

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

ЛЕОНТЬЕВ М.К.
ДЕГТЯРЕВ С.А.

ООО “Альфа-Транзит”

Аннотация

Представлены результаты расчета отдельного генератора фирмы “BRUSH ” мощностью 25 Мвт, входящего в динамическую систему “силовая турбина, трансмиссия, генератор”, с целью определения его границы устойчивости. Генератор опирается на два подшипника скольжения. Проведено два вариантных исследований генератора. Задачей первого исследования генератора являлось определение границы его устойчивости на цилиндрических подшипниках скольжения с целью проверки двух методик по определению границ устойчивости ротора генератора. Задачей второго исследования являлось определение границы устойчивости ротора на эллиптических подшипниках скольжения.

Модель роторной системы генератора

В программной системе Dynamics R4 [1] имеется элемент “цилиндрический подшипник скольжения”. С его помощью моделируются два основных типа цилиндрического подшипника. Первый тип – короткий (без уплотнительных колец). Второй тип - длинный (с уплотнительными кольцами). Граничные условия для жидкостной пленки – [π -пленка] (половинный охват) и [2π -пленка] (полный охват). Элемент может быть использован только в нестационарном анализе для любых режимов работы роторной системы, как стационарных, так и нестационарных. Учитывается давление подачи масла. Элемент может быть включен в модель роторной системы, которая в этом случае становится нелинейной, т.е. гидравлические силы, возникающие в подшипнике, являются функцией перемещения и скорости цапфы ротора в зазоре подшипника.

Модель ротора данного генератора представлена на Рис. -- Более подробно она описана в [1]. Две упругие опоры генератора заменены на одинаковые подшипники скольжения цилиндрического типа.

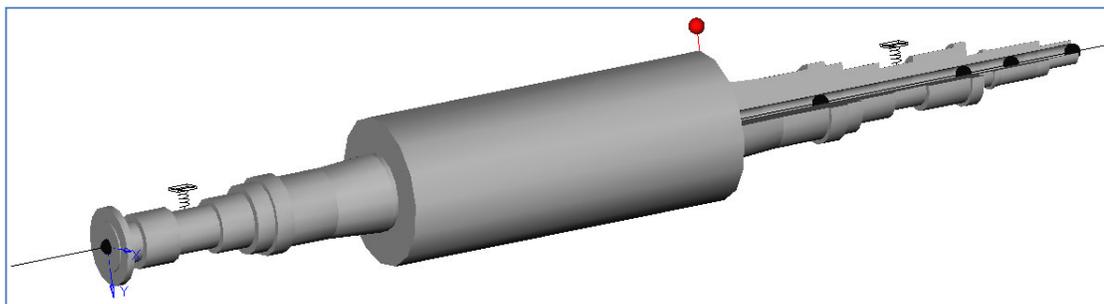


Рис.1 3D модель ротора генератора

Расчеты генератора как нелинейной системы проводились в нестационарном анализе.

Минимальный зазор подшипника скольжения по данным производителя генератора находится в пределах от 0.230 до 0.314 мм. Для расчета выбрана средняя величина 0.272 мм. Исходные данные по цилиндрическим подшипникам представлены на Рис. 2.

Электрические силы, возникающие в генераторе в расчетах не учитывались.

Des	Plain Journal Bearing support 3 3	Designation
conn_type	via body	Type of connection
side1_subs	Generator rotor	Side1 subsystem
side1_l	470	mm side1 offset
side2_subs		Side2 subsystem
Type	short	Design type
R	114.5	mm Bearing radius
film	pi-film	Cavitation film model
Lr	152	mm Bearing length
delta	0.136	mm Radial clearance
mue	14.38	cp Lubricant absolute viscosity
P0	30000	Pa Supply pressure to the bearing

Рис. 2 Параметры цилиндрического подшипника скольжения

Нелинейный расчет ротора генератора на цилиндрических подшипниках

На Рис. 3 представлен временной сигнал, полученный в нестационарном расчете генератора на нелинейных подшипниках, точка вывода - левый (передний) подшипник со стороны трансмиссии. Из временного сигнала видно, что в районе 5500...6000 об/мин ротор теряет устойчивость.

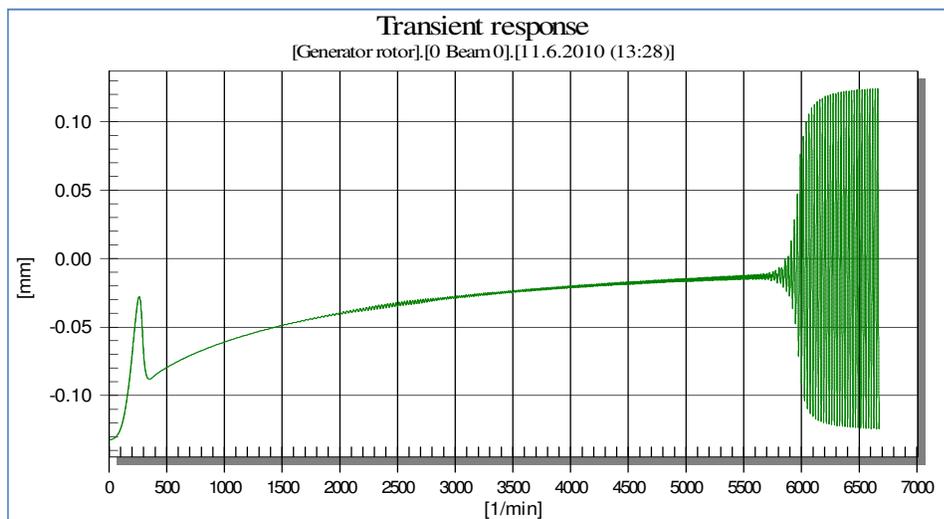


Рис. 3 Нестационарный расчет ротора на цилиндрических подшипниках

Для уточнения границы устойчивости был применен метод, использующий импульсную нагрузку на некоторой частоте и проверки отклика системы на нее. Если колебания вызванные импульсом не затухают, то этот режим работы генератора находится за границей устойчивости.

Временной сигнал, полученный в процессе интегрирования уравнений движения после воздействия на ротор импульсной нагрузкой в 10000 N на частоте вращения 4000 об/мин приводит к смещению видимой границы устойчивости к 4000...4500 об/мин, Рис. 4.

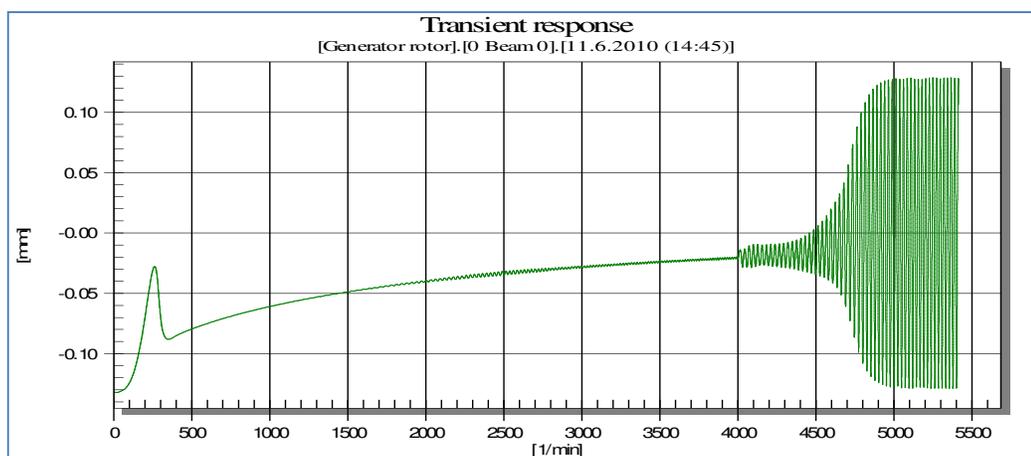


Рис. 4 Нестационарный расчет, импульс 10 000 N на 4000 об/мин

Импульсная нагрузка на 3000 об/мин не приводит к потере устойчивости ротора, Рис. 5. Колебания затухают, и далее ротор ведет себя аналогично временному сигналу на Рис. 3. Это означает, что граница устойчивости находится значительно выше 3000 об/мин.

