

10-я Международная научно-техническая конференция "ГЕРВИКОН-2002"  
Украина, Сумы, 10-13 сентября 2002 г.

## НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНСНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РОТОРНЫХ СИСТЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН НА ОПОРНЫХ СЕКМЕНТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

NON-LINEAR RESONANCE-PARAMETRICAL ANALYSIS FOR  
ROTARY SYSTEMS OF CENTRIFUGAL MACHINES WITH  
JOURNAL SEGMENTAL BEARINGS

*САВОНЕНКО Василий Иванович*, с.н.с.,  
ОАО «НПО им. М.В. Фрунзе», г. Сумы, Украина.

*Abstract. This paper presents non-traditional algorithm of non-linear dynamic analysis (non-linear resonance-parametrical analysis) for rotary systems of high rotational speed centrifugal machines. This analysis is performed on the basis of keeping an account of hydrodynamic influence of journal segmental bearings oil wedge on dynamic characteristics of rotary systems for steady-state and non-steady-state conditions. The algorithm is recommended to carry out more refined dynamic analysis of rotary systems for high rotational speed centrifugal machines while their designing, start-up and adjustment works.*

На этапе проектирования ЦМ традиционно выполняется расчет критических частот и форм колебаний (КЧ и ФК) роторных систем (РС) на основе расчетной схемы с абсолютно-жесткими опорами (АЖ-опоры) - упрощенный линейный динамический анализ (ДА) РС на опорных сегментных подшипниках (ОСП). Однако на этапе пуско-наладочных работ ЦМ часто возникает необходимость выяснения причин повышенных вибраций в частотных зонах, где линейный ДА критических/резонансных состояний не выявляет. Таким образом, проблема безвибрационной работы РС высокооборотных ЦМ на ОСП - остается актуальной. Возникает необходимость уточненного ДА РС с учетом гидродинамического влияния (ГДМ-влияния) масляного клина (МК) ОСП, что приводит к задаче совместного решения основных уравнений теории колебаний (ТК) и гидродинамики (ГДМ).

Основные признаки вибрационных проблем высокооборотных ЦМ:

- 1) высокий уровень вибрации (соизмеримый с зазором);
- 2) вибронестабильность (плавающий эффект вибрации);

- 3) вибронеустойчивость (скачкообразные / срывные явления вибрации);
- 4) специфический шум в зоне соединительных зубчатых муфт с шарнирно-шлицевым соединением (ЗМ/ШШС).

Традиционно это классифицируется как режим автоколебаний, однако ОСП созданы для исключения этих режимов.

Более логически обоснованной представляется расчетная схема РС на упруго-демпферных опорах (УД-опорах) с частотно-зависимыми обобщенными коэффициентами ГДМ-жесткости и ГДМ-демпфирования ОСП.

В этом направлении выполнен большой объем экспериментальных и теоретических исследований [1...12].

В данной работе предлагается нетрадиционный алгоритм нелинейного резонансно-параметрического анализа (РП-анализ) РС высокооборотных ЦМ с учетом ГДМ-влияния МК ОСП на динамические свойства (критические частоты и формы колебаний (КЧ и ФК)).

Основная идея РП-анализа сводится к определению резонансных и околорезонансных частот (РЧ/ОРЧ) РС на основе резонансно-частотных диаграмм Кэмпбелла (РЧД-К) для стационарных и нестационарных режимов работы ОСП. Такой анализ позволяет определить как количественную, так и качественную картину изменений стационарного и нестационарных спектров КЧ РС в разгонном диапазоне, расположение РЧ/ОРЧ на стационарных и нестационарных режимах с целью решения вопроса резонансной отстройки.

Обобщенный алгоритм РП-анализа сводится к 2-м этапам: стационарный и нестационарный РП-анализ.

