

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
РОТОРОВ В ХОДЕ СБОРКИ

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: д-р техн. наук Белобородов Сергей Михайлович

Пермь – 2015

Наука — особый вид познавательной деятельности Наука — особый вид познавательной деятельности, направленной на получение, уточнение и распространение объективных Наука — особый вид познавательной деятельности, направленной на получение, уточнение и распространение объективных, системно-организованных и обоснованных знаний Наука — особый вид познавательной деятельности, направленной на получение, уточнение и распространение объективных, системно-организованных и обоснованных знаний о природе, обществе и мышлении Наука — особый вид познавательной деятельности, направленной на получение, уточнение и распространение объективных, системно-организованных и обоснованных знаний о природе, обществе и мышлении. **ИСТИНА В НАУКЕ – ВЫСШАЯ ЦЕННОСТЬ, КАКОЙ БЫ ОНА НИ БЫЛА.**

В современной литературе под МЕТОДОЛОГИЕЙ обычно понимают прежде всего М. научного познания, т. е. учение о принципах построения, формах и способах научно-познавательной деятельности. М. науки даёт характеристику компонентов научного исследования — его объекта, предмета анализа, задачи исследования (или проблемы), совокупности исследовательских средств, необходимых для решения задачи данного типа, а также формирует представление о последовательности движения исследователя в процессе решения задачи. Наиболее важными точками приложения М. являются постановка проблемы (именно здесь чаще всего совершаются критический анализ) Наука — особый вид познавательной деятельности, направленной на получение, уточнение и распространение объективных, системно-организованных и обоснованных знаний о природе, обществе и мышлении. Основой этой деятельности является сбор научных фактов, их постоянное обновление и систематизация, критический анализ. Наука — особый вид познавательной деятельности, направленной на получение, уточнение и распространение объективных, системно-организованных и обоснованных знаний о природе, обществе и мышлении. Основой этой деятельности является сбор объектов и фактов, их постоянное обновление и систематизация, критический анализ и, на этой базе,

ОСНОВНЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ РОССИЙСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- **ТАК ВСЕГДА ДЕЛАЛИ**

ОНО МНЕ НЕ НАДО

- **ТЕБЕ НАДО – ТЫ И ДЕЛАЙ**
- **Мне за это не плОтЮт**

Рациональные принципы проектирования:

Каждый проект – как первый и последний в жизни.

В разработке проекта выбрать вариант организации работы:

- гений поневоле (все сам)
- команда (организатор, генератор, исполнители, критик)

Новый проект содержит изобретения (мысль изреченная – уже ложь).

Отработанный проект – как хороший сын – денег не просит

Умный должен рассчитать технологию на дурака

Технология должна решать экономические задачи

Основные послылы современного руководителя

- Дело (Россию, медицину и т.д....) надо спасать
- Я знаю, как это сделать и поделить деньги.
- Если деньги буду делить не я – то пошло оно все ...

А надо:

Земля нам не в наследство досталась – мы ее взяли займы у детей.

Память о человеке живет дольше его самого.

Имя человек получает один раз

Есть, пить, делать запасы и жилье, спать, заботиться о потомстве, получать удовольствие может каждое животное. **Только человек заботится о старых и больных, собирает знания, ставит цели и постигает смысл жизни**

А на гнилом западе считают, что принципы ЭТО:

- какие операции будут выполняться;
- будут ли они выполняться и при каких условиях;
- кто будет их выполнять;
- когда это будет происходить;
- где они будут выполняться;
- насколько точно они будут выполняться;
- какая информация будет при этом использоваться.

На самом деле это - вопросы

Принцип или начало или начало (лат. *principium*, греч. αρχή):

Основополагающая истинаОсновополагающая истина, законОсновополагающая истина, закон, положениеОсновополагающая истина, закон, положение или движущая сила, лежащая (лежащий) в основе

других истин, законов, положений или движущих сил;

Руководящее положение, основное правилоРуководящее положение, основное правило, установкаРуководящее положение, основное правило, установка для какой-либо деятельности;

Внутренняя убеждённостьВнутренняя убеждённость в чем-либо, точка зренияВнутренняя убеждённость в чем-либо, точка зрения на что-либо, норма поведения;

Основная особенность устройстваОсновная особенность устройства, действия механизмаОсновная особенность устройства, действия механизма, прибора и тому подобное.

Мы должны это сделать

- Процесс следует делить на законченные операции с контролем параметров в конце каждой
- Главное внимание - корректности измерений параметров.
- Минимизация подготовительных операций (переместить все сложности работ на технологическую оснастку)
- Ритмичность процесса обеспечивается взаимодействием звеньев технологической цепочки
- В ТП должны быть рассчитаны и заложены корректирующие элементы, а также управляющие функции.
- **НА ЛЮБОМ РАБОЧЕМ МЕСТЕ ОБУЧЕННЫЙ РАБОЧИЙ ЛУЧШЕ, ЧЕМ ДИПЛОМИРОВАННЫЙ НЕУЧ.**

РУССКИЕ ДОЛЖНЫ УСВОИТЬ, ЧТО УЧИТЬСЯ И ПОДРАЖАТЬ – РАЗНЫЕ ПОНЯТИЯ

Газопроводы – артерии теплоэнергетики России

Актуальность выбранной темы исследования обусловлена массовым применением турбоагрегатов в газопроводах и газохранилищах теплоэнергетической отрасли российской промышленности



Газоперекачивающие агрегаты серии «Урал» – основа трубопроводов, соединяющих «Северный поток» и «Южный поток» с месторождениями газа

Эксплуатация турбоагрегатов проходит в экстремальных условиях



Труднодоступность районов размещения турбоагрегатов усложняет их обслуживание и ремонт



Турбоагрегаты должны обеспечивать непрерывную подачу газа



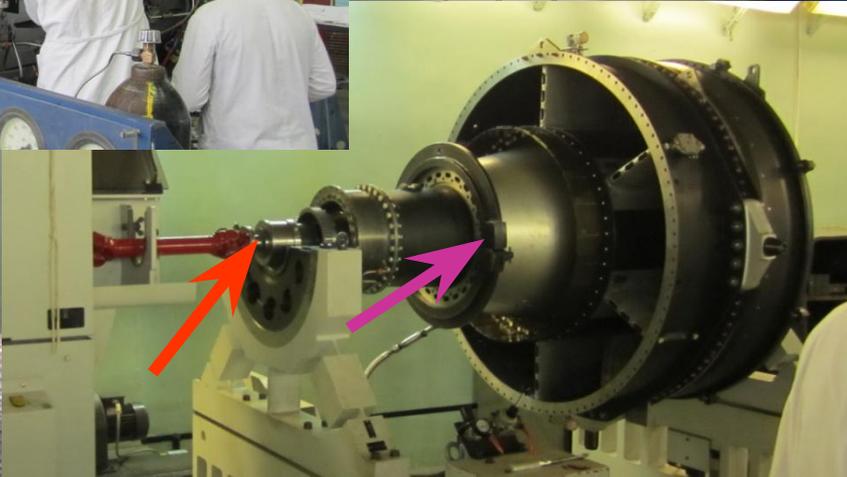
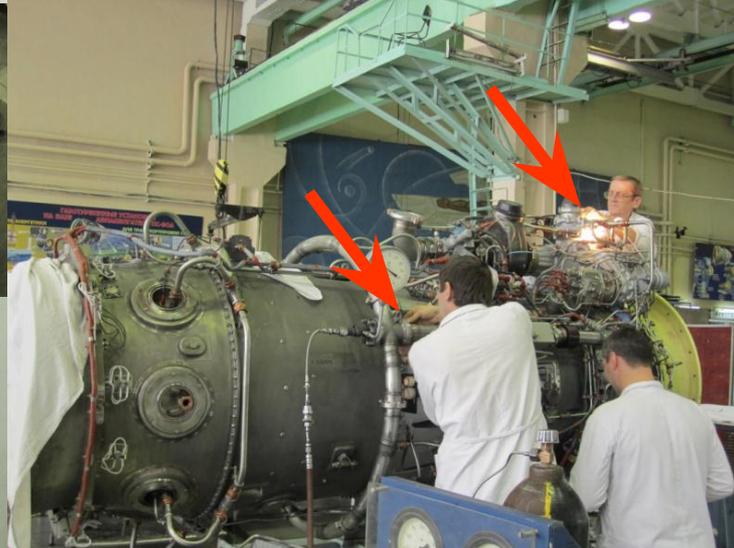
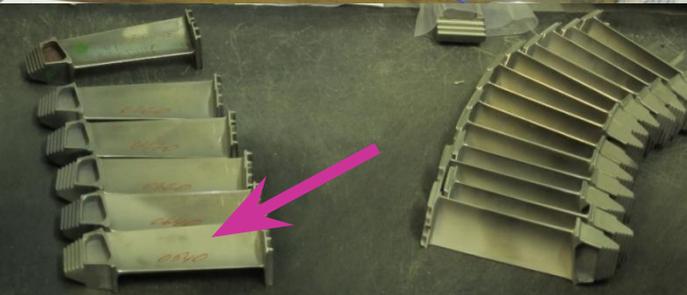
Увеличение пропускной способности трубопроводов обеспечивается повышением характеристик турбоагрегатов



Развитие турбостроения сдерживают проблемы технологического обеспечения

Типовой технологический процесс сборки роторов

Большинство работ по сборке роторных машин выполняется вручную, технические решения принимаются исходя из накопленного опыта, качество работ определяется квалификацией исполнителя прогнозирование результатов сборки отсутствует.
Пример: ОАО «ПМЗ» (аналогично на предприятиях: НПО «Сатурн», НПО «Салют», НПО «Искра», МПП им. Чернышева и т.д.)



Типовой технологический процесс сборки роторов

Производство роторных машин обеспечено современным оборудованием (напр.: «Шенк»), но не обеспечено современными технологиями сборки и контроля ее качества, что приводит к заметному снижению ресурса работы агрегатов



Газотурбинный двигатель – наиболее эффективный современный энергоисточник

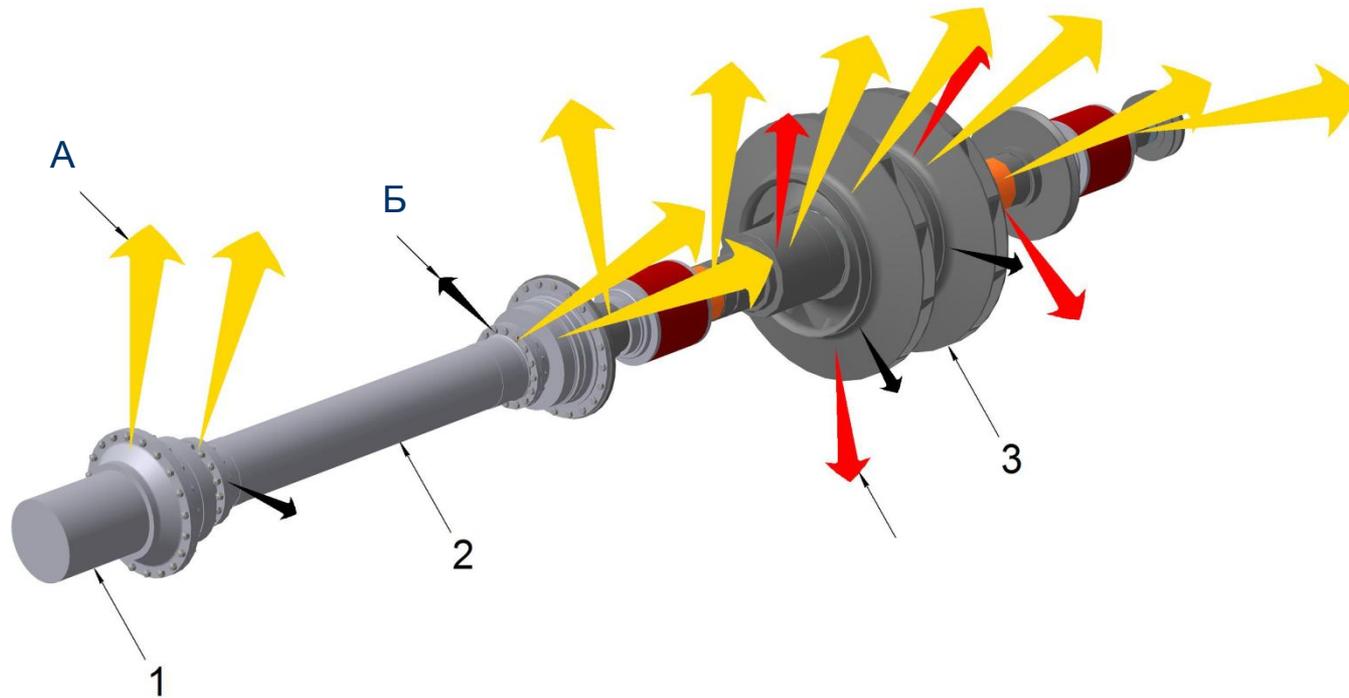
Ресурс работы отечественного авиационного двигателя типа ПС-90 не достигает 10 000 часов, рекорд американского RB211-535E4 - 40 531 часов