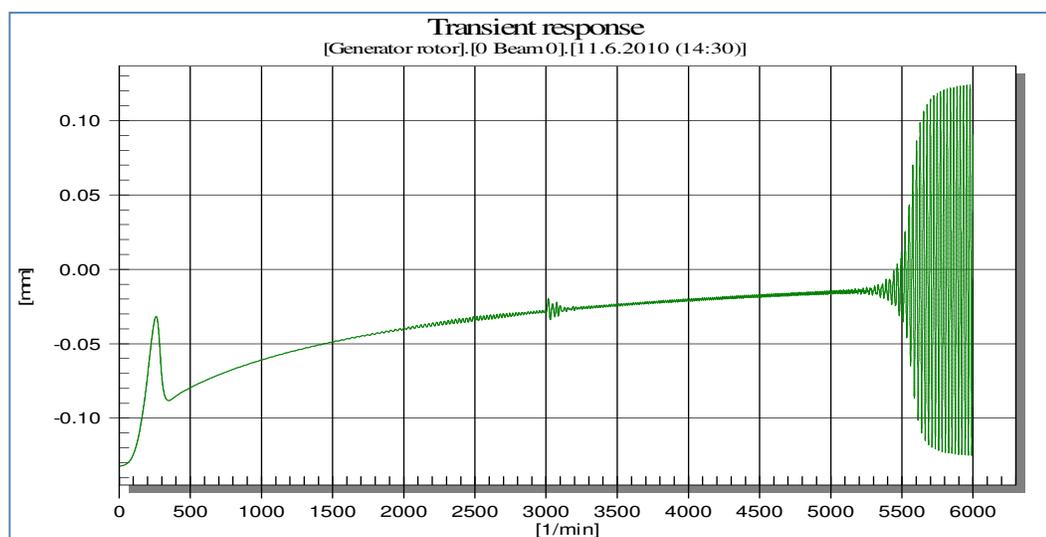


Рис. 5 Нестационарный расчет, импульс 10000 N на 3000 об/мин

Для более точного определения границы устойчивости был проведен ряд расчетов на установившихся режимах. The stability of motion about an equilibrium position is determined by observing the motion of the linear system after giving it small perturbation about an equilibrium position. If this motion dies out with time and the system returns to its original position, the system is said to be stable; on the other hand, if this motion grows with time, the system is said to be unstable

На Рис. 6 представлен расчет ротора на постоянной частоте вращения 3500 об/мин с импульсной нагрузкой в 10000 N. Колебания, вызванные импульсом, быстро затухают.

Система аналогично ведет себя и на частоте 4000 об/мин (Рис. 7). Колебания, вызванные импульсом, затухают. Это значит, что ротор еще не прошел границу устойчивости. На режиме 4200 об/мин колебания, вызванные импульсом не затухают, начинается их рост по времени, Рис. 8. Отсюда следует вывод, что граница устойчивости ротора находится между 4000 и 4200 об/мин.

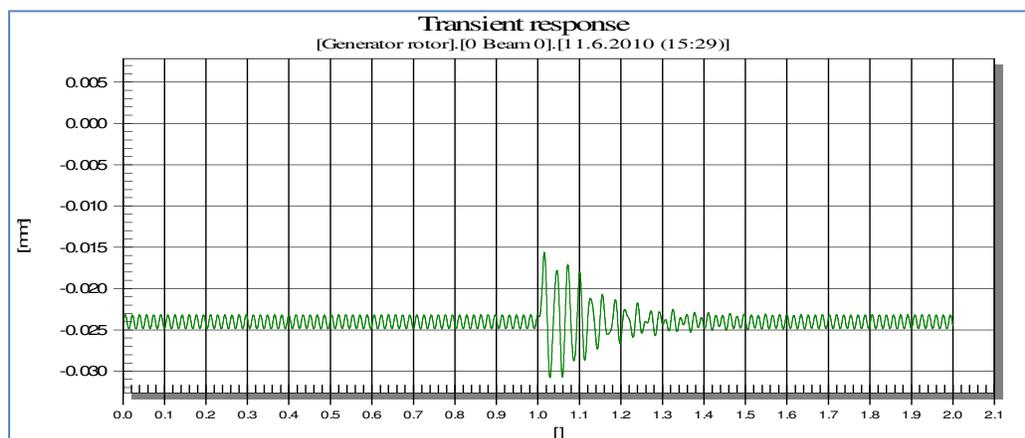


Рис. 6 Импульс на частоте 3500 об/мин

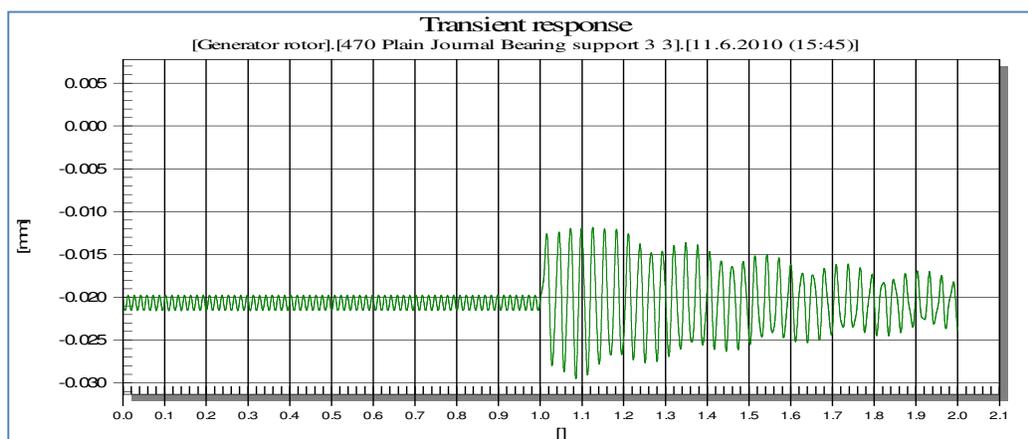


Рис. 7 Постоянная частота 4000 об/мин, импульс 10000 N

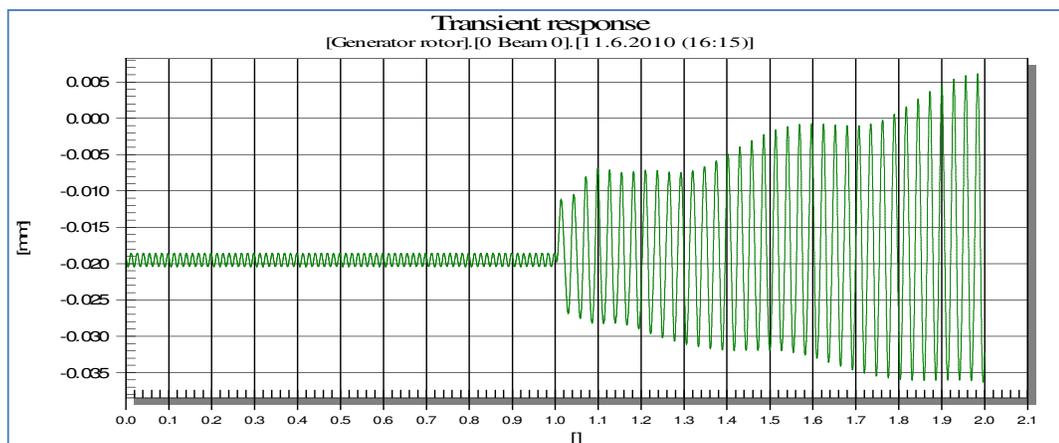


Рис. 8 Постоянная частота 4200 об/мин, импульс 10000 N

Квазилинейный расчет ротора на цилиндрических подшипниках скольжения

Для подтверждения полученных результатов был проведен квазилинейный расчет и анализ роторной системы на цилиндрических подшипниках с уточненными характеристиками. Используемая выше модель подшипника предназначена для расчета только цилиндрических подшипников скольжения. Она имеет ряд ограничений на учет геометрии и параметров работы таких подшипников. В частности не учитывается турбулентность течения масла, его инерция, наличие канавок для подачи масла, температурные условия, изменение вязкости масла в зависимости от режима работы и т.д.