1 ЭТАП. Стационарный нелинейный РП-анализ (в вертикальном направлении (ВН)):

- 1) выбор и обоснование расчетной схемы РС ЦМ;
- 2) расчет стационарных/статических нагрузок ОСП/ВН:  $\overline{R}_o = f(\overline{G}, N, w)$ ;
- 3) ГДМ-расчет точек СПР ОСП/ВН:  $\overline{E}_o = f(\overline{R}_o, w)$ ;
- 4) ГДМ-расчет ОДК/СПР ОСП/ВН:  $\{\overline{K}_o, \overline{C}_o\} = f(\overline{E}_o, w)$ ;
- 5) расчет стационарного спектра КЧ и ФК РС:  $\overline{N}_{so} = f(\overline{K}_o, \overline{C}_o, w)$ ;
- 6) построение стационарной РЧД-К;
- 7) определение стационарных спектров РЧ РС на ОСП/ВН:  $\overline{N}_{po} = f(w)$ ;

2 ЭТАП. Нестационарный нелинейный РП-анализ (в вертикальном направлении (ВН)):

- 1) выбор и обоснование расчетной схемы РС ЦМ;
- 2) расчет дисбалансов динамического возбуждения РС:  $\overline{D}_s = f(z)$ ;
- 3) расчет нестационарных/динамических нагрузок ОСП:  $\overline{R}_d = f(\overline{D}_s, w)$ ;
- 4) расчет экстремальных нагрузок ОСП/ВН:  $\begin{cases} \overline{R}_1 = \overline{R}_o + \overline{R}_d = f(\overline{D}_s, w) \\ \overline{R}_2 = \overline{R}_o - \overline{R}_d = f(\overline{D}_s, w) \end{cases}$

- 5) ГДМ-расчет экстремальных точек СПР ОСП/ВН: 
$$\begin{cases} \overline{E1} = f(\overline{R1}, w); \\ \overline{E2} = f(\overline{R2}, w); \end{cases}$$
- 6) ГДМ-расчет экстремальных ОДК/СПР ОСП/ВН: 
$$\begin{cases} \overline{K1}, \overline{C1} = f(\overline{E1}, w); \\ \overline{K2}, \overline{C2} = f(\overline{E2}, w); \end{cases}$$
- 7) расчет нестационарных спектров КЧ и ФК РС: 
$$\begin{cases} \overline{Ns1} = f(\overline{K1}, \overline{C1}, w); \\ \overline{Ns2} = f(\overline{K2}, \overline{C2}, w); \end{cases}$$
- 8) построение нестационарных РЧД-К;
- 9) определение нестационарных спектров РЧ/ОРЧ РС на ОСП/ВН:
- $$\begin{cases} \overline{Np1} = f(w); \\ \overline{Np2} = f(w); \end{cases}$$

где:  $f(\dots)$  - функциональная зависимость;  $z$  - осевая координата;  $G$  - вектор весовой нагрузки;  $N$  - потребляемая мощность;  $w$  - частота вращения вала (угловая скорость). Нестационарный РП-анализ выполнен на основе ГДМ-анализа ОСП стационарной задачи (в 1-м приближении).

На основе вышеприведенного алгоритма был проведен нелинейный РП-анализ РС высокооборотной ЦМ на ОСП. РП-анализ является сложным и трудоемким процессом, требующим большого внимания с целью исключения ошибок.

Расчетная схема РС представляет собой вал ступенчато-переменной жесткости с сосредоточенными массами насадных деталей. Зоны соединительных ЗМ/ШШС - моделируются свободными шарнирами с эквивалентными массовыми характеристиками. При определении статических нагрузок опор (задача статического изгиба) в рассмотрение вводится весовая нагрузка РС. При определении динамических нагрузок опор (задача вынужденных колебаний) в зонах свободных шарниров в рассмотрение вводится вектор статических дисбалансов динамической нагрузки РС (за счет сборочных радиальных зазоров ЗМ/ШШС). В зонах расположения ОСП в рассмотрение вводятся упруго-демпферные опоры (УД-опоры) с частотно-зависимыми обобщенными динамическими коэффициентами ГДМ-жесткости и ГДМ-демпфирования (определяются на основе нелинейного ГДМ-анализа ОСП). Расчет статических и динамических нагрузок ОСП, КЧ и ФК был выполнен на основе программного комплекса [12] с использованием метода дискретноопорных частот разгонного диапазона. Рассматривается консервативная РС на ОСП.

Результаты расчета:

- 1) стационарные РЧД-К - см. рис. 1,2;
- 2) нестационарная РЧД-К - см. рис. 3.