Последствия сверхнормативной вибрации



Валопровод высокоскоростного газотурбинного агрегата



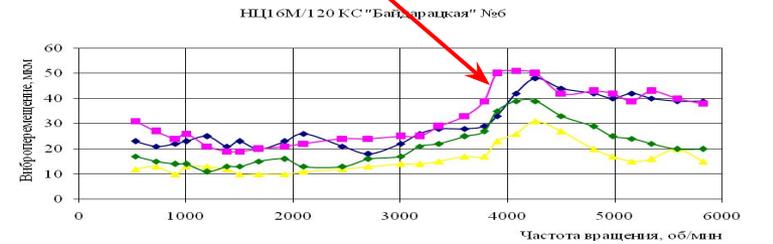
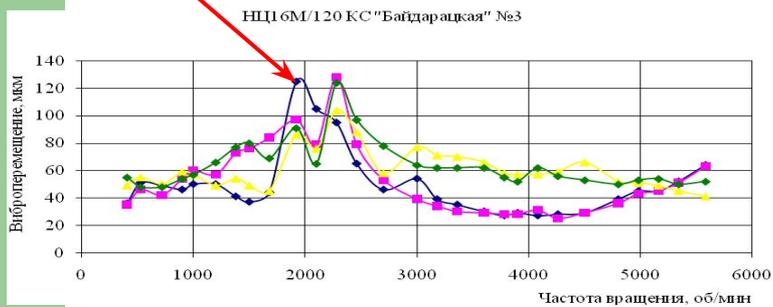
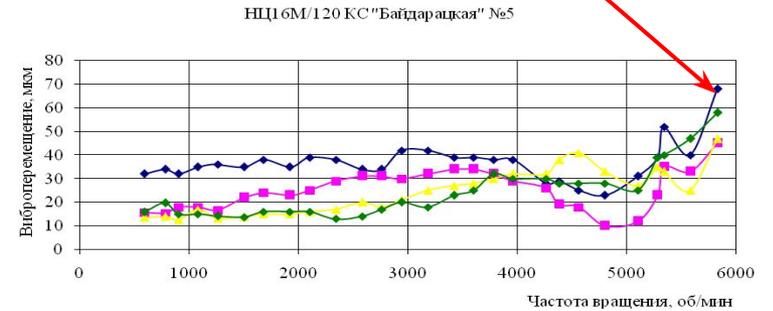
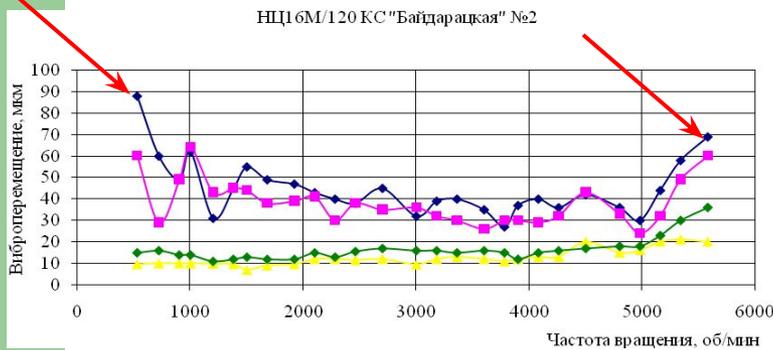
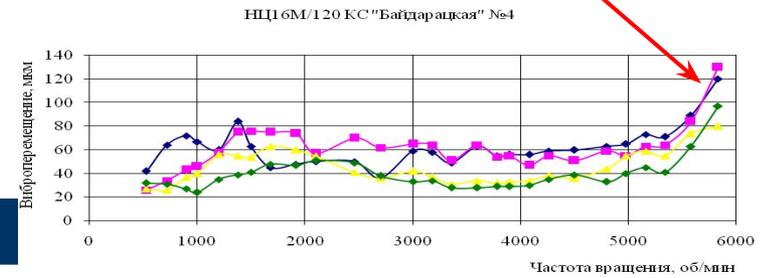
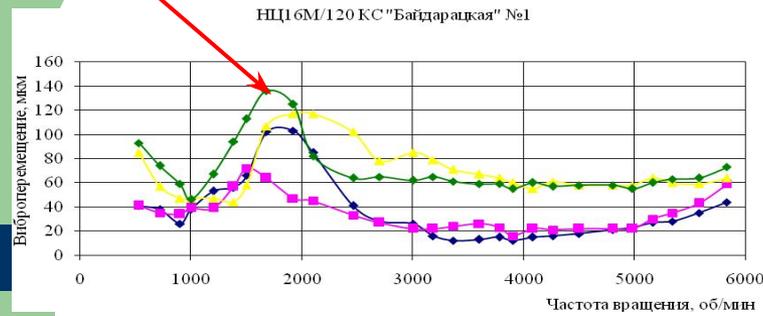
1 – вал силовой турбины, 2 – трансмиссия, 3 – ротор компрессора, А – монтажные, Б – остаточные, В – локальные дисбалансы

Валопровод — комплекс устройств — комплекс устройств, механизмов — комплекс устройств, механизмов и соединений, служащих для передачи крутящего момента — комплекс устройств, механизмов и соединений, служащих для передачи крутящего момента от двигателя — комплекс устройств, механизмов и соединений, служащих для передачи крутящего момента от двигателя к движителю.

Валопровод — (Propeller shafting) система валов, составленная из нескольких частей, соединенных болтами на фланцах;

ГОСТ 25364-79 Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор **валопроводов** и общие требования к проведению измерений.

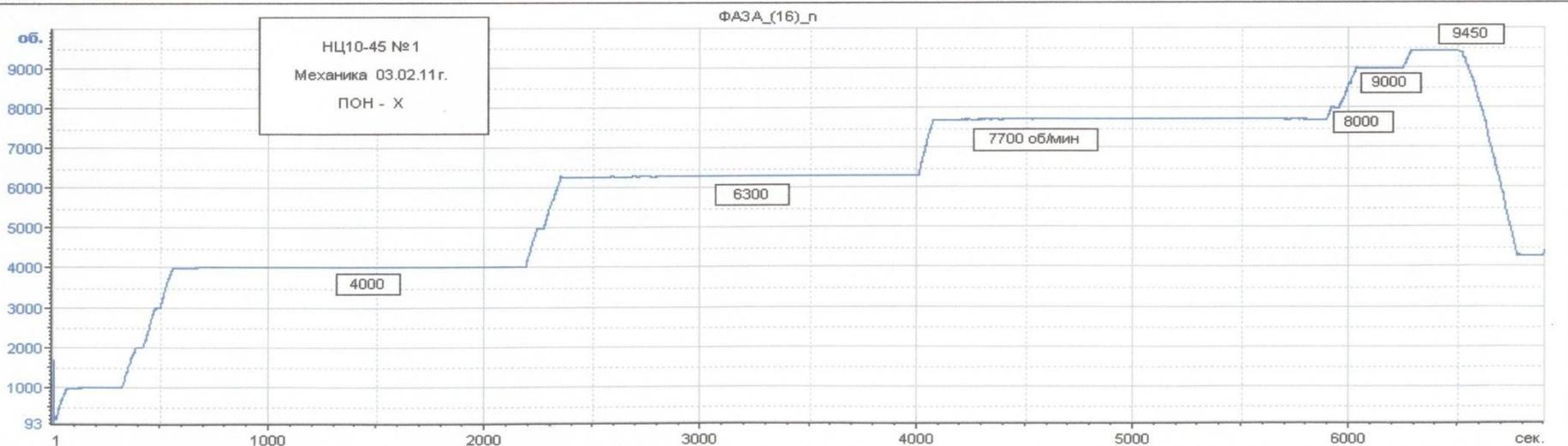
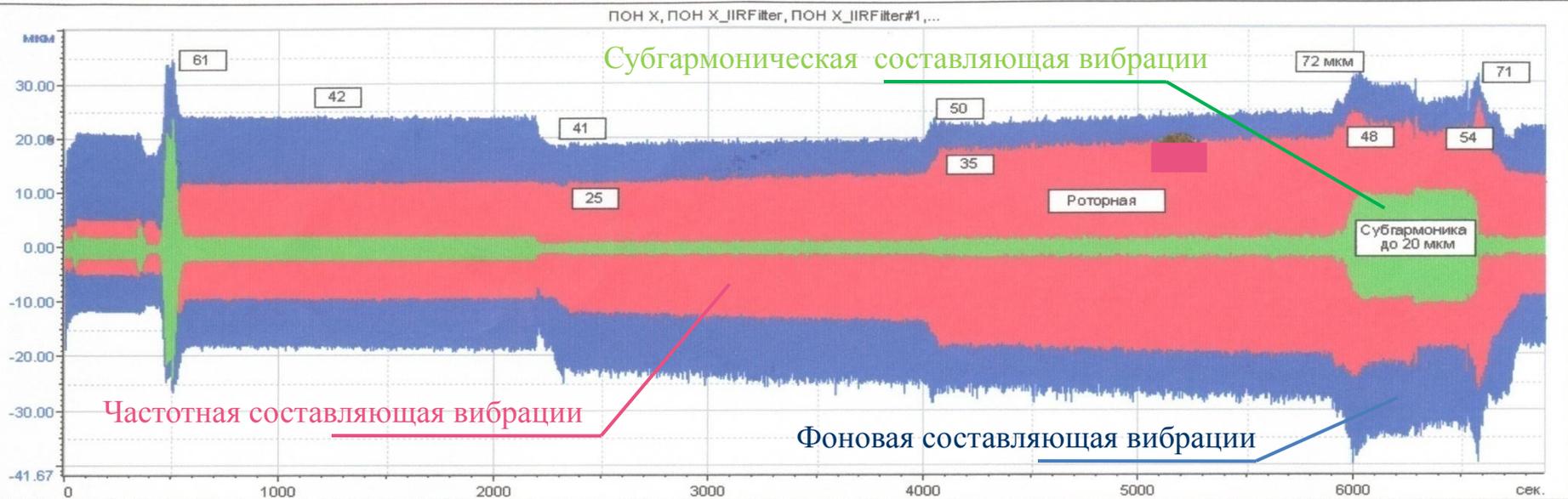
Результаты испытаний уравновешенных роторов при случайном положении локальных дисбалансов



Практически все диаграммы абсолютно индивидуальны. Наряду с диаграммами а, д, когда увеличено уровня вибраций в конце диапазона предшествует их относительная стабильность на уровнях, отличающихся друг от друга в два раза, имеются результаты со снижением уровней вибраций (а, е), локальным снижением вибраций в конце рабочего диапазона (е), локальным повышением (б), пиковыми повышениями вибраций на частоте около 2000 об/мин (а, е) и высокими начальными вибрациями (б).

