД в составе экспериментальной установки для исследования опорного узла ротора.

РОТОРНАЯ ДИНАМИКА, РАДИАЛЬНО-УПОРНЫЕ ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, DYNAMICS R4

Введение

Задача определения долговечности подшипников качения, установленных в опорных узлах роторов, всегда являлась одной из приоритетных для конструкторов турбомашин. Для ее решения надо определять перемещения, деформации и нагрузки практически во всех элементах подшипниках качения. При этом надо отметить, что значения всех этих параметров зависят от большого количества факторов при работе турбомшины. В частности необходимо учитывать геометрию подшипника, частоты вращения роторов, силу веса, радиальные и осевые силы, температурные факторы, наличие охлаждающей жидкости и т. д. Часть этих данных может быть получена достаточно просто из чертежей, расчетов, экспериментов. Вместе с тем часть параметров может быть получена только при рассмотрении динамического поведения роторов в нестационарной и нелинейной постановке. Сегодня эта задача является весьма трудоемкой, и практически не существует методик и средств для ее решения у конструкторов.

В настоящей статье делается попытка решить первую часть этой задачи. В частности, разработать методику и алгоритмы определения перемещений, деформаций и реакций в подшипниках качения (в том числе межроторных) с учетом их геометрии, количества тел качения, инерции, зазора, а также тех форм вынужденных колебаний, которые имеет роторная система при работе на конкретном режиме. На их основе исследовать работу подшипников качения установки для испытания опорных узлов роторов авиационных двигателей.

При решении этой задачи не учитывается сопротивление охлаждающей подшипник жидкости. Этот факт может несколько изменить получаемые результаты, однако даже в такой постановке мы можем приблизиться к реальным напряжениям в зонах контакта колец и тел качения, а, следовательно, и к решению задачи о долговечности подшипников.

Для решения задачи используется программная система для расчета и анализа вибрационных характеристик турбомашин DYNAMICS R4 [1], имеющая в своем составе нелинейную модель радиально-упорного (шарикового) подшипника, позволяющую определять перемещения, деформации и нагрузки в подшипниках качения в составе роторной системы по пяти степеням свободы [2], [3]. Алгоритмы нестационарного анализа позволяют учесть все многообразие нагружения роторной системы и подшипников качения в нелинейной постановке.

Моделирование экспериментальной установки

Исходная компоновка экспериментальной установки, на основании которой была сделана модель роторной системы, представлена на рис. 1.

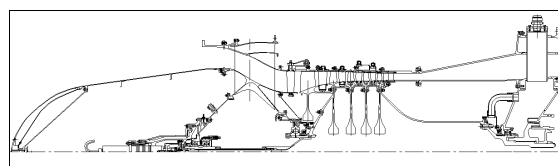


Рис. 1 Компоновка экспериментальной установки

В состав установки входят корпусные элементы, опорный узел, включающий радиально-упорный подшипник КВД, опорный узел с роликовым подшипником, ротор КВД с технологическим валом и цапфой, токосъемник, опирающийся на два шариковых подшипника.

Главное окно программной системы DYNAMICS R4 с моделью исследуемой установки представлено на рис. 2.

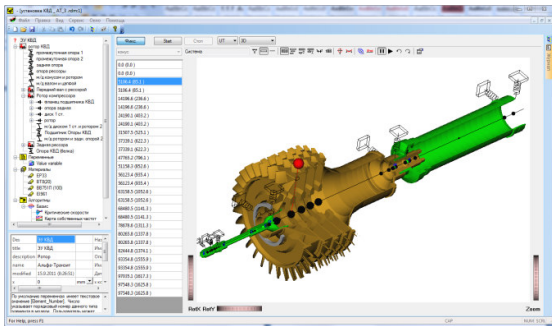


Рис. 2 Окно программной системы DYNAMICS R4

В модели исключены все корпусные элементы, их отсутствие не оказывает существенного влияния на динамические свойства роторной системы, результаты анализа подшипника опоры КВД, и не меняет постановки задачи.

Модель роторной системы экспериментальной установки показана на рис. 3 и рис. 4.