Из РП-анализа следует, что стационарный спектр КЧ является частотно-зависимым. При динамическом возбуждении РС на ОСП стационар-

ный спектр преобразуется в нестационарный, имеющий "особые" свойства и который может быть представлен в виде суммы 2-х составляющих: постоянной и переменной. Постоянная составляющая – это средний уровень спектра, переменная - это амплитуда колебаний спектра относительно среднего уровня, которая имеет периодический характер с частотой прецессии вала. Периодические колебания нестационарного спектра происходят в пределах 2-х границ - "min" и "max" - нижнего и верхнего нестационарных спектров (экстремальные спектры). В связи с этим происходит расширение стационарных резонансных зон и возможно появление новых нестационарных резонансных и околорезонансных состояний.

Нижний нестационарный спектр соответствует более мягким зонам СХ ОСП (верхний участок орбиты движения вала) и ограничен снизу 1-м предельным спектром - спектром КЧ РС на абсолютно-податливых опорах (АП-опоры:  $K = 0$ ), верхний нестационарный спектр - более жестким зонам СХ ОСП (нижний участок орбиты движения вала) и ограничен сверху 2-м предельным спектром - спектром КЧ РС на абсолютно-жестких опорах (АЖ-опоры:  $K = \infty$ ).

В зонах равенства статических и динамических нагрузок ОСП "особые зоны" - "зоны невесомости") наблюдается эффект резкого "провала" ГДМ-Ж МК ОСП (соответствует переходу орбит движения вала через центральные зоны ОСП - наиболее запрещенный режим работы ОСП, т.к. сопровождается ударными явлениями). В этих зонах происходит резкое снижение КЧ вплоть до сближения и пересечения с линией режимов работы (это приводит к появлению новых резонансных и околорезонансных состояний) и нестационарные экстремальные спектры максимально расходятся. При дальнейшем увеличении частоты вращения, после перехода орбит движения вала через центральные зоны ОСП (особенно в зонах КЧ стационарного спектра), происходит резкое увеличение динамических нагрузок и нестационарные экстремальные спектры КЧ - сближаются, работа ОСП приближается к режиму "обкатки" - также ненормальный режим работы ОСП.

Таким образом причиной вибрационных проблем РС на ОСП могут быть не только резонансные состояния стационарного режима, но и особые резонансные и околорезонансные состояния нестационарных режимов, которые зависят от уровня динамической нагрузки РС (за счет сбросных дисбалансов). Поэтому ЗМ/ШЩС гибких РС высокооборотных ЦМ на ОСП являются источником вибрационных проблем не только на стационарных режимах ОСП, но и на нестационарных и должны иметь ограничение их применения по частоте вращения.

Обобщенный перечень причин вибрационных проблем РС на ОСП:

- 1) ГДМ-влияние МК ОСП на спектры КЧ и РЧ гибких РС ЦМ при стационарных режимах - зависит от уровня статической нагрузки;