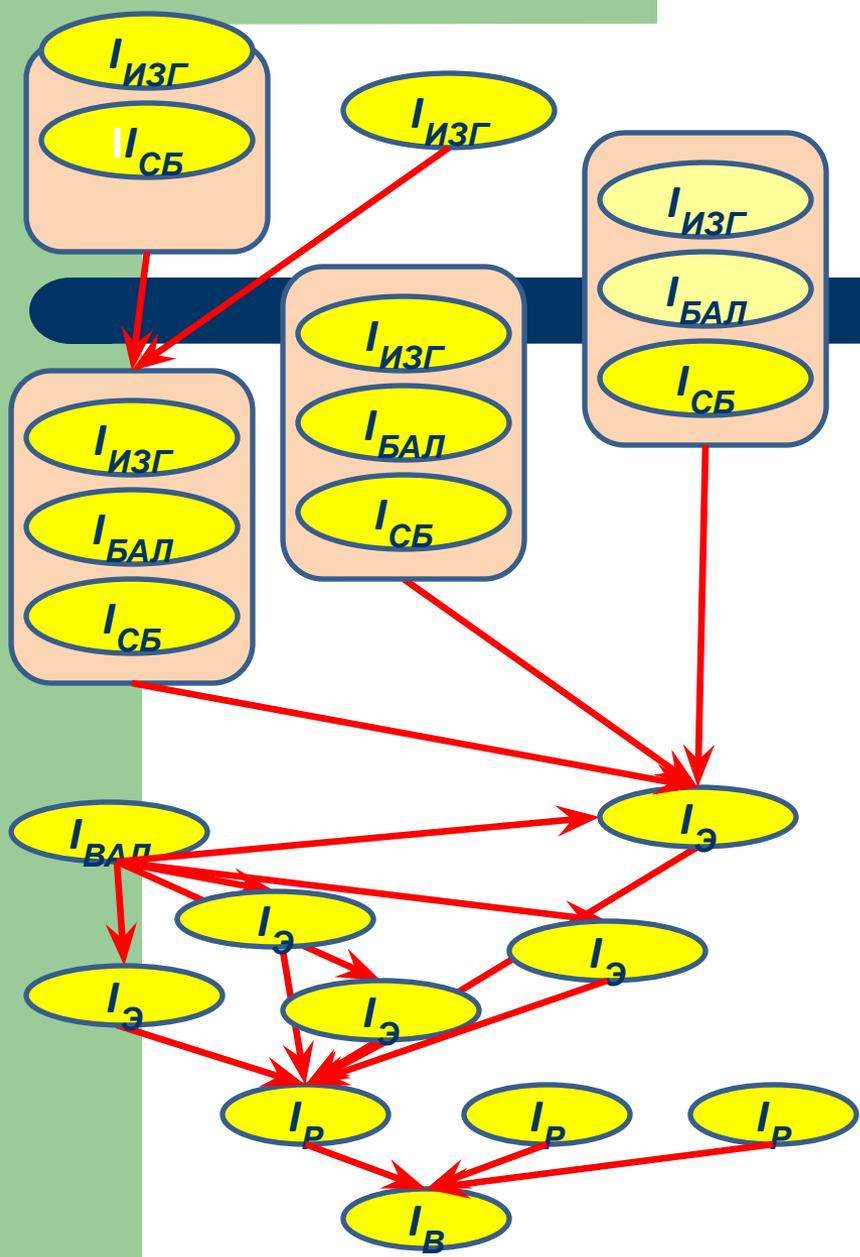
Результаты анализа спектра вибраций ротора

WinTOC



Имя	Fs	dX	Xтек	Утек	Инд.тек	Инд.Л	Инд.П	Унач - Хкон	Умин	Умакс	Длина
1 ФА3А_(16)_п	1.00	1.000000	-	-	-	0	6903	0.500 - 6903.773	-60.000	9445.005	7813

Структура образования дисбалансов валопровода



Объективные причины снижения динамической устойчивости роторов и валопроводов высокоскоростных газотурбинных агрегатов:

1. Неизбежность монтажных дисбалансов элементов валопровода при сборке агрегатов.
2. Невозможность совместных испытаний элементов валопроводов в ходе их сборки.
3. Невозможность сборки агрегата без привлечения специализированного переносимого балансировочного оборудования.
4. Невозможность эксплуатационной коррекции дисбалансов при существующих технологиях без остановки агрегатов и привлечения специализированных бригад
5. Высокие радиально-осевые нагрузки на гибкие элементы трансмиссий при существующих технологиях сборки и коррекции монтажных дисбалансов.
6. Чрезмерные радиальные нагрузки на задний подшипник газотурбинного двигателя.
7. Высокие радиальные нагрузки на магнитные подшипники компрессора (электростанции).
8. Сверхнормативные изгибные деформации ротора вследствие неуравновешенности участков вала.
9. Повышенный износ уплотнений машин из-за неуравновешенности валов.
10. Высокие изгибные деформации колес ротора с несимметричной нагрузкой.

Научно-методическая проблематика

- недостаточно изучены закономерности процесса балансировки роторов с элементами, эксцентрично установленными при сборке;
- недостаточно изучены закономерности влияния полученного в процессе серийной сборки роторов дисбаланса, оборотов, материалов, габаритных размеров, координат подшипников и др. на величину вибрации роторов;
- отсутствуют научно обоснованные модели и методики, позволяющие устанавливать основные закономерности, взаимосвязи между сборкой и балансировкой отдельных элементов и сборкой и балансировкой всего ротора и обеспечивающие минимизацию

Технологическая проблематика

- несоответствие балансировочных схем конструкциям отдельных узлов и деталей (элементов) ротора;
- погрешности сборки отдельных элементов ротора;
- несоответствие жесткости ротора центробежным силам, обусловленным его локальными дисбалансами;
- недостатки технологических процессов механической обработки и сборки: недостаточная точность изготовления отдельных элементов, входящих в ротор и примитивный характер сборки и балансировки,
- неоправданное превышение количества проводимых балансировочных работ.

Проектно-конструкторская проблематика

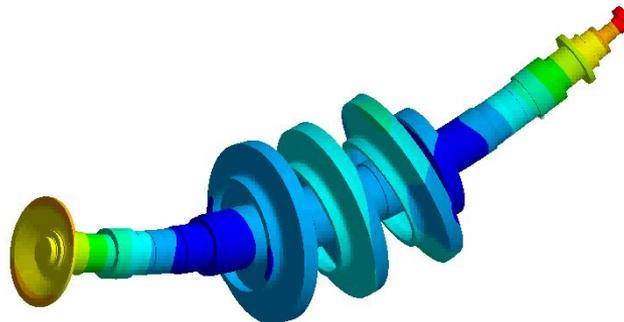
- несоответствие технических требований КД условиям эксплуатации валопровода;
- несоответствие заданных условий монтажа элементов валопроводов условиям эксплуатации;
- несоответствие используемых государственных стандартов конструкции роторов;
- отсутствие конструкторских методик прогнозирования и учета монтажных дисбалансов;
- отсутствие технологических рекомендаций в период проектирования и конструирования роторов;
- системные конструкторские ошибки в КД, обусловленные отсутствием у конструкторов знаний в области динамической устойчивости роторов.

Влияние локальных дисбалансов на динамическую устойчивость роторов при первой критической частоте

Максимальные деформации

Total Deformation 7
Type: Total Deformation
Frequency: 131.18 Hz
Unit: m
13.11.2010 15:40

0.1038 Max
0.092292
0.08079
0.069287
0.057785
0.046282
0.03478
0.023277
0.011775
0.0002723 Min



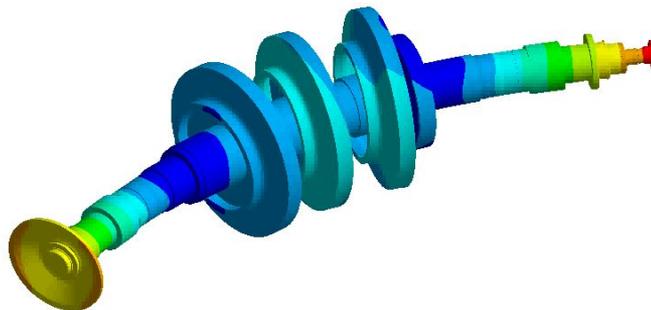
ANSYS



Минимальные деформации

Total Deformation 8
Type: Total Deformation
Frequency: 131.41 Hz
Unit: m
13.11.2010 15:41

0.10442 Max
0.092833
0.08125
0.069666
0.058083
0.0465
0.034917
0.023333
0.01175
0.00016696 Min



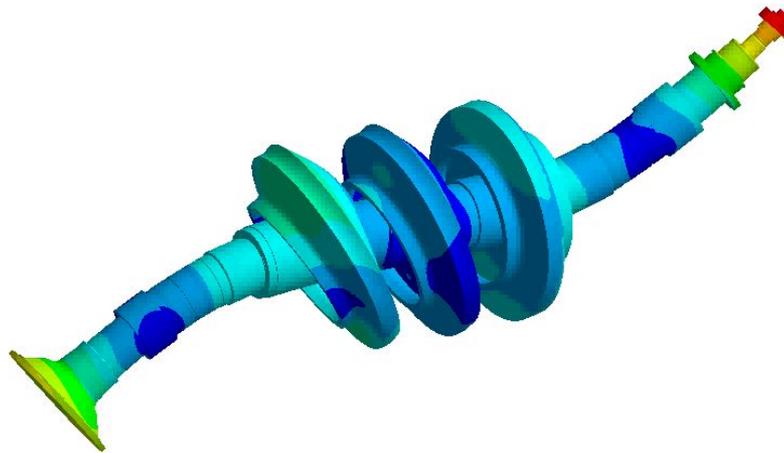
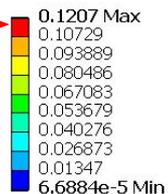
ANSYS



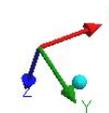
Влияние локальных дисбалансов на динамическую устойчивость роторов при второй критической частоте

Максимальные деформации

Total Deformation 18
Type: Total Deformation
Frequency: 275.74 Hz
Unit: m
13.11.2010 15:41

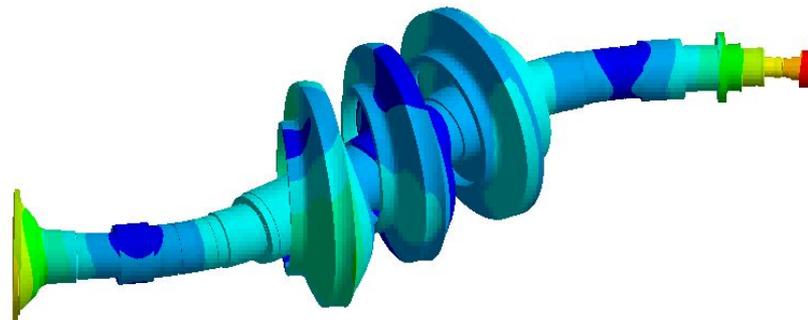
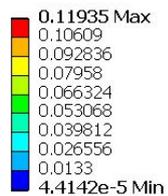