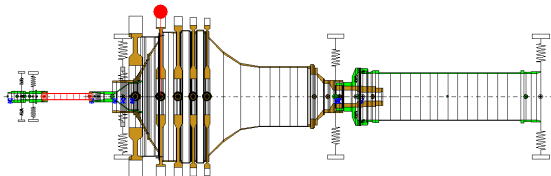


Рис. 3 Модель роторной системы экспериментальной установки

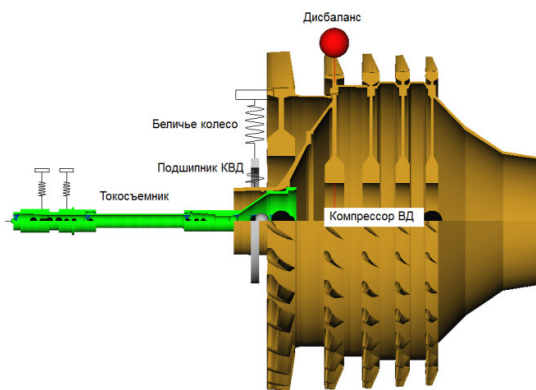


Рис. 4 Компрессорная часть модели установки

Исходные данные по экспериментальной установке, а также по нелинейному подшипнику показаны в табл. 1.

Таблица 1

Посадочный диаметр подшипника на вал, мм	130
Посадочный диаметр подшипника в корпус, мм	200
Диаметр дорожки качения внутреннего кольца, мм	145.024
Диаметр дорожки качения наружного кольца, мм	187.29
Чертежный радиальный зазор подшипника в свободном состоянии max...min, мм	0.18...0.15
Паспортный угол контакта, град	26
Внутренний диаметр вала, мм	116
Наружный диаметр корпуса, мм	238.8
Посадка внутреннее кольцо/вал max...min, мм	0.013...0
Посадка наружное кольцо/вал max...min, мм	0...0
Коэффициент линейного расширения град ¹	$1.16 \cdot 10^{-5}$
Разность температур между наружным кольцом (НК) и внутренним кольцом (ВК), °С	0...40

Дополнительно задаются положения центров радиусов кривизны дорожек качения с учетом монтажного зазора и температурного состояния для внутреннего и наружного колец подшипника КВД; радиусы кривизны; осевая сила, нагружающая подшипник КВД; дисбаланс компрессорной части ротора экспериментальной установки. Температурный режим считается постоянным для всего исследуемого диапазона частот вращения ротора.

Для задания параметров подшипника необходимо наличие подробных чертежей подшипника, либо наличие информации по параметрам дорожек тел качения. Рекомендуется использовать вариант задания параметров дорожек через координаты центров кривизны дорожек качения. Этот вариант является наиболее точным методом задания геометрии подшипника, а при наличии чертежей подшипника и самым простым.

При моделировании подшипника в составе ротора следует иметь в виду следующие допущения: каждое тело качения в трехточечном подшипнике на рабочих режимах имеет только две точки контакта; перекладка осевой силы и смена контакта на внутреннем кольце не происходит.

Ниже приведены результаты расчета общих характеристик модели нелинейного подшипника. К общим характеристикам будем относить: деформацию подшипника по всем направлениям; силовые реакции подшипника по всем направлениям.

На рис. 5 показана амплитудно-временная характеристика (АВХ) роторной системы в сечении подшипника ротора КВД по направлению Y.

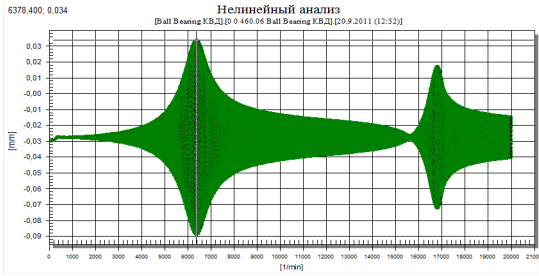


Рис. 5 АВХ по направлению Y

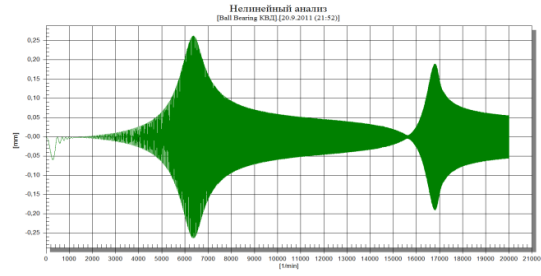


Рис. 8 АВХ по деформации (направление Y)