В связи с тем, что более сложные алгоритмы в нестационарном анализе вызывают большие временные затраты и в процессе прямого интегрирования уравнений движения роторной системы использовать модель практически сложно, для расчета ротора генератора используется квазилинейный подход. Он заключается в предварительном расчете матриц жесткости и демпфирования на установившихся режимах работы генератора в определенном диапазоне частот. Далее полученные значения коэффициентов используются для расчета карт частот собственных колебаний и карт устойчивости в линейной постановке.

Для определения жесткостных и демпфирующих коэффициентов использовалась программа XLPocket, разработанная Dr. John Nicholas of RMT Inc. в Wellsville, New York [2]. Эта программа позволяет рассчитывать жесткостные и демпфирующие свойства подшипников скольжения на установившихся режимах работы. Результаты расчетов получаются в виде несимметричных матриц жесткости и демпфирования. Полученные матрицы жесткости и демпфирования заносятся в линейные связи между ротором и статором в модели генератора.

При дальнейшем моделировании и анализе были дополнительно учтены следующие особенности работы подшипников скольжения:

- турбулентность течения масла;
- инерционные свойства масла;
- температура и давление подаваемого масла в подшипник скольжения;
- изменение вязкости и плотности масла с изменением режима;
- процент переноса горячего масла от одной вставки до другой (percent hot oil carry over from pad-to-pad);
- Количество и размеры входных отверстий для масла.

Данные для расчета характеристик подшипников

Рабочий режим генератора 3000 об/мин (50 Гц). Полная масса ротора генератора 10725 кг. Тип смазки - ISO VG 32. Температура масла на входе в подшипник 55 °С. Давление подачи масла при выходе на режим составляет 2 бар. На режиме 3000 rpm давление снижают до 0.3 бар. Подача масла осуществляется через симметрично расположенные горизонтальные отверстия прямоугольной формы размером 120x58 мм. Параметры масла марки ISO VG 32 были взяты из имеющейся базы данных XLrocket и представлены таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Значение	Размерность
Вязкость при температуре 37.8 °С	150.9	SSU
Вязкость при температуре 98.9 °С	43.2	SSU
Удельный вес при 40 °С	0.862	гК/см ³
Удельный вес при 98.9 °С	0.827	гК/см ³
Плотность в градусах API	30.4	-

Геометрические размеры и рабочие параметры подшипников представлены на Рис. 9, 10, 11 и в Таблицах 2, 3.

Journal Diameter	229.000	mm	Journal Diameter	229.000	mm
Bearing Length	152.000	mm	Bearing Length	152.000	mm
Diametral Clearance	0.2720	mm	Diametral Clearance	0.2720	mm
Gravity Load	50696.5000	N	Gravity Load	54479.821	N
First Critical Speed	0	rpm	First Critical Speed	0	rpm
Ecc X Initial Guess	0	--	Ecc X Initial Guess	0	--
Ecc Y Initial Guess	0	--	Ecc Y Initial Guess	0	--
Hot Oil Carry Over	60	percent	Hot Oil Carry Over	60	percent
Pressure Field Flag	Do Not Print		Pressure Field Flag	Do Not Print	
K and C File Format	MODLUND Format		K and C File Format	MODLUND Format	
Offset Halves Flag	No Offset		Offset Halves Flag	No Offset	
Offset Displacement	0.0254	mm	Offset Displacement	0.0254	mm
Offset Angle	0	degrees	Offset Angle	0	degrees

Рис. 9. Параметры левого и правого подшипников генератора соответственно

Type of Bearing							Axial Groove Bearing	Click on Figure then Press Alt-F1 for Help
Input data for each pad. One row for each pad. Add rows as needed (<=10).								
Pad Number	Groove Arc Len	Groove CL Location	Pad Arc Len	Pocket Depth	Pocket Axl Len	Relief Gro Len		
--	degrees	degrees	degrees	mm	mm	mm		
1	28.425	0	151.575	0	0.5	0		
2	28.425	180	151.575	0	0.5	12.7		

Рис. 10 Расположение канавок подачи масла

Таблица 2

Параметр	Значение	Размерность
Диаметр	229	ММ
Диаметральный зазор	0.272	ММ
Эффективная длина подшипника	152	ММ
Нагрузка, приходящаяся на левый подшипник	50696.5	Н
Нагрузка, приходящаяся на правый подшипник	54479.8	Н
Кол-во отверстий подачи масла	2	-

Длина отверстий подачи масла	120	мм
Ширина отверстий подачи масла	58	мм
Температура масла на входе в подшипник	55	°C
Давление подачи масла до выхода на рабочий режим	2	bar
Давление подачи масла на рабочем режиме	0.3	bar

Угловая длина канавки была выбрана в соответствии с шириной отверстий подачи масла и равна 28.425° . Схема подшипника представлена на Рис 13.

Таблица 3

Параметр	Значение		Размерность
	1-ая канавка	2-ая канавка	
Угловая длина канавки	28.425	28.425	град
Угол расположения канавки	0	180	град
Угловая длина вставки	151.575	151.575	град

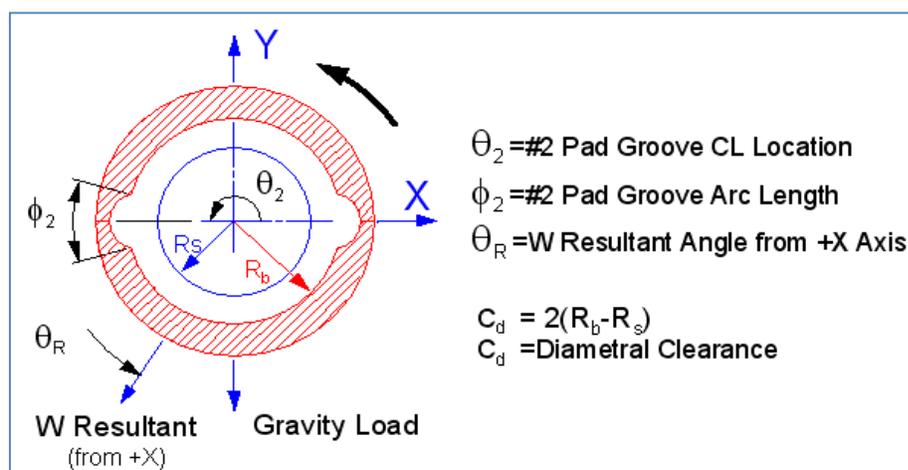


Рис. 1 Схема цилиндрического подшипника

Результаты расчета генератора на цилиндрических подшипниках

Матрицы коэффициентов жесткости и демпфирования для цилиндрических подшипников были рассчитана для давления масла 0.3 бар и диапазона режимов от 500 до 10000 об/мин, таблицы 4, 5.