ANSYS

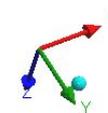


Минимальные деформации

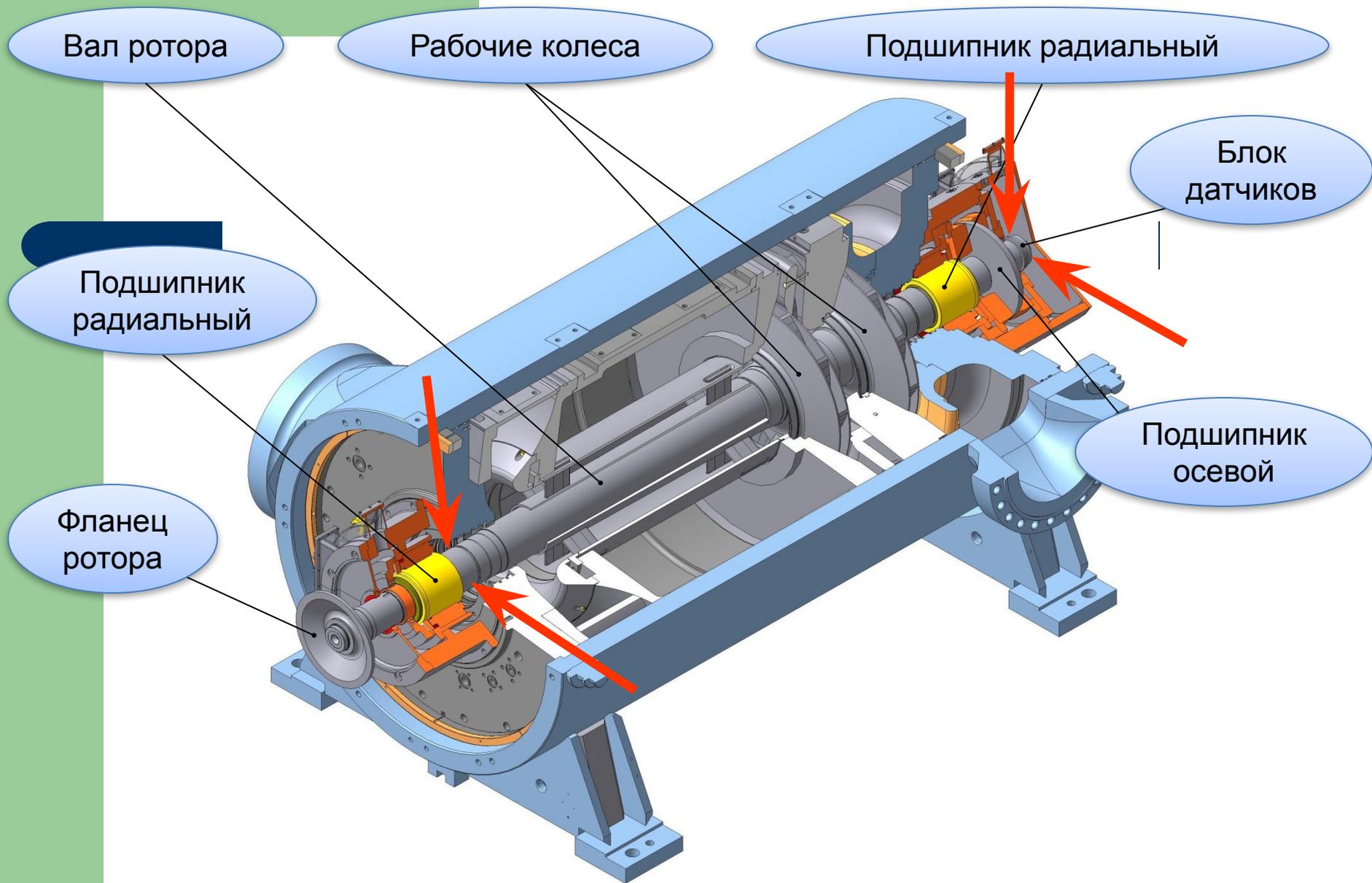
Total Deformation 19
Type: Total Deformation
Frequency: 276.67 Hz
Unit: m
13.11.2010 15:42



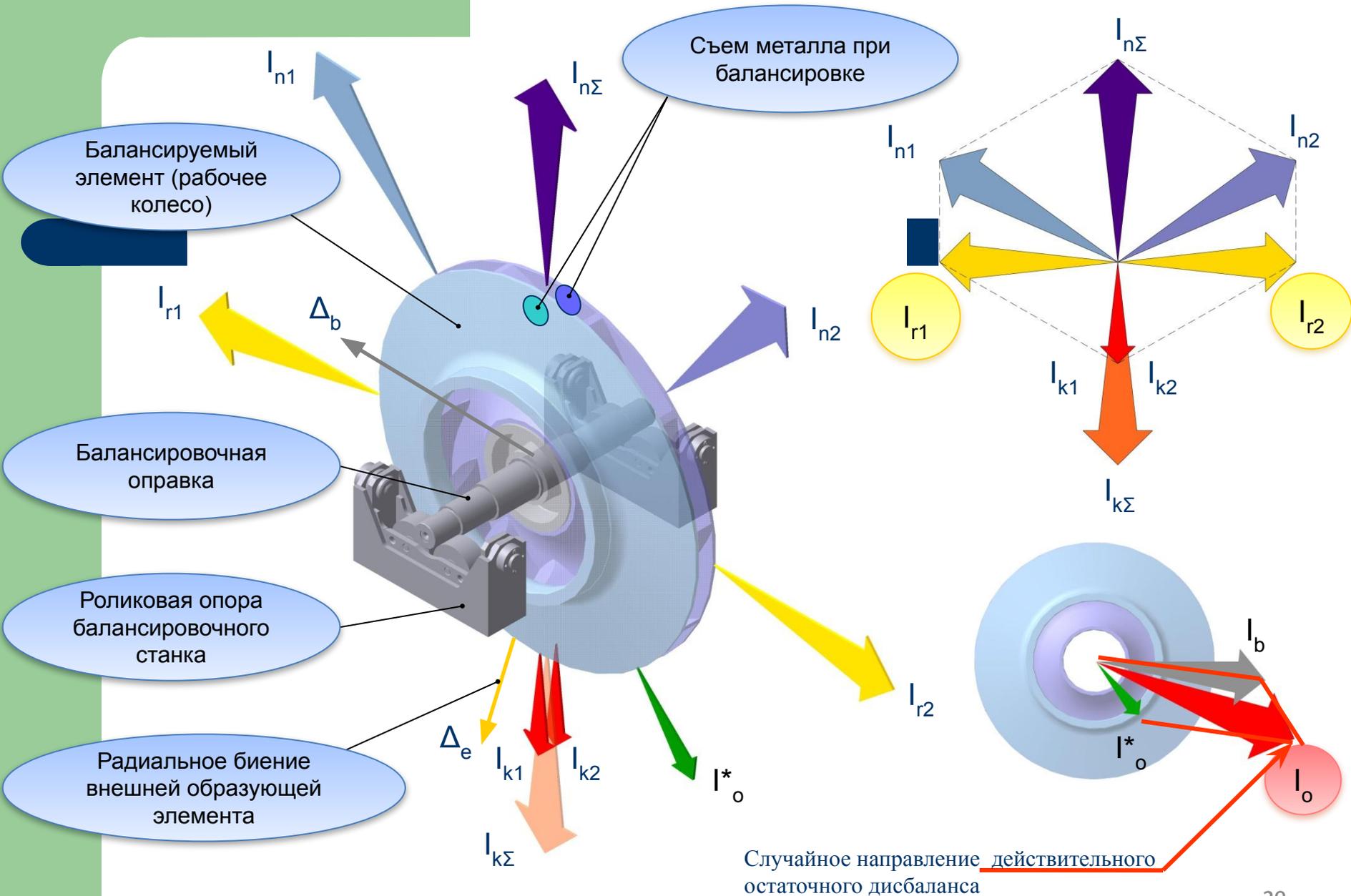
ANSYS



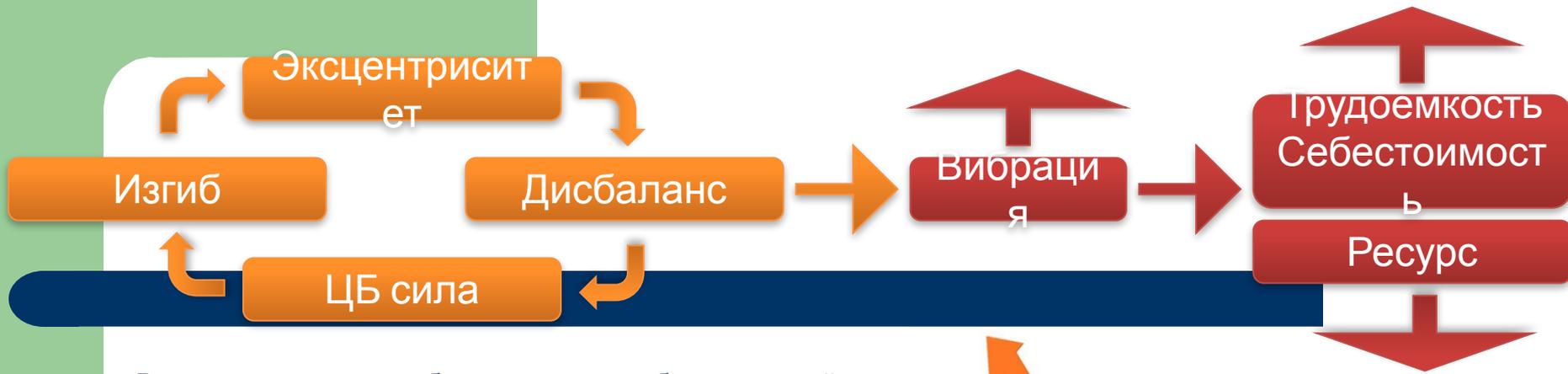
Ротор центробежного компрессора



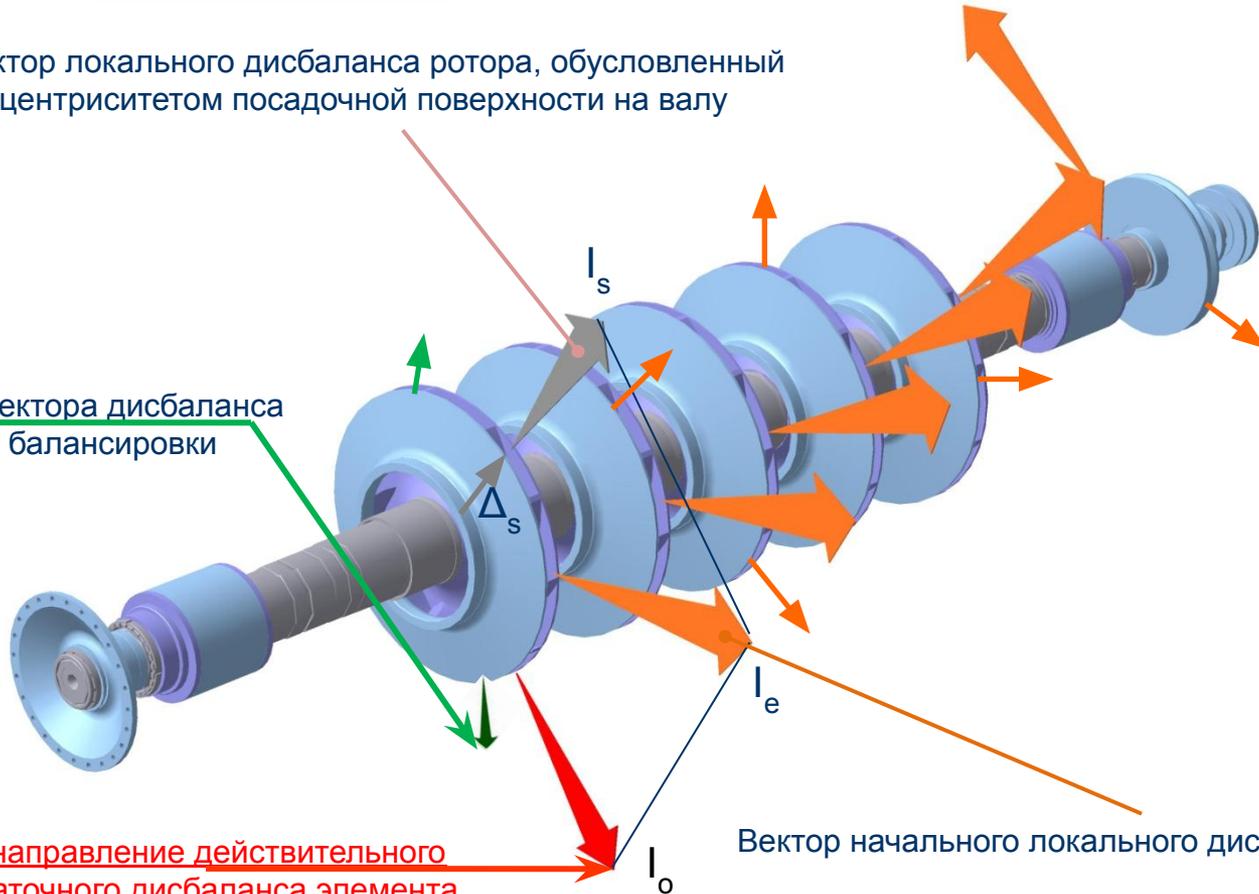
Подготовка элемента к сборке по типовому технологическому процессу