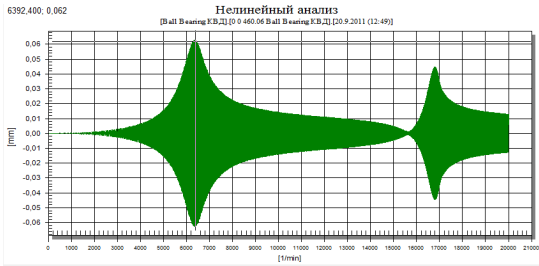


Рис. 6 АВХ по направлению X (виброперемещение)

Реакции подшипника показаны на рис.9 и 10.

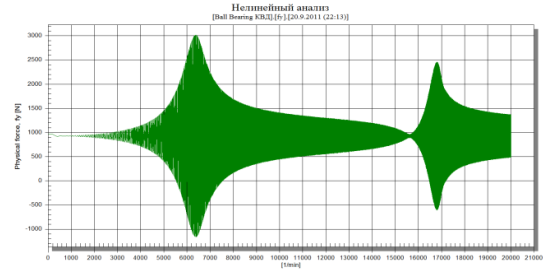


Рис.9 Реакции подшипника по направлению Y

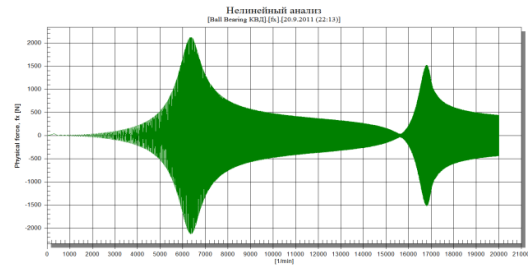


Рис. 10 Реакции подшипника по направлению X

Из полученных графиков следует, что ротор имеет два резонансных режима в районе 6300 об/мин и в районе 16800 об/мин.

Ниже показаны характеристики подшипника КВД, полученные в результате нестационарного анализа модели ротора с нелинейным подшипником КВД при осевом нагружении 9800 Н, дисбалансе компрессора 100 гсм, с учетом силы веса для различных режимов.

Форма вывода результатов анализа: амплитудно-временные характеристики; вывод в любой временной точке в текстовом формате; возможность получения информации в графическом виде.

Результаты общего анализа

На рис. 7 и 8 показаны АВХ деформации подшипника по направлениям Y, X соответственно.

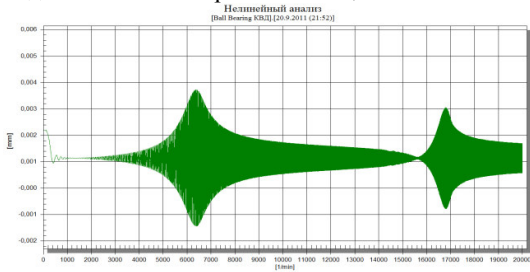


Рис. 7 АВХ по деформации (направление Y)

Результаты нестационарного анализа роторной системы с нелинейным подшипником КВД, предварительно нагруженной осевой силой, динамической нагрузкой от дисбаланса ротора и силой веса позволяют оценить и состояние подшипника КВД на любом из режимов работы установки.

Пользователь может получить распределение реакции подшипника по телам качения; деформации в точках контакта тел качения и колец подшипника; углы контакта по каждому из тел качения в подшипнике; положение колец подшипника.

В программном комплексе DYNAMICS R4 полученные результаты выводятся в виде массива данных в текстовом формате, табл. 2.