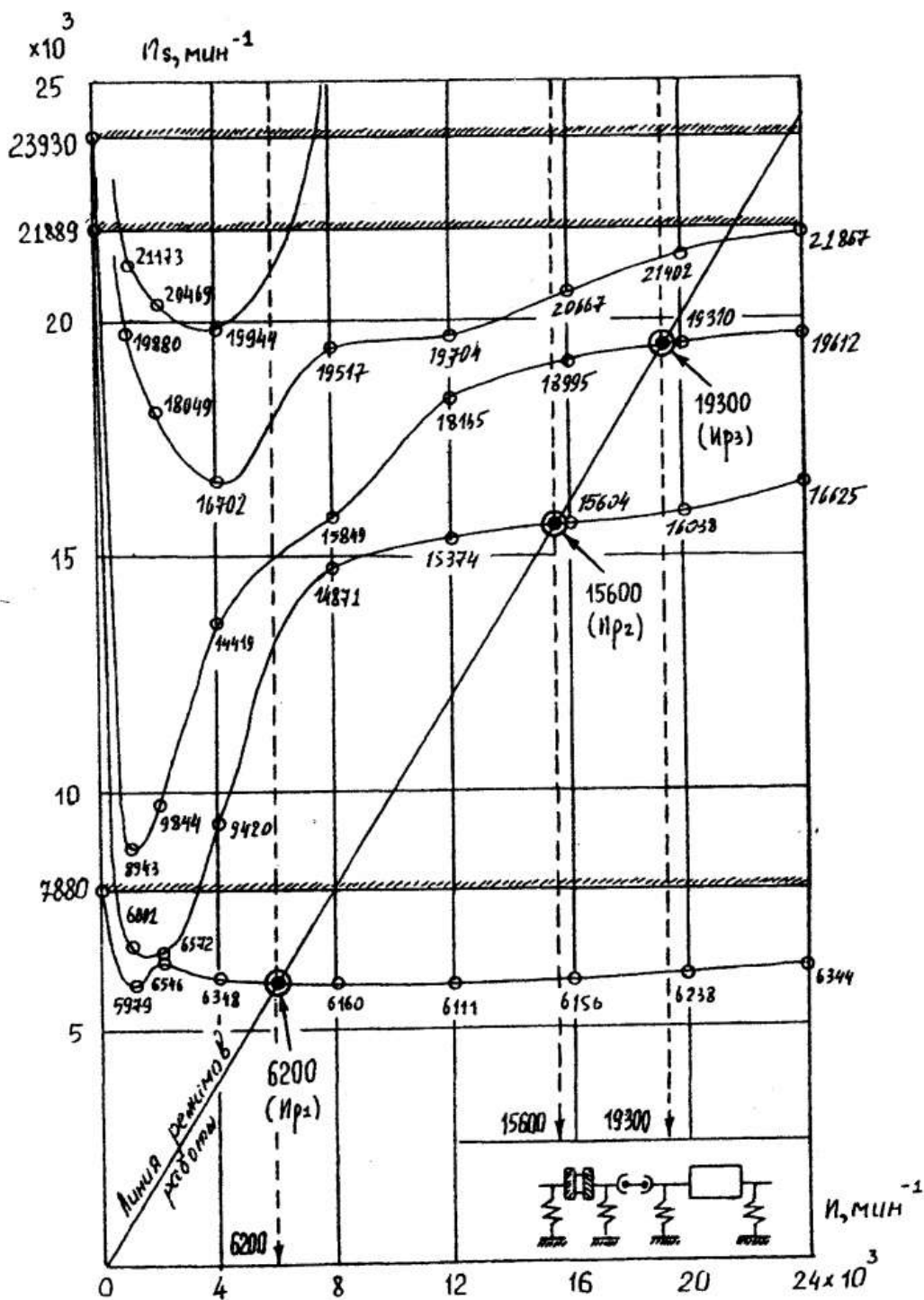


Рисунок 1 - Стационарная резонансно-частотная диаграмма Кэмпбелла гибкой роторной системы центробежной машины на опорных сегментных подшипниках