Ротор, собранный по типовому технологическому процессу



Вектор локального дисбаланса ротора, обусловленный эксцентриситетом посадочной поверхности на валу



Случайное направление действительного вектора остаточного дисбаланса элемента

Математическая постановка научной проблемы

Учитывая результаты проведенного анализа известных научно-методических разработок, применимых для исследования и обеспечения динамического состояния валопроводов, постановку общей научной проблемы можно сформулировать как совершенствование методологии обеспечения динамической устойчивости валопроводов турбоагрегатов и разработку эффективного алгоритма сборки (\mathcal{E}) валопроводов на основе минимизации локальных дисбалансов (I_i) при увеличении ресурса работы агрегата (T) и ограничении на стоимость (C) производства элементов и монтажа валопроводов:

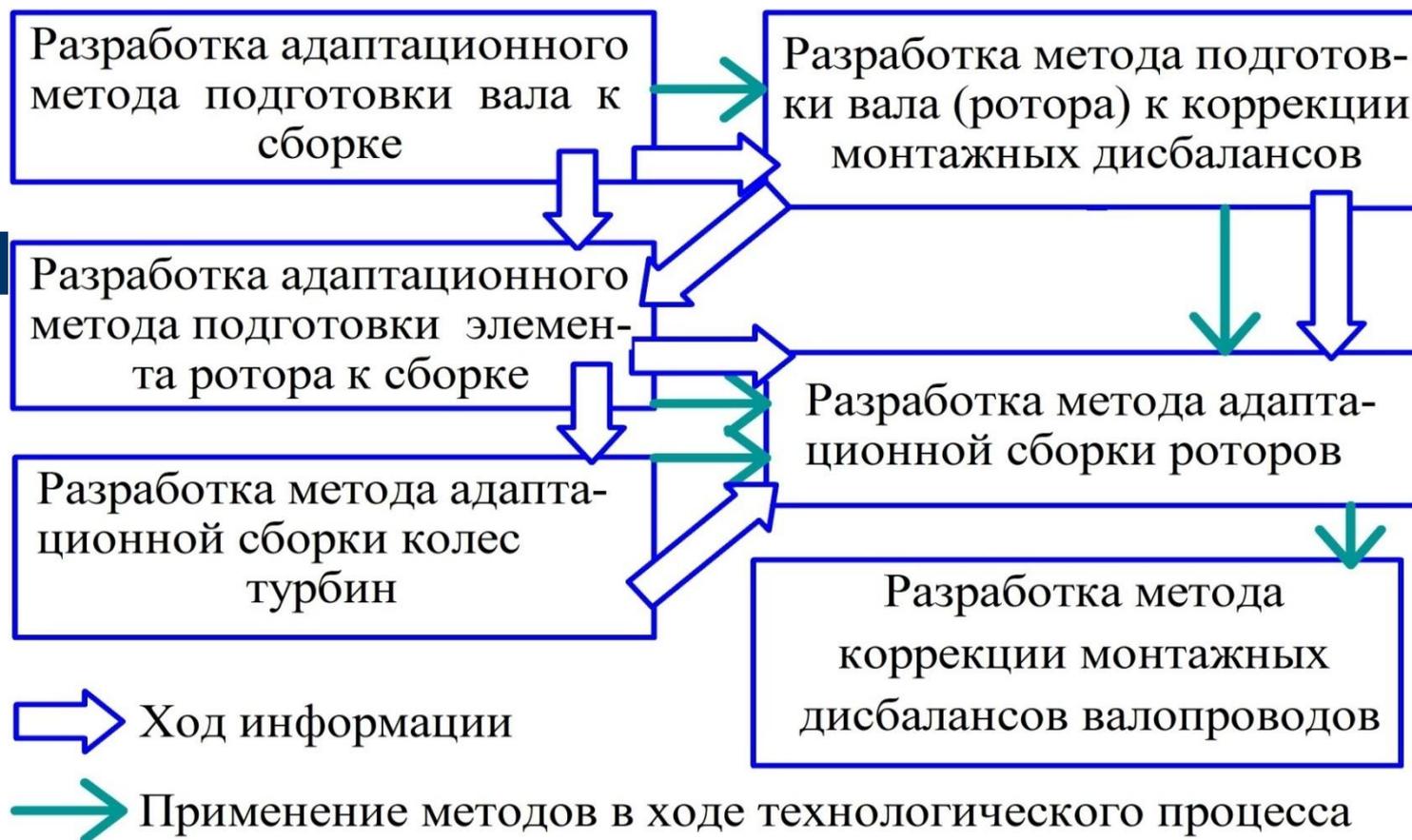
$$\mathcal{E} = f(\sum |I_i| \rightarrow \min), \quad \text{при } T > T_0, \quad C \leq C_0$$

Главный критерий оценки решения научной проблемы – минимизация локальных дисбалансов валопровода.

Гипотеза решения научной проблемы:

Заданный уровень динамической устойчивости валопровода турбоагрегата может быть обеспечен адаптацией его элементов к условиям эксплуатации в ходе технологических процессов сборки, что предусматривает прогнозирование, описание, минимизацию их локальных и коррекцию монтажных дисбалансов.

Блок-схема алгоритма декомпозиции научной проблемы и реализации гипотезы



Допущения:

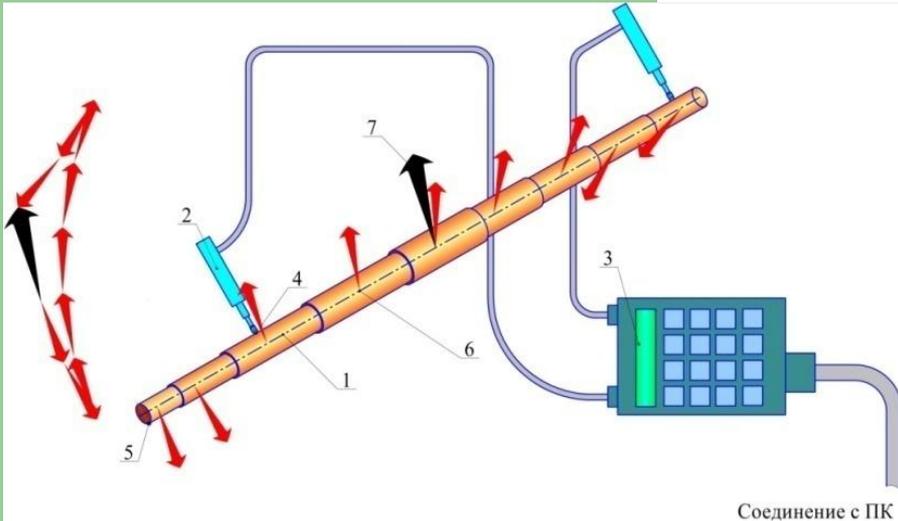
- валы вращаются относительно неподвижных осей, положение которых обеспечено параметрами опор,
- гибкие пластинчатые элементы, шлицы, болтовые соединения и др. крепежные элементы обеспечивают концентричность осей при всех допустимых перекосах, при всех углах поворота и рабочих частотах вращения,
- величины перекосов осей валов при монтаже и работе валопроводов постоянны.

Цель работы: создание научно-методического аппарата технологического обеспечения производства динамически устойчивых валопроводов, обеспечивающего заданный уровень ресурса работы агрегатов при снижении себестоимости.

Задачи исследования

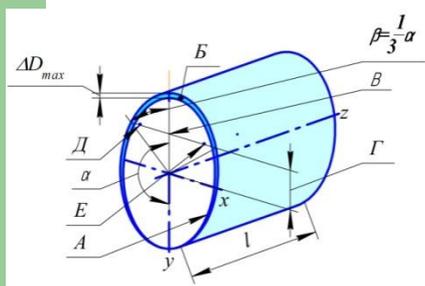
1. Установить основные закономерности и взаимосвязи между величинами **величинами** появляющихся при этом локальных дисбалансов ротора.
2. Разработать адаптирующие методы и алгоритмы технологических процессов подготовки к сборке валов и элементов роторов, обеспечивающие минимизацию локальных дисбалансов высокоскоростных гибких роторов и роторов с несовпадающими балансировочными и рабочими поверхностями.
3. Разработать адаптирующий метод и алгоритм технологического процесса сборки, обеспечивающего минимизацию прироста локальных дисбалансов ротора.
4. Разработать адаптирующий метод и алгоритм выполнения технологического процесса, обеспечивающие коррекцию монтажных дисбалансов валопровода при его сборке.
5. Провести сравнительное математическое моделирование динамического состояния роторов, собранных по типовому и адаптирующему технологическим процессам.
6. Провести сравнительные экспериментальные исследования качества сборки при типовом и адаптирующем технологическом процессе.
7. Разработать практические рекомендации и алгоритмы проектирования технологических процессов сборки на основе адаптационных методов.

Расчетно-объемный метод подготовки вала к сборке



Соединение с ПК

Схема расположения дисбалансов, обусловленных погрешностью изготовления вала: 1 – вал, 2 – датчики, 3 – блок растровой системы, 4 – место максимального эксцентриситета, 5 – нулевая отметка вала, 6 – локальные дисбалансы, 7 – суммарный дисбаланс вала



$$I = \frac{\pi}{8} \Delta D_i \cdot D_i^2 l \rho$$

$$m_k = \frac{\pi}{4} \Delta D_i \cdot D_i l_i \rho$$

Схема измерения эксцентриситета участка вала: А – граница части вала, не создающего дисбаланса, ΔD_{max} – место и величина максимального радиального биения, В, $\Gamma = D/4$ – место и величина эксцентриситета массы сегмента В, создающего дисбаланс, α, β, D, E – элементы дополнительных построений для определения эксцентриситета

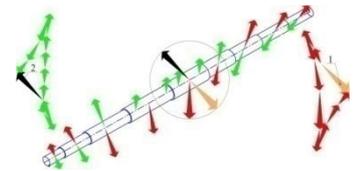


Схема предпочтительного размещения локальных дисбалансов



Программное обеспечение «ВАЛ»

Расчет: "31.07.2011 - Вал НЦ12С/56.0301-000 №3"

Файл Расчет

Исходные данные

Обозначение расчета: Вал НЦ12С/56.0301-000 №3

Дата: 31.07.2011 Время: 22:04:26

Количество плоскостей: 12 Обновить

i	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
dD_i											

Изменить данные

Расчет

Создание нового расчета

Введите пароль

Войти в систему

Результаты расчетов

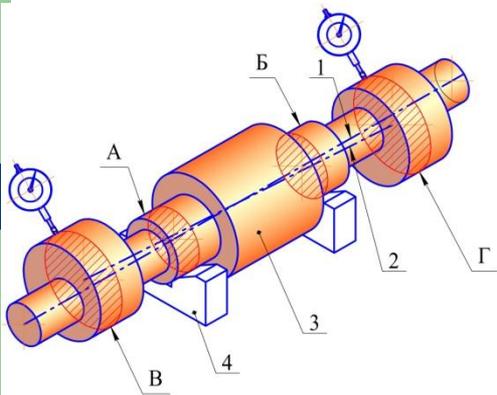
i	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
I_i											
m_yi											
m_ki											

Сохранить Печать

измерения вибрации проводились с использованием комплекта

новый метод подготовки к сборке валов и роторов

Применение метода обеспечивает уравнивание валов и роторов с несовпадающими рабочими и балансировочными поверхностями, позволяющую минимизировать величины монтажных дисбалансов, обусловленных взаимным эксцентриситетом рабочей и балансировочной осей валов и роторов.