Таблица 4

Коэффициенты жесткости и демпфирования для левого подшипника

Speed rpm	Kxx N/m	Kxy N/m	Kyx N/m	Kyy N/m	Cxx N-s/m	Cxy N-s/m	Cyx N-s/m	Cyy N-s/m
500	591.49E+6	-264.33E+6	-1.93E+9	3.40E+9	9.23E+6	-16.75E+6	-23.16E+6	75.86E+6
1 000	574.53E+6	-79.34E+6	-1.62E+9	2.22E+9	5.17E+6	-7.89E+6	-10.41E+6	31.73E+6
1 500	591.57E+6	28.76E+6	-1.53E+9	1.75E+9	3.91E+6	-5.18E+6	-6.72E+6	19.44E+6
2 000	593.63E+6	85.13E+6	-1.46E+9	1.50E+9	3.18E+6	-3.87E+6	-4.87E+6	13.88E+6
2 500	593.28E+6	122.79E+6	-1.42E+9	1.35E+9	2.65E+6	-3.04E+6	-3.73E+6	10.71E+6
3 000	587.19E+6	145.99E+6	-1.39E+9	1.24E+9	2.27E+6	-2.48E+6	-2.98E+6	8.68E+6
3 500	598.30E+6	182.68E+6	-1.38E+9	1.15E+9	2.06E+6	-2.15E+6	-2.52E+6	7.34E+6
4 000	604.28E+6	211.23E+6	-1.37E+9	1.08E+9	1.89E+6	-1.89E+6	-2.17E+6	6.35E+6
4 500	600.36E+6	225.19E+6	-1.36E+9	1.02E+9	1.70E+6	-1.63E+6	-1.86E+6	5.56E+6
5 000	607.85E+6	253.36E+6	-1.36E+9	969.92E+6	1.60E+6	-1.49E+6	-1.66E+6	4.98E+6
5 500	601.88E+6	263.50E+6	-1.35E+9	932.24E+6	1.47E+6	-1.31E+6	-1.46E+6	4.48E+6
6 000	609.20E+6	289.28E+6	-1.35E+9	889.13E+6	1.41E+6	-1.22E+6	-1.33E+6	4.10E+6
6 500	605.11E+6	300.09E+6	-1.34E+9	857.41E+6	1.32E+6	-1.11E+6	-1.20E+6	3.76E+6
7 000	608.34E+6	320.02E+6	-1.34E+9	823.41E+6	1.27E+6	-1.04E+6	-1.10E+6	3.49E+6
7 500	605.25E+6	333.70E+6	-1.34E+9	794.56E+6	1.20E+6	-953.94E+3	-1.00E+6	3.25E+6
8 000	602.00E+6	347.83E+6	-1.34E+9	767.71E+6	1.15E+6	-881.21E+3	-920.07E+3	3.04E+6
8 500	600.77E+6	364.19E+6	-1.34E+9	741.12E+6	1.10E+6	-820.32E+3	-850.50E+3	2.86E+6
9 000	596.91E+6	377.17E+6	-1.34E+9	717.94E+6	1.06E+6	-763.74E+3	-786.14E+3	2.71E+6
9 500	592.72E+6	390.47E+6	-1.34E+9	696.05E+6	1.02E+6	-713.66E+3	-729.07E+3	2.57E+6
10 000	590.00E+6	404.53E+6	-1.35E+9	675.13E+6	985.79E+3	-672.07E+3	-680.37E+3	2.45E+6

Таблица 5

Коэффициенты жесткости и демпфирования для правого подшипника

Speed rpm	Kxx N/m	Kxy N/m	Kyx N/m	Kyy N/m	Cxx N-s/m	Cxy N-s/m	Cyx N-s/m	Cyy N-s/m
500	663.56E+6	-298.80E+6	-2.17E+9	3.85E+9	9.69E+6	-18.05E+6	-25.11E+6	83.50E+6
1 000	640.69E+6	-90.75E+6	-1.81E+9	2.50E+9	5.75E+6	-8.56E+6	-11.77E+6	34.91E+6
1 500	615.96E+6	-13.30E+6	-1.65E+9	2.01E+9	3.94E+6	-5.45E+6	-7.12E+6	21.13E+6
2 000	617.67E+6	48.69E+6	-1.57E+9	1.72E+9	3.17E+6	-4.03E+6	-5.13E+6	15.01E+6
2 500	629.68E+6	103.70E+6	-1.54E+9	1.53E+9	2.74E+6	-3.24E+6	-4.03E+6	11.62E+6
3 000	639.63E+6	147.81E+6	-1.52E+9	1.39E+9	2.44E+6	-2.74E+6	-3.31E+6	9.49E+6
3 500	641.68E+6	176.28E+6	-1.50E+9	1.29E+9	2.16E+6	-2.31E+6	-2.75E+6	7.95E+6
4 000	641.44E+6	198.34E+6	-1.48E+9	1.21E+9	1.94E+6	-2.00E+6	-2.34E+6	6.83E+6
4 500	649.03E+6	228.97E+6	-1.47E+9	1.14E+9	1.81E+6	-1.79E+6	-2.06E+6	6.02E+6
5 000	643.63E+6	240.83E+6	-1.46E+9	1.09E+9	1.64E+6	-1.57E+6	-1.79E+6	5.34E+6
5 500	651.47E+6	269.94E+6	-1.45E+9	1.04E+9	1.56E+6	-1.44E+6	-1.61E+6	4.83E+6
6 000	645.50E+6	279.42E+6	-1.44E+9	1.00E+9	1.44E+6	-1.29E+6	-1.43E+6	4.38E+6
6 500	652.94E+6	304.99E+6	-1.44E+9	955.74E+6	1.40E+6	-1.22E+6	-1.32E+6	4.04E+6
7 000	649.76E+6	319.20E+6	-1.44E+9	920.37E+6	1.31E+6	-1.11E+6	-1.19E+6	3.73E+6
7 500	648.29E+6	335.08E+6	-1.43E+9	886.90E+6	1.25E+6	-1.03E+6	-1.09E+6	3.46E+6
8 000	647.60E+6	352.92E+6	-1.43E+9	854.20E+6	1.20E+6	-954.36E+3	-1.01E+6	3.24E+6
8 500	642.18E+6	365.15E+6	-1.43E+9	826.50E+6	1.14E+6	-878.97E+3	-924.54E+3	3.04E+6
9 000	642.35E+6	383.83E+6	-1.43E+9	797.41E+6	1.11E+6	-832.39E+3	-863.16E+3	2.88E+6
9 500	638.40E+6	397.12E+6	-1.43E+9	772.33E+6	1.06E+6	-775.07E+3	-799.54E+3	2.73E+6
10 000	634.78E+6	411.31E+6	-1.43E+9	748.83E+6	1.03E+6	-729.37E+3	-745.00E+3	2.60E+6

Полученные значения радиальных коэффициентов жесткости Kxx и Куу подшипников (выделены синим цветом), на режиме 3000 rpm несколько отличаются от значений, представленных изготовителем генератора (Kxx=500e6 N/m; Куу=1.0e9 N/m).

Результаты расчета генератора на упругих опорах с полученными матрицам жесткости и демпфирования представлены на Рис. 12, 13 и 14.

На Рис. 12 представлена карта собственных частот генератора. На Рис. 13 представлена карта устойчивости генератора – зависимость относительного коэффициента демпфирования от частоты вращения ротора.

Из карт устойчивости (Рис.14) видно, что на частоте 3825 грп относительный коэффициент демпфирования меняет свой знак на отрицательный, что свидетельствует о том, что ротор на этой скорости потеряет устойчивость.