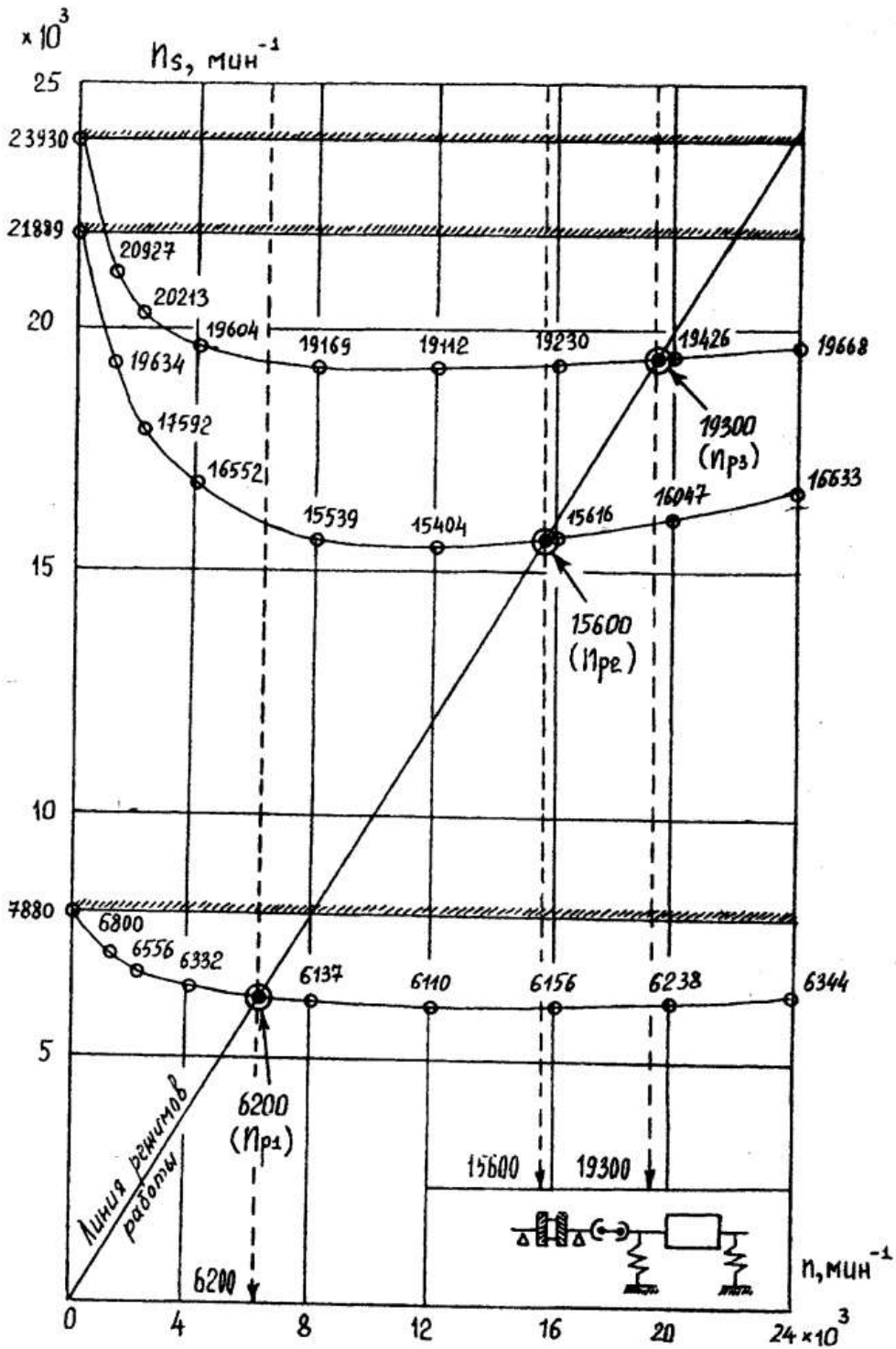


Рисунок 2 - Стационарная резонансно-частотная диаграмма Кэмпбелла гибкой роторной системы центробежной машины на опорных сегментных подшипниках