$$e_i = \frac{\Delta D_i}{2}, \quad \begin{aligned} x_i &= e_i \cdot \cos \alpha_i \\ y_i &= e_i \cdot \sin \alpha_i \end{aligned}$$

$$X_i = \frac{z_i - z_1}{z_4 - z_1} \cdot (x_4 - x_1) + x_1$$

$$Y_i = \frac{z_i - z_1}{z_4 - z_1} \cdot (y_4 - y_1) + y_1$$

$$m_u = \frac{2M_i \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}}{D_m}$$

$$\varphi_i = 180^\circ + \operatorname{arctg} \frac{Y_i}{X_i}$$

Схема измерения радиальных биений поверхностей вала: 1,2 – балансировочная и рабочая оси, 3 - вал, 4 – измерительная опора (призма), А, Б – балансировочные, В, Г – рабочие поверхности

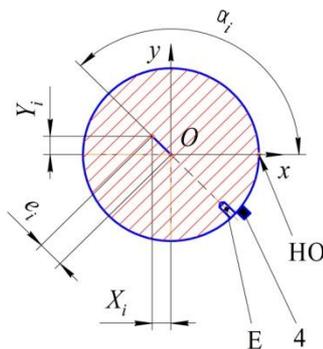
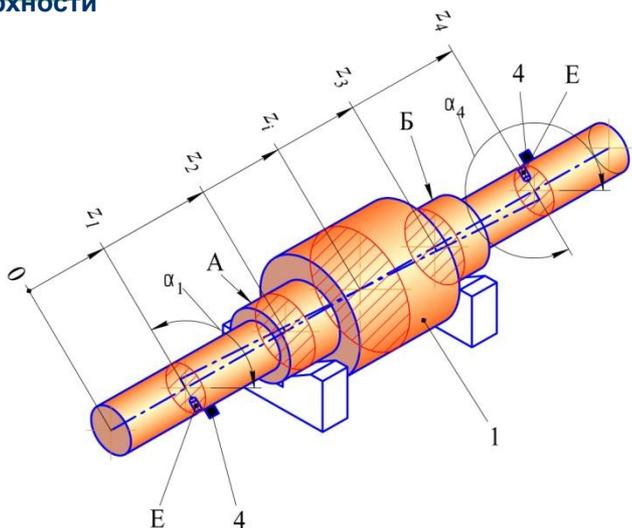


Схема определения исходных данных для расчетов

Программное обеспечение «МАГНИТ»

Расчет : "31.07.2011 - "

Файл Расчет

Исходные данные

Обозначение расчета

Дата 31.07.2011 Время 21:57:24

Количество плоскостей 12

i	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
z_i											

i	1	2	3	4
x				
y				
z				

i	12	11	10	9	8	7	6
M_i							
D_i							

Результаты расчетов

i	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
X_i											
Y_i											
m_i											
f_i											

Прецизионный метод подготовки элемента ротора по заранее заданным параметрам дисбаланса

Метод предназначен для обеспечения установки элемента на вал с минимизированным эксцентриситетом внешней образующей и без монтажного дисбаланса, заключается в коррекции дисбаланса, обусловленного погрешностью установки элемента на оправку, диаметрально противоположной установкой эксцентриситета внешней образующей относительно эксцентриситета посадочной поверхности на валу и обеспечением заранее заданной величины дисбаланса со стороны эксцентриситета внешней образующей.

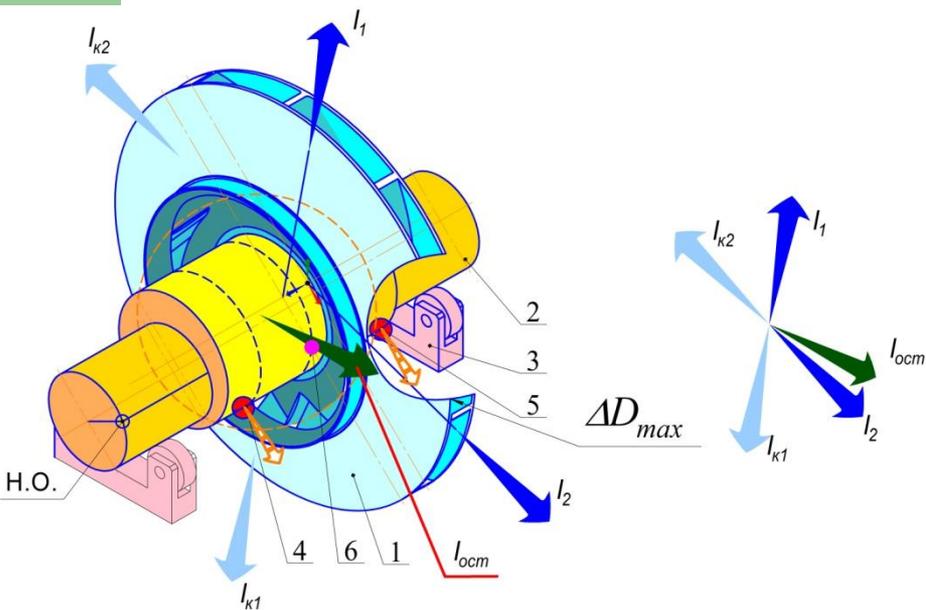


Схема подготовки элемента ротора к сборке. 1 – элемент, 2 – оправка, 3 – опора балансировочного станка, 4, 5 – уравновешивающие грузики, 6 – имитирующий грузик

Заданный вектор остаточного дисбаланса элемента сонаправлен с радиальным биением внешней образующей



$$m_u = \frac{\Delta D_a \cdot M_i}{D + h}$$

$$m_y = \frac{\Delta D_{onp} \cdot M_i}{2(D + h)}$$

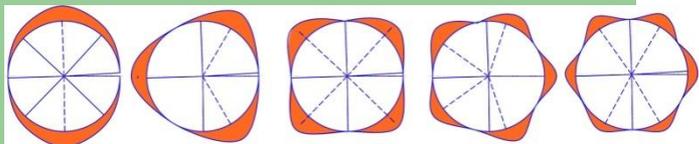
Программное обеспечение «ЭЛЕМЕНТ»

The screenshot shows the main window of the 'ЭЛЕМЕНТ' software with a 'Создание нового расчета' (Create new calculation) dialog box open. The dialog box contains a password input field and a 'Войти в систему' (Log in) button. The background window has a menu bar with 'Файл' and 'Расчет'. The main area is divided into 'Исходные данные' (Initial data) and 'Результаты расчетов' (Calculation results). The 'Исходные данные' section includes fields for 'Обозначение расчета' (Calculation designation), 'Дата' (Date), and various parameters: I , $\Delta D_{\text{опр}}$, $\Delta D_{\text{вал}}$, D_p , M_z , D , and h . There are buttons for 'Изменить данные' (Change data) and 'Расчет' (Calculate). The 'Результаты расчетов' section has fields for m_y , m_u , and m_k . At the bottom, there are buttons for 'Сохранить' (Save), 'Печать' (Print), and 'Выход' (Exit).

Возможности программного обеспечения:

№ п/п	Наименование характеристики	Численное значение
	Количество плоскостей коррекции	2
	Нормативное количество измерений	2
	Координаты установки имитационного груза	По углу поворота, α
	Координаты установки уравнивающих грузов в плоскостях коррекции	Симметрично, по углу поворота, α
	Способ коррекции	Съемом металла
	Остаточный дисбаланс по двум плоскостям измерений, г·мм	≤ 150

Метод эксцентриситетно-виртуальной сборки колес турбин



Метод предназначен для уравнивания ротора с заранее известным дисбалансом и заключается в установке комплекта лопаток с дисбалансом, противоположным известному по направлению и равным ему по величине.

Варианты n-лучевых схем укладки лопаток

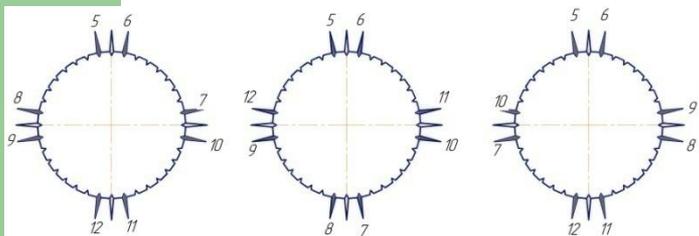
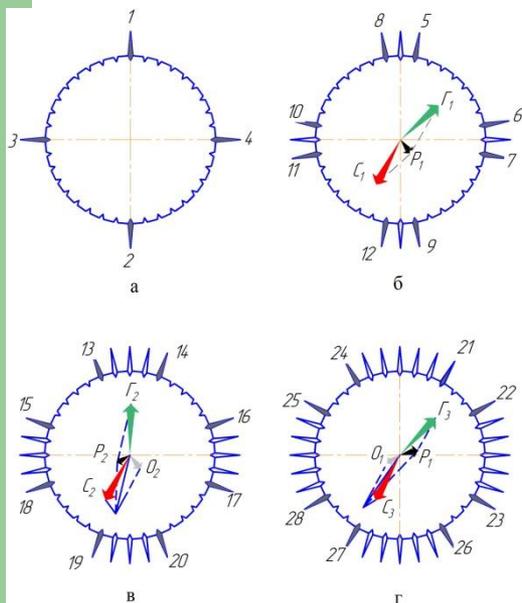


Схема раскладки лопаток для управляемой сборки при необходимости получения: а – максимального локального дисбаланса, б – минимального локального дисбаланса, в – дисбаланса средней величины.



Выбор n-лучевой схемы сборки

Определение ИД для сборки:
 $I_{осд}, I_p, e_{окр} (I_{окр})$

Постановка задачи сборки: $I_{ркт}$
 $(\bar{I}_{кл} + \bar{I}_p + \bar{I}_{окр}) \rightarrow 0$

Введение всех ИД

Определение $I_{всд}$:
$$\bar{I}_{всд} = \frac{\bar{I}_p + \bar{I}_{окр}}{k}$$

$$\begin{cases} I_x = \left(k I_{всд} \cos \alpha_{всд} + \sum_{i=1}^m I_i \cdot \cos \alpha_i \right) \\ I_y = \left(k I_{всд} \sin \alpha_{всд} + \sum_{i=1}^m I_i \cdot \sin \alpha_i \right) \\ I_{км} = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \\ \alpha_{км} = \arctg \frac{I_x}{I_y} \end{cases}$$

Эксцентриситетно-виртуальное моделирование

Сборка колеса (установка лопаток)

Измерение $I_{ркт}$ на балансировочном станке

Рекомендуемая последовательность раскладки лопаток:
а – укладка марок, б, в, г – укладка первой, второй, третьей групп

Метод расчетно-эксцентриситетной сборки роторов

Метод предназначен для обеспечения уравновешенности ротора при сборке и заключается в соединении заранее подготовленных элементов при взаимном уравновешивании локальных дисбалансов.