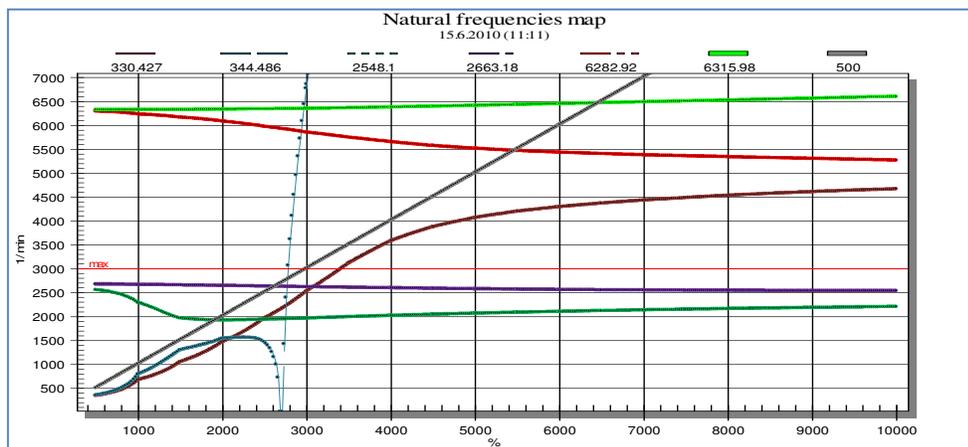


Рис. 12 Карта собственных частот ротора газогенератора на цилиндрических подшипниках

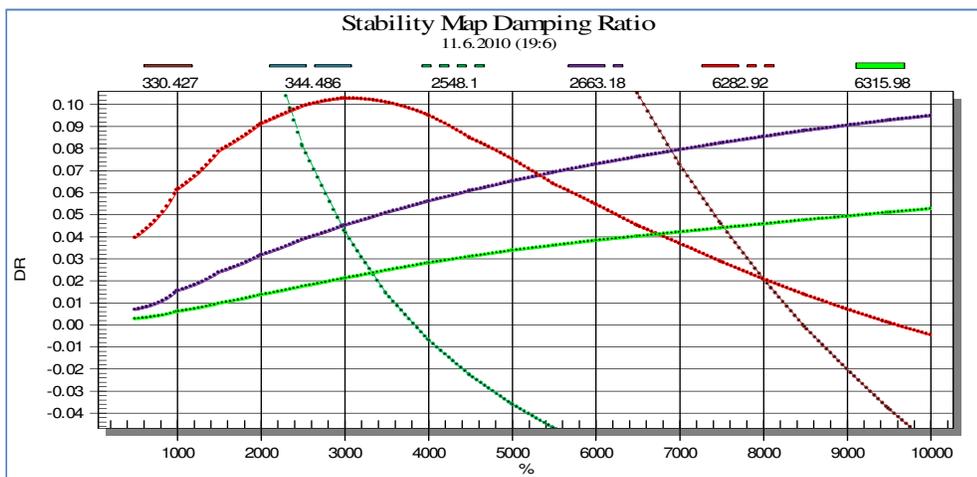


Рис. 13 Карта зависимости относительных коэффициентов демпфирования различных форм колебаний от частоты вращения ротора

На Рис. 14 представлена зависимость логарифмических декрементов от частот собственных колебаний роторной системы, по которой можно

оценить частоту и соответствующую ей форму колебаний, по которой происходит потеря устойчивости.

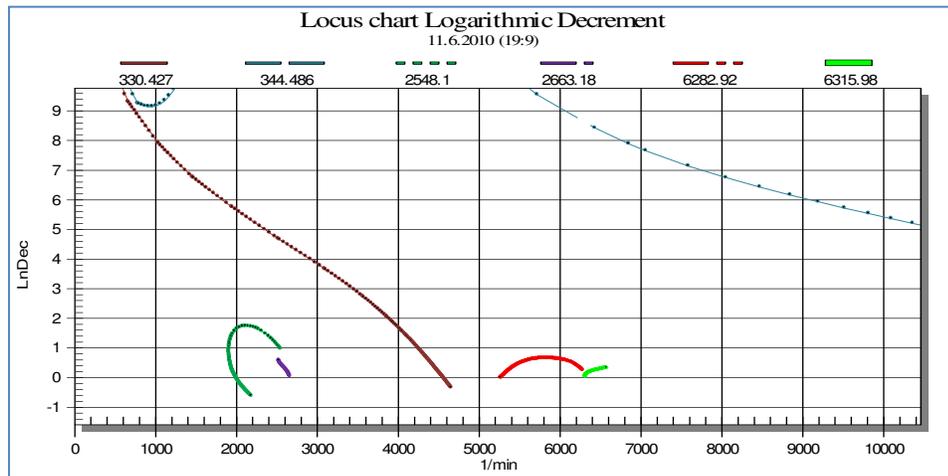


Рис. 14 Карта зависимости логарифмических декрементов от частот собственных колебаний ротора

Собственные частоты, рассчитанные для частоты вращения ротора 3825 грм, представлены на Рис.15. На нем выделена частота и соответствующая ей форма колебаний, по которой происходит потеря устойчивости. Эту частоту можно также определить по Рисунку 14.

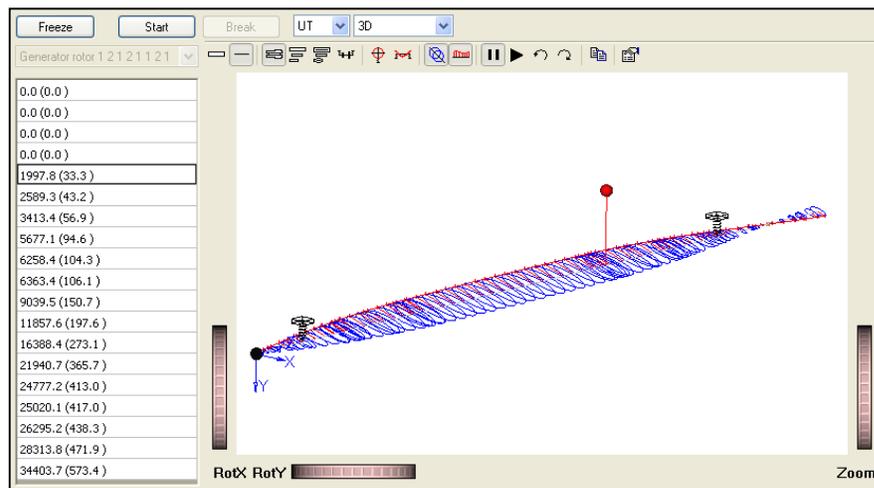


Рис. 15 Собственные частоты ротора генератора на режиме 3825 об/мин

Режим 3825 грм, на котором ротор генератора теряет устойчивость, находится относительно близко к рабочему режиму 3000 грм. Разброс по

зазору, по давлению подачи масла по температуре может еще более приблизить границу потери устойчивости ротора к рабочему режиму.

Использование генератора на цилиндрических подшипниках скольжения для данного генератора с выходом по току 60 Гц (т.е. частота вращения ротора 3600 rpm) вообще невозможно. Очевидно, что эти факты заставили разработчиков генератора перейти к эллиптическим подшипникам.

Эллиптические подшипники по сравнению с цилиндрическими, при прочих равных условиях, значительно повышают границу устойчивости ротора.