Таблица 2

phi_i [град]	Deltai [M]	Gi [M]	Ge [M]	Q [N]	Alphai [град]
9.00E+01	-1.54E-05	7.83E-06	7.59E-06	1.05E+03	-2.85E+01
1.10E+02	-1.53E-05	7.76E-06	7.52E-06	1.04E+03	-2.85E+01
1.30E+02	-1.53E-05	7.75E-06	7.51E-06	1.04E+03	-2.85E+01
1.50E+02	-1.53E-05	7.79E-06	7.55E-06	1.04E+03	-2.84E+01
1.70E+02	-1.55E-05	7.89E-06	7.64E-06	1.06E+03	-2.84E+01
1.90E+02	-1.58E-05	8.02E-06	7.77E-06	1.09E+03	-2.84E+01
2.10E+02	-1.61E-05	8.17E-06	7.92E-06	1.12E+03	-2.83E+01
2.30E+02	-1.64E-05	8.33E-06	8.07E-06	1.15E+03	-2.83E+01
2.50E+02	-1.67E-05	8.48E-06	8.21E-06	1.18E+03	-2.83E+01
2.70E+02	-1.69E-05	8.59E-06	8.32E-06	1.21E+03	-2.83E+01
2.90E+02	-1.70E-05	8.65E-06	8.38E-06	1.22E+03	-2.83E+01
3.10E+02	-1.71E-05	8.66E-06	8.39E-06	1.22E+03	-2.83E+01
3.30E+02	-1.70E-05	8.62E-06	8.35E-06	1.21E+03	-2.84E+01
3.50E+02	-1.68E-05	8.53E-06	8.26E-06	1.19E+03	-2.84E+01
3.70E+02	-1.65E-05	8.39E-06	8.13E-06	1.17E+03	-2.84E+01
3.90E+02	-1.62E-05	8.24E-06	7.98E-06	1.13E+03	-2.85E+01
4.10E+02	-1.59E-05	8.08E-06	7.83E-06	1.10E+03	-2.85E+01
4.30E+02	-1.56E-05	7.94E-06	7.69E-06	1.07E+03	-2.85E+01

В таблице введены следующие обозначения:

phi_i – угол, задающий положение тела качения подшипника в плоскости Y-X (вокруг оси вращения);

deltai – деформации в точках контакта тел качения и колец подшипника, знак «←» означает наличие контакта;

gi – деформация в точке контакта по внутреннему кольцу;

ge – деформация в точке контакта по внешнему кольцу;

Qi – реакция тел качения по линии, соединяющей точки контакта тела качения (без учета инерции). В случае учета инерции тел качения выводится сумма реакций в точках контакта по направлениям от точек контакта до центра шарика.

alpha(deg) – угол контакта тел качения, град.

Все параметры в таблице выводятся в основной системе международных единиц СИ.

Деформации в точках контакта тел качения **deltai** по всем телам качения можно представить также в виде лепестковой диаграммы, рис. 11.

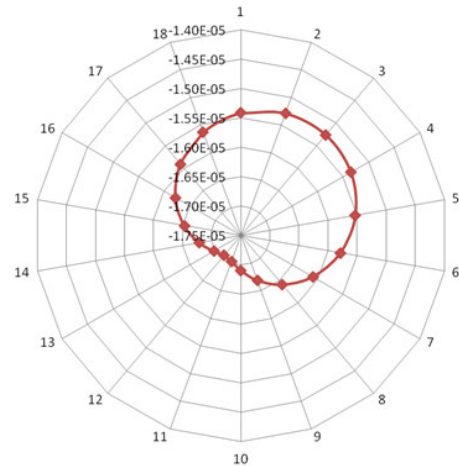


Рис. 11 Диаграмма деформации в точках контакта по всем телам качения

Аналогично можно вывести нагрузки на тела качения, рис. 12.

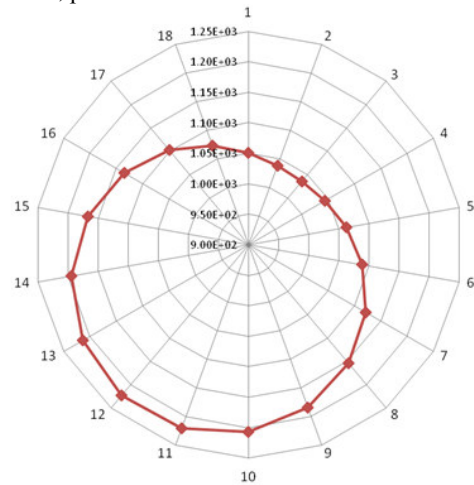


Рис. 12 Диаграмма нагрузки на тела качения

Нагрузки по телам качения можно вывести во всем диапазоне частот вращения ротора в виде амплитудно-временной характеристики. В качестве примера выведены нагрузки для шарика, расположенного на оси Y (Q_90), рис. 13.