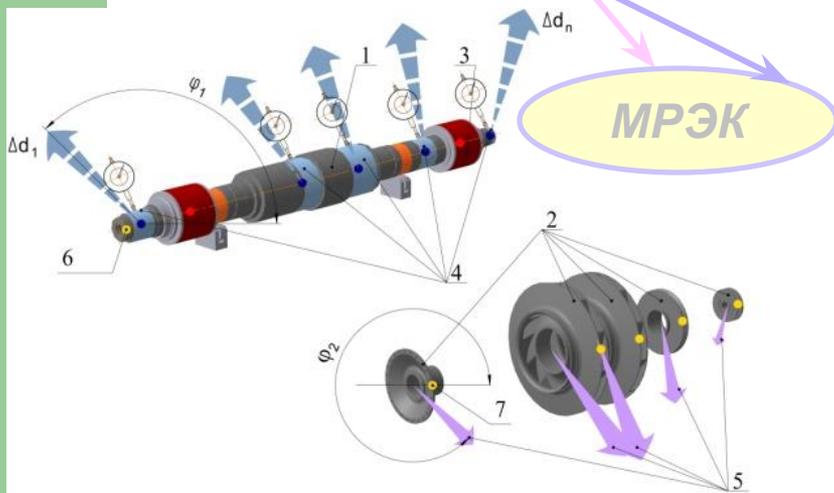
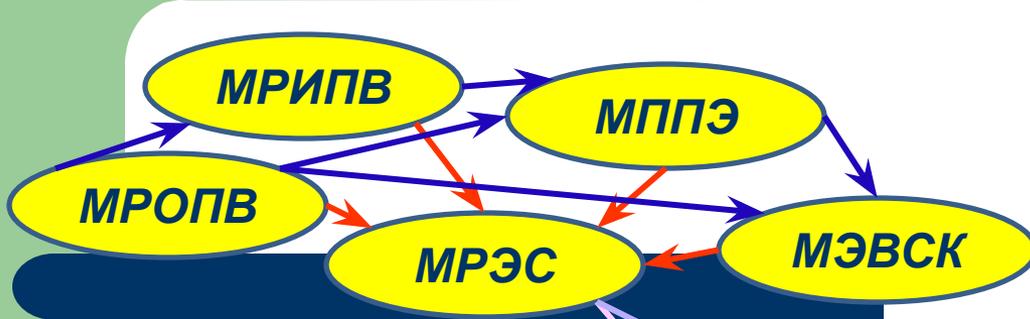
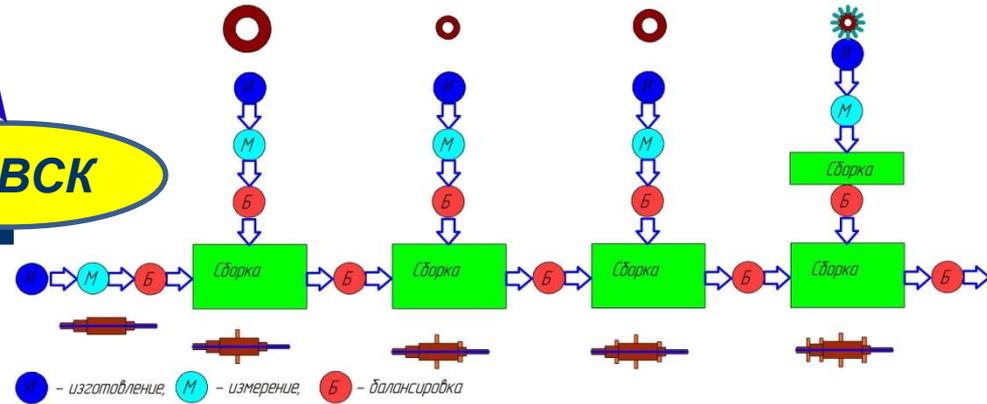


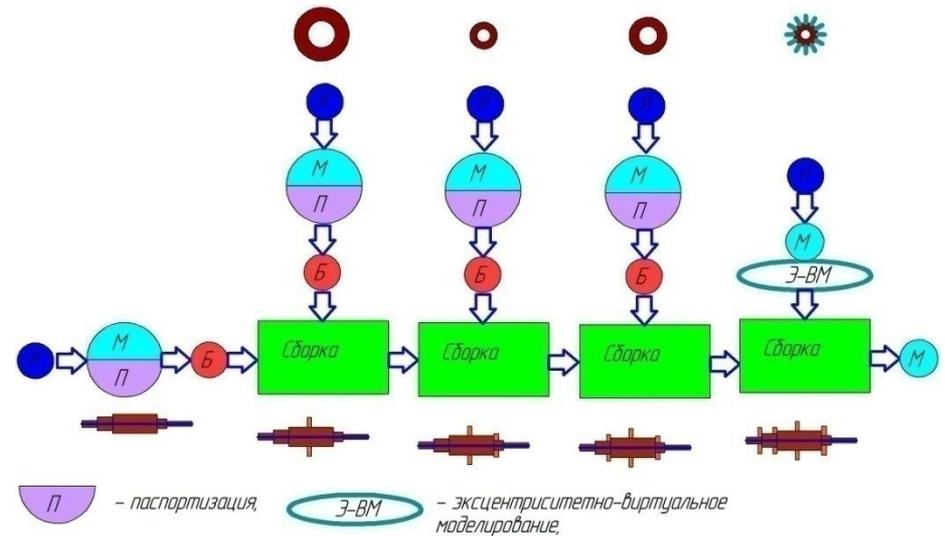
Схема сборки ротора с учетом эксцентриситетов посадочных поверхностей и дисбалансов элементов: 1 – вал, 2 – устанавливаемые элементы ротора, 3 – рабочие поверхности, 4 – посадочные поверхности ротора, 5 – обеспеченные начальные дисбалансы элементов ротора, 6, 7 – нулевые отметки вала и элементов ротора, Δd_1 – направления максимального радиального биения участков вала, φ_1 – направление эксцентриситета (радиального биения) посадочной поверхности, φ_2 – направление обеспеченного дисбаланса.

→ передача информации

→ последовательность реализации методов.



Блок-схема типового технологического процесса сборки ротора



Блок-схема адапционного технологического процесса сборки ротора

Программное обеспечение «СБОРКА»

Расчет: "28.09.2011 - "

Файл Расчет

Исходные данные

Обозначение расчета

Дата 28.09.2011 Время 10:08:21

Количество плоскостей 12 Обновить

i	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
I _i												
f _i												
z _i												

Расчет

Результаты расчетов

J 0 φ 0

Сохранить Печать Выход

Возможности программного обеспечения:

№ п/п	Наименование характеристики	Численное значение
	Максимальное количество плоскостей локальных дисбалансов	12
	Нормативное количество расчетов	2
	Установка элементов	По заданным параметрам эксцентриситетов
	Остаточный дисбаланс в каждой плоскости коррекции, г·мм	≤150

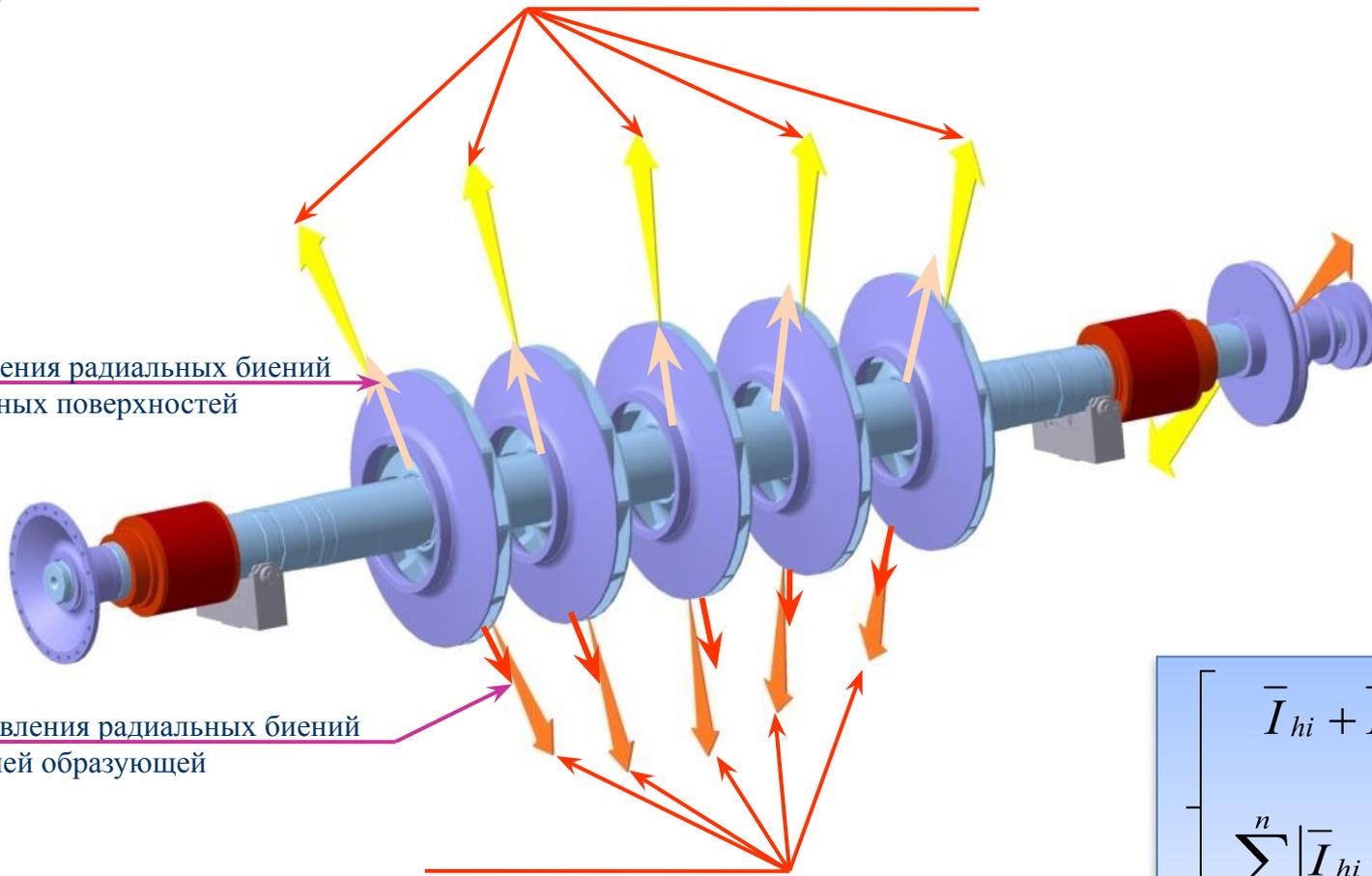
Схема предпочтительного распределения дисбалансов при сборке ротора

Векторы локальных монтажных дисбалансов, обусловленных эксцентриситетами посадочных поверхностей

Направления радиальных биений посадочных поверхностей

Направления радиальных биений внешней образующей

Векторы заданных дисбалансов элементов



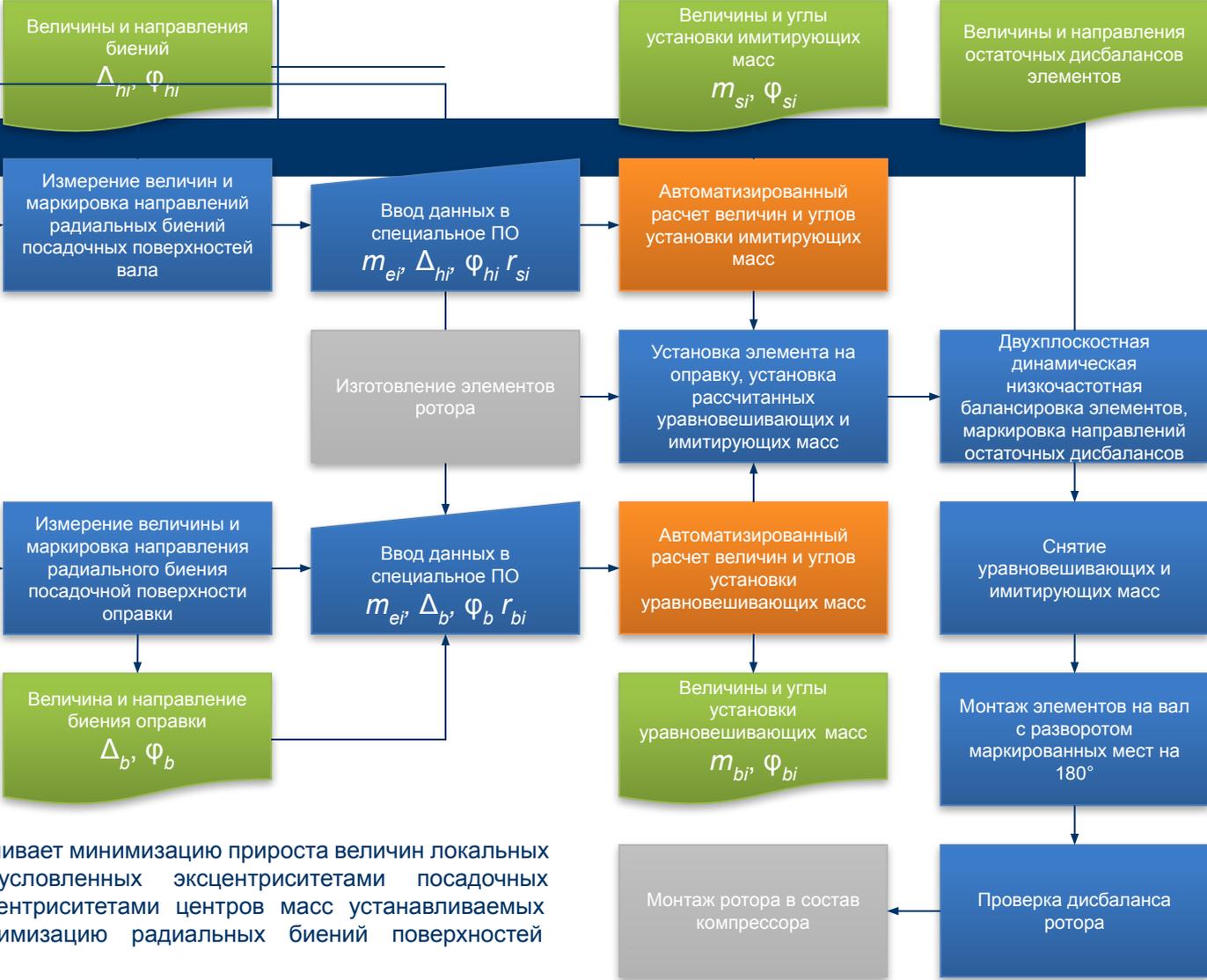
$$\begin{cases} \bar{I}_{hi} + \bar{I}_{oi} \rightarrow 0 \\ \sum_{i=1}^n |\bar{I}_{hi} + \bar{I}_{oi}| \rightarrow 0 \end{cases}$$