Квазилинейный анализ ротора генератора на эллиптических подшипниках

В отличие от цилиндрического эллиптический подшипник характеризуется наличием неравномерного зазора по окружности. Эта неравномерность задается параметром “Preload”. Значение этого параметра равно 0.56 (задано производителем). Все прочие данные - по геометрии подшипника, температуре масла, режимам - совпадают с цилиндрическим подшипником. Геометрические параметры подшипников представлены на Рис. 16 и в Таблице 6.

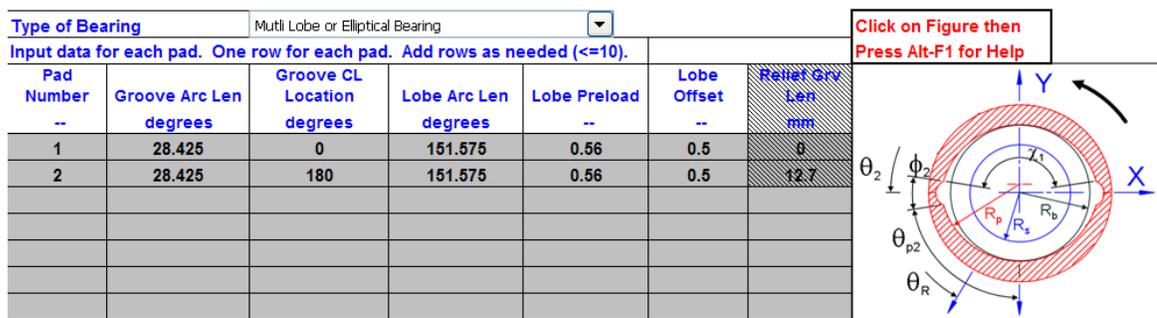


Рис. 16 Расположение канавок подачи масла

Таблица 6

Параметр	Значение		Размерность
	1-ая канавка	2-ая канавка	
Угловая длина канавки	28.425	28.425	град
Угол расположения канавки	0	180	град
Arc length of lobe	151.575	151.575	град

Preload of lobe	0.56	0.56	
Offset of lobe	0.5	0.5	

Схема эллиптического подшипника и его параметры представлены на Рис. 17.

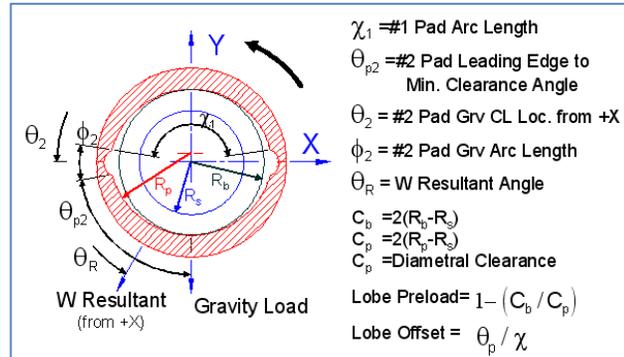


Рис 17 Схема и параметры эллиптического подшипника

Матрица жесткости и демпфирования рассчитывалась для диапазона режимов от 500 до 10000 об/мин. Коэффициенты этих матриц представлены в таблицах 7 и 8. Кривые изменения этих коэффициентов по режимам представлены на Рис. 18, 19.

Таблица 7

Коэффициенты жесткости и демпфирования для левого подшипника

Speed rpm	Kxx N/m	Kxy N/m	Kyx N/m	Kyy N/m	Cxx N-s/m	Cxy N-s/m	Cyx N-s/m	Cyy N-s/m
500	621.54E+6	-268.71E+6	-2.06E+9	3.67E+9	9.23E+6	-16.38E+6	-23.19E+6	78.66E+6
1 000	527.01E+6	-62.95E+6	-1.68E+9	2.59E+9	5.83E+6	-6.88E+6	-9.97E+6	34.02E+6
1 500	510.31E+6	135.17E+6	-1.59E+9	2.20E+9	4.76E+6	-3.32E+6	-5.57E+6	21.72E+6
2 000	471.51E+6	298.15E+6	-1.52E+9	2.08E+9	4.18E+6	-1.58E+6	-3.36E+6	16.47E+6
2 500	458.75E+6	458.95E+6	-1.51E+9	2.03E+9	3.80E+6	-604.23E+3	-2.15E+6	13.60E+6
3 000	424.99E+6	589.56E+6	-1.49E+9	2.05E+9	3.45E+6	108.07E+3	-1.27E+6	11.76E+6
3 500	386.15E+6	709.37E+6	-1.49E+9	2.10E+9	3.16E+6	649.57E+3	-600.69E+3	10.49E+6
4 000	380.17E+6	818.31E+6	-1.50E+9	2.13E+9	2.93E+6	859.22E+3	-314.21E+3	9.52E+6
4 500	361.15E+6	931.31E+6	-1.54E+9	2.18E+9	2.80E+6	1.06E+6	-35.37E+3	8.92E+6
5 000	347.74E+6	1.03E+9	-1.58E+9	2.23E+9	2.68E+6	1.18E+6	152.58E+3	8.42E+6
5 500	345.84E+6	1.12E+9	-1.58E+9	2.27E+9	2.50E+6	1.21E+6	250.70E+3	7.87E+6
6 000	291.38E+6	1.20E+9	-1.61E+9	2.37E+9	2.37E+6	1.46E+6	526.62E+3	7.46E+6
6 500	260.93E+6	1.27E+9	-1.62E+9	2.44E+9	2.25E+6	1.55E+6	660.44E+3	7.08E+6
7 000	268.09E+6	1.35E+9	-1.64E+9	2.48E+9	2.15E+6	1.52E+6	669.46E+3	6.77E+6
7 500	257.06E+6	1.43E+9	-1.70E+9	2.54E+9	2.08E+6	1.53E+6	714.06E+3	6.59E+6
8 000	218.97E+6	1.53E+9	-1.79E+9	2.63E+9	2.08E+6	1.63E+6	839.38E+3	6.57E+6
8 500	193.00E+6	1.58E+9	-1.77E+9	2.70E+9	1.96E+6	1.68E+6	916.69E+3	6.21E+6
9 000	175.69E+6	1.64E+9	-1.76E+9	2.77E+9	1.86E+6	1.70E+6	957.00E+3	5.95E+6
9 500	165.85E+6	1.72E+9	-1.83E+9	2.83E+9	1.82E+6	1.69E+6	972.85E+3	5.85E+6
10 000	126.22E+6	1.82E+9	-1.95E+9	2.94E+9	1.84E+6	1.78E+6	1.08E+6	5.96E+6