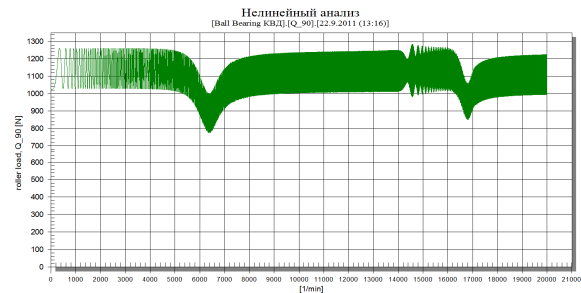


Рис. 13 Нагрузки для шарика, расположенного на оси Y

Аналогично по всем остальным телам качения.

Обработкой столбца **alfai** можно получить все углы контакта тел качения в лепестковой диаграмме, рис. 14.

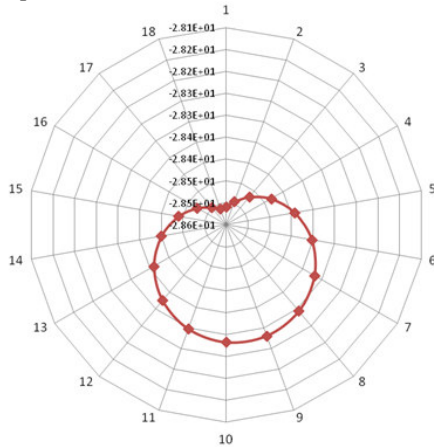


Рис. 14 Диаграмма углов контакта тел качения

Перемещения и нагрузки колец

Для каждой выбранной точки перемещения колец выводятся в формате, который показан в табл.3. В таблице выведены данные для режима 14040 об/мин.

Таблица 3

	u	v	F
x1	4.19E-06	8.44E-03	-4.18E+02
y1	-3.41E-05	6.18E-03	6.29E+02
z1	-1.89E-04	-2.87E-04	9.66E+03
r1	-1.39E-05	-8.63E-03	-2.62E+01
r1	4.79E-06	8.36E-03	-1.91E+01
r1	0	1.47E+03	2.08E-04
x2	4.89E-06	8.26E-03	4.18E+02
y2	-3.27E-05	4.77E-03	-6.29E+02
z2	4.96E-10	-7.80E-07	-9.66E+03
r2	-3.50E-06	6.08E-04	2.60E+01
r2	-3.27E-07	-9.99E-04	1.90E+01
r2	-4.83E-07	0	-2.90E-05

В табл. 4 выведены данные для проходного резонансного режима 6359 об/мин.

Таблица 4

	u	v	F
x1	-1.57E-06	-4.14E-02	4.73E+02
y1	3.35E-05	4.35E-04	-8.37E+01
z1	-1.89E-04	-2.89E-06	9.81E+03
r1	3.24E-05	2.05E-03	-1.41E-01
r1	-4.91E-06	3.53E-02	2.57E+01
r1	0	6.66E+02	4.15E-04
x2	-9.91E-07	-3.97E-02	-4.73E+02
y2	3.21E-05	7.62E-04	8.37E+01
z2	-1.29E-09	2.59E-06	-9.81E+03
r2	3.42E-06	1.10E-04	1.44E-01

r2	-4.18E-07	4.23E-03	-2.55E+01
r2	1.72E-06	0	-4.37E-05

На рис. 15...19 показаны линейные и угловые перемещения внутреннего кольца подшипника во всем диапазоне оборотов ротора.