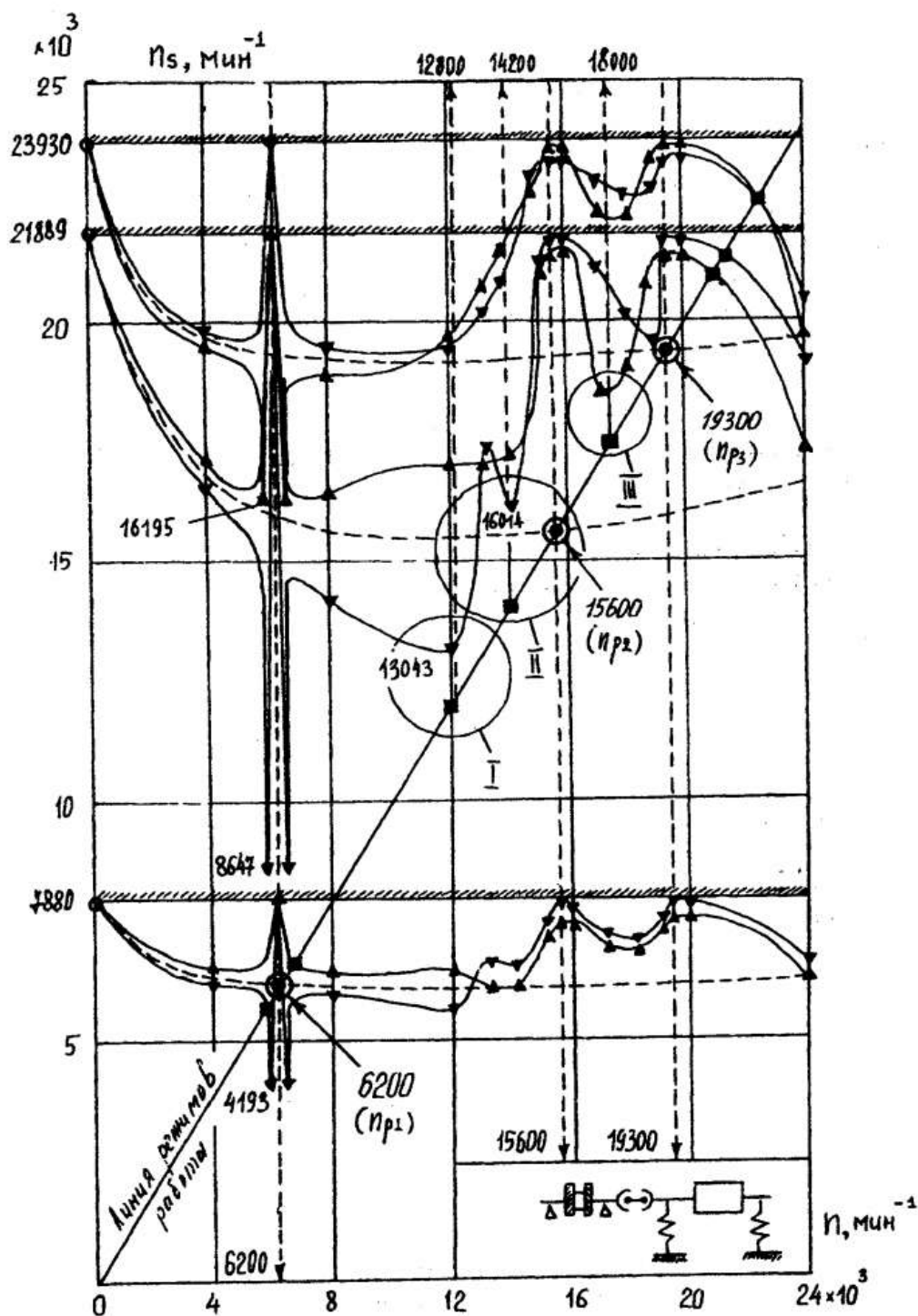


Рисунок 3 - Нестационарная резонансно-частотная диаграмма Кэмпбелла гибкой роторной системы центробежной машины на опорных сегментных подшипниках

- 2) особое ГДМ-влияние МК ОСП на спектры КЧ и РЧ гибких РС ЦМ при нестационарных режимах - зависит от уровня как статической, так и динамической нагрузок и приводит к периодическим колебаниям нестационарного спектра в пределах 2-х границ: нижнего и верхнего нестационарных спектров;
- 3) высокий уровень динамических нагрузок, которые приводят к нестационарным режимам работы ОСП (за счет сборочных дисбалансов ЗМ/ШШС);
- 4) большой диапазон изменения ОДК (ГДМ-Ж и ГДМ-Д) на нестационарных режимах ОСП, особенно при равенстве статических и динамических нагрузок (соответствует переходу орбит движения вала через центральные зоны ОСП);
- 5) малый уровень стационарных нагрузок ОСП (легкие ротора).

Следствием вышеперечисленных причин является появление стационарных и дополнительных нестационарных особых резонансных состояний РС на ОСП, что приводит к расширенному особому спектру резонансных и околорезонансных состояний.

В связи с этим вопрос резонансной отстройки значительно усложняется. Наиболее целесообразным представляется применение соединительных муфт, обеспечивающих более высокую соосность балансируемых осей составных частей РС (например: высокососные зубчатые муфты, муфты с гибкими элементами, гибкие дисковые муфты и т.д.) с целью снижения уровня динамической нагрузки. Эффективным может быть увеличение стационарных нагрузок малонагруженных ОСП (специальные конструктивные мероприятия) - при этом возможно снижение уровня вибрации, смещение спектров КЧ и РЧ в область более высоких частот, повышение устойчивости движения вала.