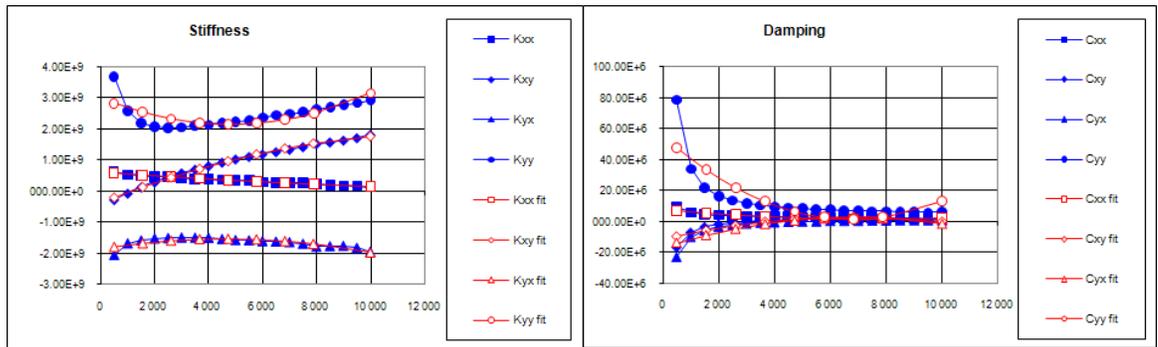


Рис. 18 Графики изменения жесткости и демпфирования

Кривые с индексом “fit” – аппроксимирующие кривые второго порядка

Таблица 8

Коэффициенты жесткости и демпфирования для правого подшипника

Speed rpm	Kxx N/m	Kxy N/m	Kyx N/m	Kyy N/m	Cxx N-s/m	Cxy N-s/m	Cyx N-s/m	Cyy N-s/m
500	694.19E+6	-306.97E+6	-2.31E+9	4.16E+9	9.72E+6	-17.87E+6	-25.32E+6	86.82E+6
1 000	593.41E+6	-100.45E+6	-1.87E+9	2.90E+9	5.88E+6	-7.65E+6	-10.87E+6	37.10E+6
1 500	567.89E+6	99.34E+6	-1.75E+9	2.43E+9	4.97E+6	-4.14E+6	-6.50E+6	23.67E+6
2 000	511.00E+6	243.14E+6	-1.64E+9	2.28E+9	4.18E+6	-2.07E+6	-3.87E+6	17.45E+6
2 500	503.22E+6	419.30E+6	-1.64E+9	2.19E+9	3.90E+6	-995.49E+3	-2.60E+6	14.37E+6
3 000	477.69E+6	563.77E+6	-1.63E+9	2.17E+9	3.61E+6	-253.59E+3	-1.69E+6	12.39E+6
3 500	454.51E+6	673.00E+6	-1.60E+9	2.20E+9	3.25E+6	217.76E+3	-1.06E+6	10.89E+6
4 000	405.47E+6	790.29E+6	-1.61E+9	2.26E+9	3.04E+6	715.02E+3	-454.33E+3	9.90E+6
4 500	404.58E+6	887.60E+6	-1.61E+9	2.28E+9	2.81E+6	854.89E+3	-259.77E+3	9.05E+6
5 000	385.68E+6	996.24E+6	-1.64E+9	2.33E+9	2.70E+6	1.02E+6	-20.42E+3	8.53E+6
5 500	367.03E+6	1.10E+9	-1.69E+9	2.38E+9	2.61E+6	1.16E+6	168.38E+3	8.14E+6
6 000	371.28E+6	1.18E+9	-1.69E+9	2.41E+9	2.46E+6	1.16E+6	228.13E+3	7.64E+6
6 500	340.32E+6	1.26E+9	-1.72E+9	2.48E+9	2.35E+6	1.28E+6	388.76E+3	7.29E+6
7 000	277.51E+6	1.34E+9	-1.74E+9	2.59E+9	2.23E+6	1.53E+6	663.59E+3	6.95E+6
7 500	277.77E+6	1.41E+9	-1.75E+9	2.63E+9	2.13E+6	1.50E+6	672.00E+3	6.66E+6
8 000	280.57E+6	1.49E+9	-1.78E+9	2.67E+9	2.05E+6	1.48E+6	679.46E+3	6.42E+6
8 500	247.65E+6	1.59E+9	-1.87E+9	2.75E+9	2.04E+6	1.57E+6	792.29E+3	6.41E+6
9 000	224.88E+6	1.67E+9	-1.93E+9	2.83E+9	2.01E+6	1.60E+6	849.50E+3	6.29E+6
9 500	193.97E+6	1.72E+9	-1.90E+9	2.92E+9	1.88E+6	1.68E+6	961.92E+3	5.94E+6
10 000	182.00E+6	1.79E+9	-1.90E+9	2.98E+9	1.83E+6	1.67E+6	957.51E+3	5.77E+6

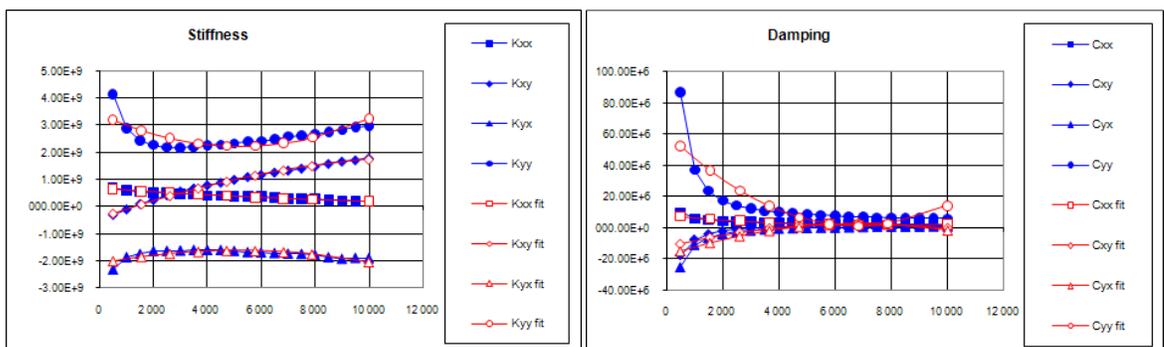


Рис. 19 Графики изменения жесткости и демпфирования. Кривые с индексом “fit” – аппроксимирующие кривые второго порядка

На Рис.20 представлена карта собственных частот, рассчитанная до 10000 об/мин.

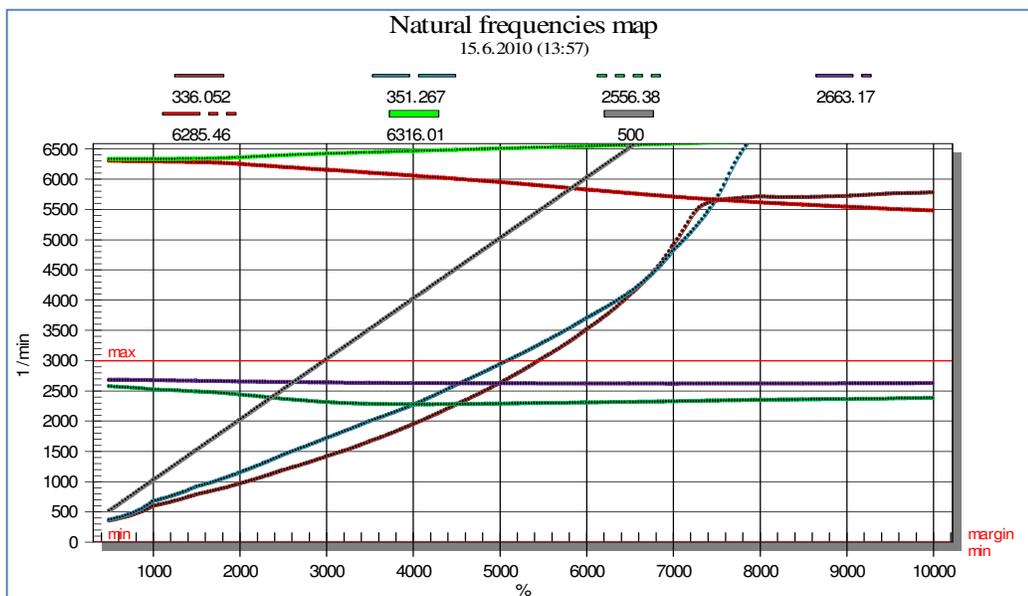


Рис. 20 Карта собственных частот ротора газогенератора на эллиптических подшипниках

Из карты на Рис. 21 видно, что ротор генератора теряет устойчивость на частоте 5915 об/мин (точка пересечения кривой относительного коэффициента демпфирования оси X).