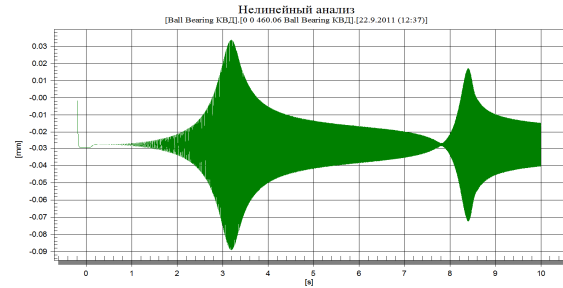


Рис. 15 Перемещение внутреннего кольца по направлению Y

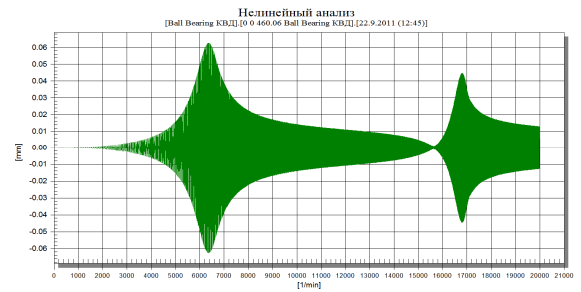


Рис. 16 Перемещение внутреннего кольца по направлению X

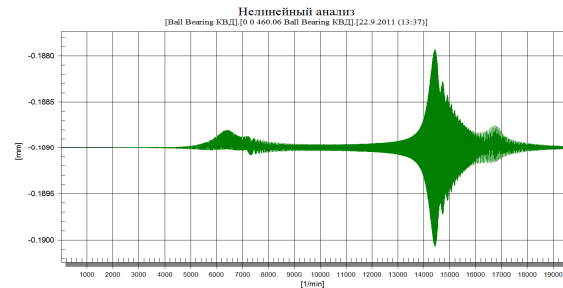


Рис. 17 Перемещение внутреннего кольца по направлению Z

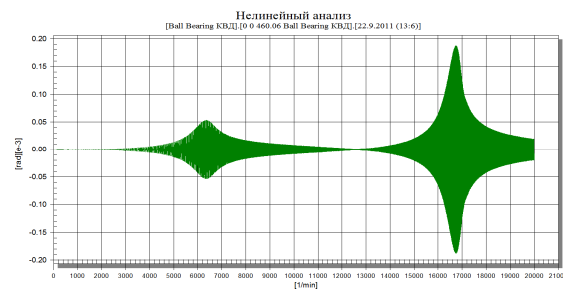


Рис. 18 Угол поворота внутреннего кольца вокруг оси Y

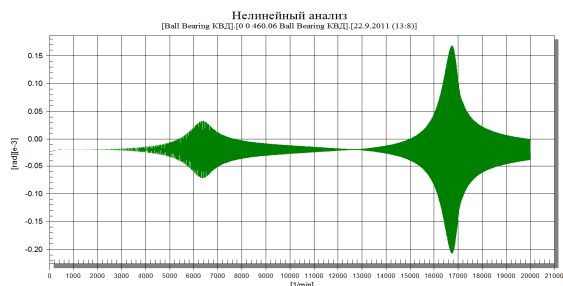


Рис. 19 Угол поворота внутреннего кольца вокруг оси Y

Аналогичные кривые можно вывести и для наружного кольца подшипника, установленного в корпусе, опирающемся на упругий элемент конструкции опоры.

В табл. 5 и 6 показаны численные значения линейных и угловых перемещений для выделенных моментов времени на амплитудно-временных характеристиках (режимах) для внутреннего кольца и наружного кольца подшипника КВД соответственно.

Таблица 5

t[sec]	omega1 [rad/sec]	ux1[m]	uy1[m]	urx1[rad]	ury1[rad]
0.40	8.38E+01	-1.70E-09	-2.77E-05	-1.95E-05	1.05E-07
1.00	2.10E+02	1.70E-07	-2.87E-05	-2.06E-05	-1.42E-07
2.00	4.19E+02	-1.18E-08	-3.40E-05	-2.54E-05	3.80E-07
3.18	6.67E+02	-1.23E-05	-8.72E-05	-6.95E-05	1.65E-05
4.00	8.39E+02	-4.59E-06	-4.90E-05	-3.55E-05	6.07E-06
4.00	1.05E+03	-3.89E-06	-4.07E-05	-2.68E-05	4.07E-06
6.00	1.26E+03	-2.59E-06	-3.76E-05	-2.12E-05	2.01E-06
7.00	1.47E+03	-1.94E-06	-3.48E-05	-1.19E-05	-1.72E-06
7.50	1.57E+03	-1.16E-06	-3.20E-05	-1.04E-06	-8.64E-06
7.82	1.64E+03	-2.59E-07	-2.85E-05	-3.46E-05	-3.70E-05
8.40	1.76E+03	-1.39E-05	-6.70E-05	-1.92E-04	6.59E-05