Выполненный РП-анализ показывает всю сложность нелинейного ГДМ-влияния ОСП на динамические свойства РС, что приводит к особым резонансным состояниям РС. Он позволяет глубже раскрыть природу механизма возникновения особых динамических явлений (новых резонансных и околорезонансных состояний) РС высокооборотных ЦМ на ОСП, более качественно обосновать возникающие вибрационные проблемы и более качественно разработать рекомендации по их устранению и резонансной отстройке (с целью принятия более эффективных технических решений). Непонимание происходящих динамических процессов приводит к принятию малоэффективных решений. Выполненный РП-анализ представляет как научный, так и практический интерес.

Для обеспечения безвибрационной работы РС высокооборотных ЦМ на ОСП необходимо выполнение следующих требований:

- 1) обеспечение резонансной отстройки РС с учетом ГДМ-влияния МК ОСП на стационарных режимах;
- 2) сведение динамических нагрузок составных РС к нулю.



2-е требование может быть выполнено, если обеспечены:

- 1) качественная балансировка составных частей РС (роторы, торсионы и т.д.) с учетом их гибкости на рабочих режимах;
- 2) высокая соосность балансировочных осей составных частей РС на рабочих режимах;
- 3) качественная центровка балансировочных осей составных частей РС на рабочих режимах (с учетом ГДМ-влияния МК ОСП, температурного влияния составных частей и т.д.).

## Выводы

1. Традиционный расчет КЧ и ФК РС на ОСП на основе расчетной схемы с АЖ-опорами (упрощенный линейный динамический анализ) не является гарантией безвибрационной работы, т.к. не отражает всего многообразия динамических явлений РС на ОСП, а является одной из предельных ситуаций.
2. Ошибочным является мнение о центрировании ЗМ/ШШС (традиционного исполнения) по боковым поверхностям шлицев - наличие радиальных зазоров по вершинам и впадинам шлицев приводит к появлению сборочных дисбалансов динамической нагрузки РС. Таким образом ЗМ/ШШС являются источником особых резонансных вибрационных проблем гибких РС высокооборотных ЦМ на ОСП (проблема вынужденных колебаний), поэтому должно быть ограничение их применения по частоте вращения.
3. Гибкие РС высокооборотных ЦМ на ОСП, в состав которых входят ЗМ/ШШС (традиционного исполнения), имеют расширенный спектр особых резонансных состояний за счет динамического возбуждения РС и нелинейных ГДМ-свойств ОСП.
4. Наиболее эффективным решением устранения особых вибрационных проблем является снижение уровня динамической нагрузки РС на рабочих режимах, что требует применения высокососных соединительных муфт.

Нелинейный РП-анализ рекомендуется для уточненного динамического анализа РС высокооборотных ЦМ на ОСП (задачи нелинейной динамики) на этапах проектирования и проведения пуско-наладочных работ.

На основе выполненного нелинейного РП-анализа может быть сформулирована общая теорема о критических и резонансных частотах гибких РС (горизонтального исполнения) высокооборотных ЦМ на ОСП.  
**ТЕОРЕМА:** Гибкие РС (горизонтального исполнения) высокооборотных ЦМ на ОСП могут иметь 2 типа КЧ и РЧ:

- 1) стационарные КЧ (I рода) - определяются динамическими свойствами РС с учетом ГДМ-влияния МК ОСП при стационарных режимах рабо-

ты ОСП (зависят от уровня статической нагрузки РС) - стационарный спектр КЧ:

$$(\overline{W_{is}}, \overline{V_{is}}, i = \overline{1, i_{max}});$$

- 2) нестационарные КЧ (II рода) - определяются динамическими свойствами РС с учетом ГДМ-влияния МК ОСП при нестационарных режимах работы ОСП (зависят от уровня как статической, так и динамической нагрузок) - нестационарный спектр КЧ:

$$(\overline{W_{in}}, \overline{U_{in}}, i = \overline{1, i_{max}}).$$

Спектры являются частотно-зависимыми, полярно-анизотропными. Нестационарный спектр является следствием динамического возбуждения гибкой РС (вынужденные колебания) и нелинейных свойств ОСП и может быть представлен в виде 2-х составляющих: постоянной и переменной. Постоянная составляющая - это средний уровень, переменная составляющая - это амплитуда колебаний относительно среднего уровня  $\underline{c}$  частотой прецессии вала.