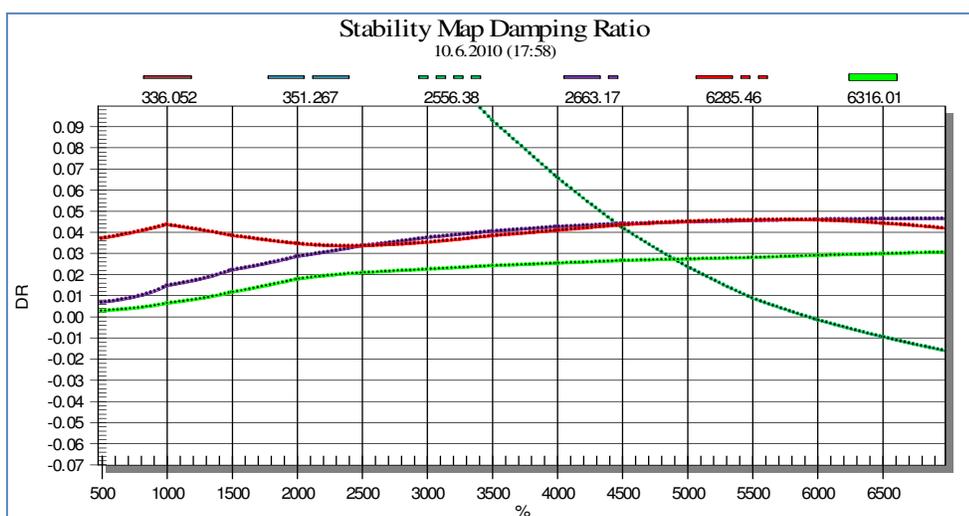


Рис. 21 Карта зависимости относительных коэффициентов демпфирования различных форм колебаний от частоты вращения ротора

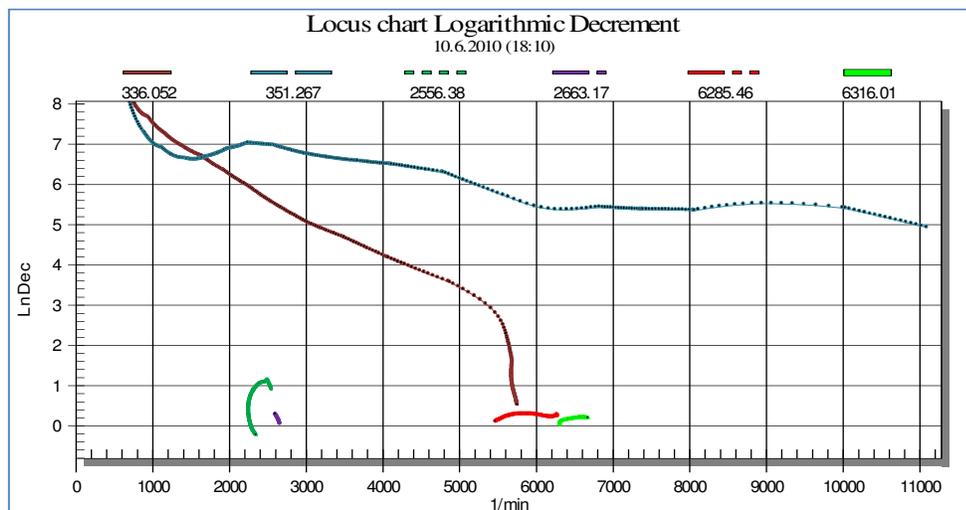


Рис. 22 Карта зависимости логарифмических декрементов от частот собственных колебаний ротора

Собственные частоты, рассчитанные для этого режима, представлены на Рис. 23. На нем выделена частота и форма колебаний, по которой происходит потеря устойчивости. Эту же частоту можно определить из карты на Рис. 21.

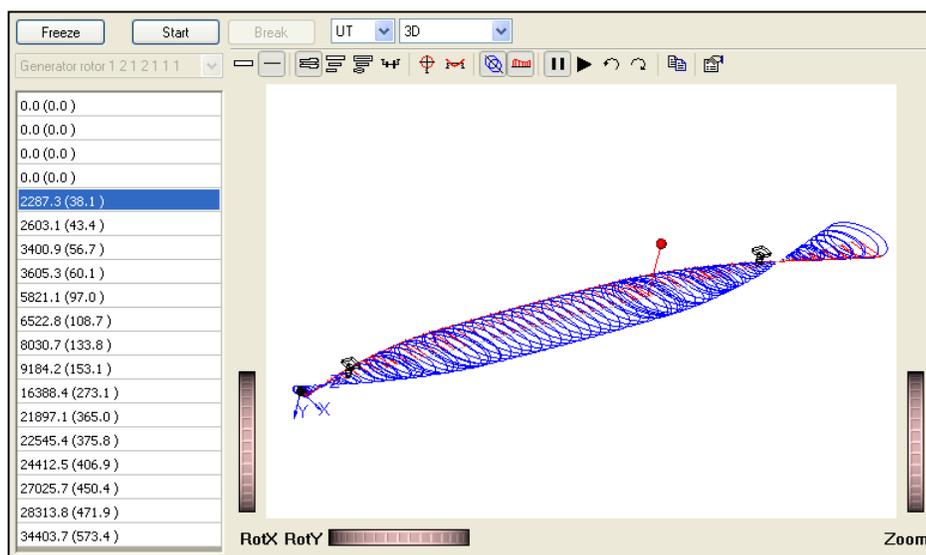


Рис. 23 Собственные частоты при 5915 об/мин

Влияние давления подачи масла на матрицы коэффициентов жесткости и демпфирования подшипников скольжения показано в таблицах 9 и 10.

При изменении давления подачи масла на рабочем режиме с 2 bar до 0.3 bar жесткостные и демпфирующие свойства практически не меняются.

Таблица 9

Рабочий режим, давление 2 bar

X Ext Load	Y Ext Load	Speed rpm	Kxx	Kxy	Kyx	Kyy	Cxx	Cxy	Cyx	Cyy
N	N		N/m	N/m	N/m	N/m	N-s/m	N-s/m	N-s/m	N-s/m
		3 000	504.47E+6	33.40E+6	-1.30E+9	1.42E+9	1.71E+6	-2.14E+6	-2.76E+6	8.11E+6

Таблица 10

Рабочий режим, давление 0.3 bar

X Ext Load	Y Ext Load	Speed rpm	Kxx	Kxy	Kyx	Kyy	Cxx	Cxy	Cyx	Cyy
N	N		N/m	N/m	N/m	N/m	N-s/m	N-s/m	N-s/m	N-s/m
		3 000	505.02E+6	33.32E+6	-1.30E+9	1.42E+9	1.71E+6	-2.14E+6	-2.77E+6	8.11E+6

Незначительное изменение коэффициентов жесткости не приведет к существенному изменению границы устойчивости ротора генератора.

Выводы

1. Разработана и представлена методика оценки границ устойчивости роторов, установленных на нелинейных подшипниках скольжения различных типов.
2. Проведен динамический анализ нелинейной роторной системы генератора электрического тока фирмы «BRUSH».
3. Граница устойчивости отдельного генератора на цилиндрических подшипниках, рассчитанная в нестационарном нелинейном анализе, находится между 4000 rpm и 4200 rpm.
4. Граница устойчивости отдельного генератора, рассчитанная в квазилинейном анализе по уточненной модели подшипников скольжения, находится на частоте вращения ротора 3895 rpm. Потеря устойчивости происходит по форме ротора с частотой 1997 rpm.
5. Граница устойчивости отдельного генератора на эллиптических подшипниках, рассчитанная в квазилинейном анализе по уточненной модели подшипников скольжения, находится на частоте вращения ротора 5915 rpm. Потеря устойчивости происходит по форме ротора с частотой 2287 rpm.

6. Представленная методика может быть использована для анализа роторных систем с нелинейными подшипниками скольжения различных типов.