Таблица 6

t[sec]	omega2 [rad/sec]	ux2[m]	uy2[m]	urx2[rad]	ury2[rad]
0.40	0	-7.26E-08	-2.66E-05	-2.83E-06	9.04E-08
1.00	0	1.55E-07	-2.75E-05	-2.94E-06	7.13E-08
2.00	0	-4.48E-08	-3.26E-05	-3.47E-06	1.33E-07
3.18	0	-1.23E-05	-8.35E-05	-8.89E-06	1.99E-06
4.00	0	-4.63E-06	-4.69E-05	-4.00E-06	8.24E-07
4.00	0	-3.91E-06	-3.90E-05	-4.16E-06	6.80E-07
6.00	0	-2.66E-06	-3.61E-05	-3.84E-06	4.27E-07
7.00	0	-2.00E-06	-3.33E-05	-3.55E-06	4.26E-07

7.50	0	-1.21E-06	-3.06E-05	-3.27E-06	2.94E-07
7.82	0	-2.67E-07	-2.74E-05	-2.92E-06	1.29E-07
8.40	0	-1.43E-05	-6.39E-05	-6.80E-06	2.46E-06

Переход от результатов нестационарного динамического анализа нелинейной модели подшипника в составе роторной системы к задачам определения напряжений в зонах контакта колец и тел качения, и далее к задачам долговечности может осуществляться двумя путями, рис. 20.

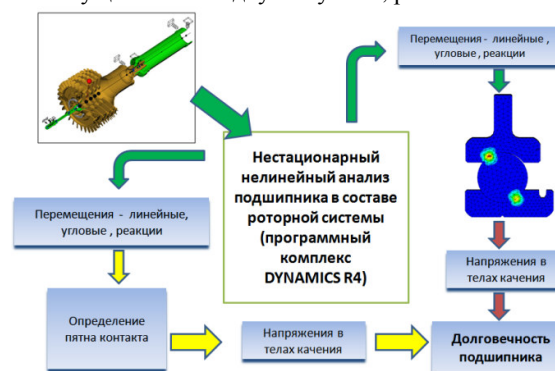


Рис.20 Переход от результатов анализа нелинейной модели подшипника к задачам определения напряжений в зонах контакта колец и тел качения и к задачам долговечности

Первый путь – средствами программной системы Dynamics R4. Второй путь – средствами МКЭ программ, для которых полученные результаты являются исходными данными.

Заключение

В качестве общих выводов можно отметить следующее.

Разработана методика анализа деформированного и силового состояния радиально-упорных подшипников качения в составе роторных систем. На ее основе разработаны математическая модель подшипника и алгоритмы для анализа подшипника в составе роторной системы.

Модель подшипника имеет 5 степеней свободы, учитывает его геометрию, количество тел качения, их инерцию, зазор. Алгоритмы программной системы DYNAMICS R4 позволяют получить для любого режима, характеризующегося частотой вращения, радиальными и осевыми силами, температурными факторами, с учетом веса ротора положение наружного и внутреннего колец подшипника, для каждого тела качения определить углы контакта и все силовые факторы.

Полученная информация является исходной для решения задачи по определению долговечности подшипников и позволяет более обоснованно подойти к ее решению в составе конкретной роторной системы.

Разработанные средства и методика анализа применены к анализу деформационного и сило-

вого состояния радиально-упорного подшипника качения опоры КВД в составе экспериментальной установки для исследования опорного узла ротора.

Список использованных источников

1. Леонтьев М. К., Иванов А. В., Дегтярев С. А. Программная система расчета динамики роторов Dynamics 4. Свидетельство об отраслевой разработке №6691. Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Государственный информационный центр информационных технологий. Министерство образования Российской Федерации. 2006 г.
2. J.M.de Mul, J.M.Vree, D.A.Maas. Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction- part I: general theory and application to ball bearings, Journal of Tribology, January 1989, vol. 111, pp. 142-148.
3. Леонтьев М. К., Снеткова Е. И. Нелинейные модели подшипников качения в роторной динамике. «Вестник Московского авиационного института», 2012 г., № 2, т. 19.