Для резонансного проявления стационарных КЧ (I рода) необходимо и достаточно выполнение:

- 1) условия стационарного резонансного возбуждения I рода:

$$W_p = W_{is}; (\overline{V_{is}}, \overline{f}) \neq 0; i \in \overline{1, i_{max}}.$$

Для резонансного проявления нестационарных КЧ (II рода) необходимо и достаточно выполнение:

- 1) условия нестационарного резонансного возбуждения II рода:

$$W_p = W_{in}; (\overline{U_{in}}, \overline{f}) \neq 0; i \in \overline{1, i_{max}};$$

- 2) условия относительной стабильности КЧ и ФК (в течении определенного времени периода прецессии):

$$\overline{W_{in}}, \overline{U_{in}} = const; i \in \overline{1, i_{max}},$$

где  $\overline{W_{is}}, \overline{V_{is}}$  - стационарные КЧ и ФК I рода;

$\overline{W_{in}}, \overline{U_{in}}$  - нестационарные КЧ и ФК II рода;

$(\overline{V_{is}}, \overline{f}) \neq 0, (\overline{U_{in}}, \overline{f}) \neq 0$  - условия неортогональности векторов (обобщенные силы резонансного возбуждения);

$\overline{f} = \overline{D} \cdot W^2$  - вектор динамического возбуждения;

$\overline{D}$  - вектор дисбалансов;

$W_p$  - рабочая частота вращения (угловая скорость).

Относительная стабильность КЧ и ФК РС при нестационарных режимах работы ОСП может проявляться при равенстве статических и динамических нагрузок ОСП (соответствует переходу орбит движения РС через центральные зоны ОСП - 2-й режим работы) и при высоком уровне динамического возбуждения (соответствует режиму "обкатки" ОСП - 3-й режим работы).

ПРИМЕЧАНИЕ: Возможны 3-и режима работы ОСП: 1 - нормальный режим:  $Rd \ll Rc$ ; 2 - ударный режим:  $Rd = Rc$ ; 3 - режим "обкатки":  $Rc \ll Rd$ , где  $Rc$ ,  $Rd$  - статическая и динамическая нагрузки ОСП. Наиболее оптимальным для длительной работы является 1-й режим. 2-й и 3-й режимы являются неблагоприятными (нерекомендуемыми) для длительной работы, т.к. резко сокращают ресурс ОСП, особенно 2-й режим.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. - М.: Наука, 1968. - 560с.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1972. - 416с.
3. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. - М.: Изд. АН СССР, 1959. - 247с.
4. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат - фундамент. - Киев: Наукова думка, 1991. - 252с.
5. Хронин Д.В. Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1970. - 412с.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. -Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов /Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова. - М.: Машиностроение, 1980.-544с.
7. Тондл А. Динамика роторов турбоагрегатов. - Ленинград: Энергия, 1971. - 387с.
8. Шнепп В.Б. Конструирование и расчет ЦКМ. - М.: Машиностроение, 1995. - 240с.
9. Максимов В.А., Баткис Г.С. Трибология подшипников и уплотнений жидкостного трения высокоскоростных турбомашин. -Казань: Фэн, 1998. - 430с.
- 10.Марцинковский В.А. Гидродинамика и прочность центробежных насосов. - М.: Машиностроение, 1970. - 272с.
- 11.Симоновский В.И. Устойчивость и нелинейные колебания роторов ЦМ. - Харьков: Вища школа. Изд. ХГУ, 1986. - 128с.
- 12.Савоненко В.И. Программный комплекс расчетного статико-динамического анализа роторных систем ЦКМ. // Труды 8-й МНТК "НАСОСЫ-96". - Сумы: ИПП "Мрия-1" ЛТД, 1996, с. 297-302.