условие обеспечения динамической устойчивости ротора на этапе сборки

Алгоритм адаптационного технологического процесса сборки

Исходные данные (формируются на стадии проектных работ)

- 1) масса элементов m_{ei}
- 2) радиусы установки уравнивающих масс r_{bi}
- 3) радиусы установки имитирующих масс r_{si}



Применение метода обеспечивает минимизацию прироста величин локальных дисбалансов ротора, обусловленных эксцентриситетами посадочных поверхностей вала и эксцентриситетами центров масс устанавливаемых элементов, а также минимизацию радиальных биений поверхностей собранного ротора

Метод расчетно-эксцентриситетной коррекции монтажных дисбалансов

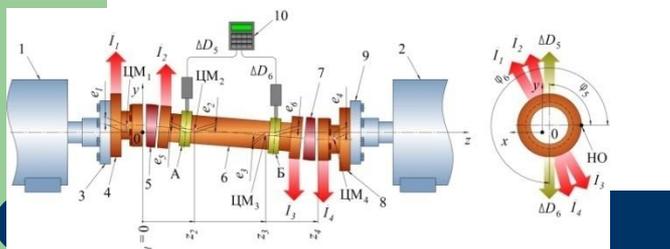


Схема измерения радиальных биений контрольных поверхностей

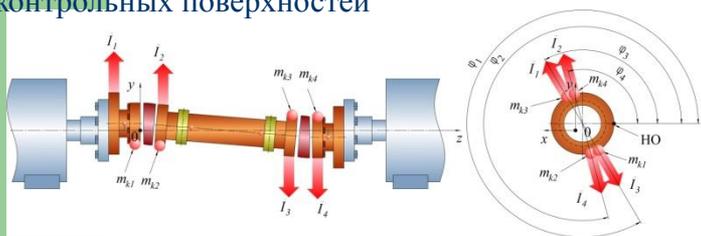


Схема коррекции монтажных дисбалансов

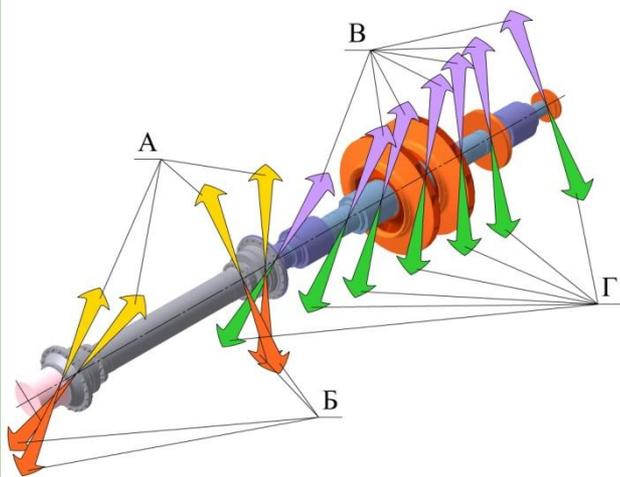


Схема предпочтительного размещения заданных и монтажных дисбалансов

$$e_i = \sqrt{\left(\frac{z_i - z_5}{z_6 - z_5} \cdot (x_6 - x_5) + x_5\right)^2 + \left(\frac{z_i - z_5}{z_6 - z_5} \cdot (y_6 - y_5) + y_5\right)^2}$$

$$m_{ci} = I_i / \sqrt{\left(\frac{z_i - z_5}{z_6 - z_5} \cdot \left(-\frac{\Delta D_6}{2} \cos \varphi_6 - \frac{\Delta D_5}{2} \cos \varphi_5\right) + \frac{\Delta D_5}{2} \cos \varphi_5\right)^2 + \left(\frac{z_i - z_5}{z_6 - z_5} \cdot \left(-\frac{\Delta D_6}{2} \sin \varphi_6 - \frac{\Delta D_5}{2} \sin \varphi_5\right) + \frac{\Delta D_5}{2} \sin \varphi_5\right)^2}$$

$$\varphi_i = 180^\circ + \arctg \frac{\frac{z_i - z_5}{z_6 - z_5} \cdot \left(\frac{\Delta D_6}{2} \sin \varphi_6 - \frac{\Delta D_5}{2} \sin \varphi_5\right) + \frac{\Delta D_5}{2} \sin \varphi_5}{\frac{z_i - z_5}{z_6 - z_5} \cdot \left(\frac{\Delta D_6}{2} \cos \varphi_6 - \frac{\Delta D_5}{2} \cos \varphi_5\right) + \frac{\Delta D_5}{2} \cos \varphi_5}$$

Монтаж трансмиссии

Измерение радиальных биений контрольных поясков

Расчет масс корректирующих грузов

Расчет углов установки корректирующих грузов

 Установка корректирующих грузов

Контроль качества коррекции по уровню вибрации

Программное обеспечение «ПЕРЕКОС»

Расчет: "31.07.2011 - Перекос ТКМ-16 №1"

Исходные данные

Обозначение расчета: Перекос ТКМ-16 №1

Дата: 31.07.2011 Время: 21:58:48

Количество плоскостей: 4 Обновить

ϕ_5 ϕ_6 ΔD_5 0 ΔD_6 0

i	4	3	2	1
z_i				
M_i				

z_5 0 z_6 0

Изменить данные

Расчет

Результаты расчетов

i	4	3	2	1
e_i				
I_i				
m_ki				
f_i				

Создание нового расчета

Введите пароль

Войти в систему

Сохранить Печать

Возможности программного обеспечения:

№ п/п	Наименование характеристики	Численное значение
	Максимальное количество плоскостей коррекции	4
	Нормативное количество измерений	2
	Способ коррекции	Установкой грузов
	Координата установки уравнивающих грузов в плоскостях коррекции	По углу поворота в подготовленные отверстия
	Остаточный дисбаланс по двум плоскостям измерений, г·мм	≤ 150

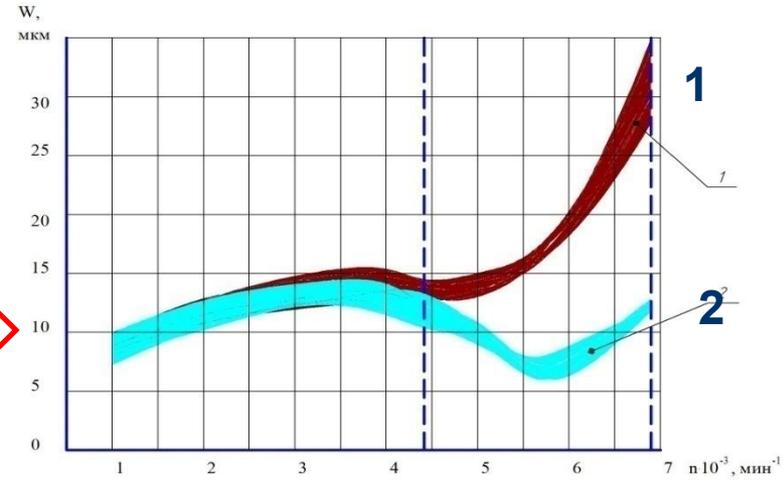
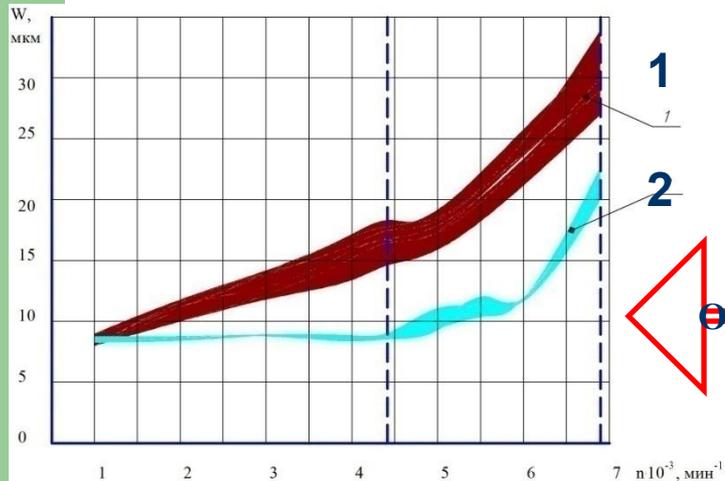
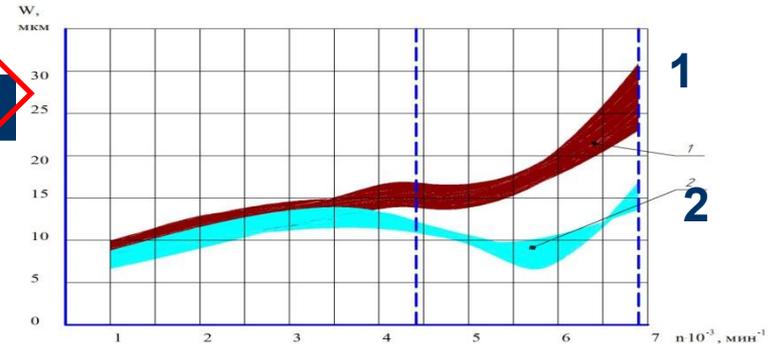
Результаты применения метода коррекции монтажных дисбалансов

Сравнение полей вибраций опор ротора при перекосе валов от 0 до 3 мрад при установке трансмиссий: **1 – 84-11-824, 2 – ТКМ-16**

Передняя опора ротора

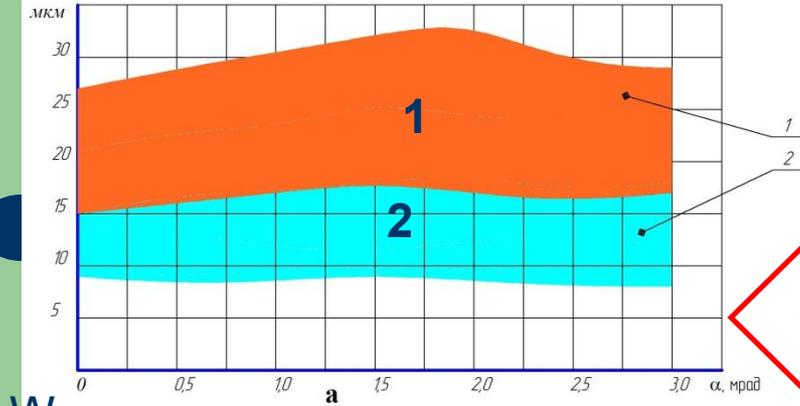


Задняя опора ротора

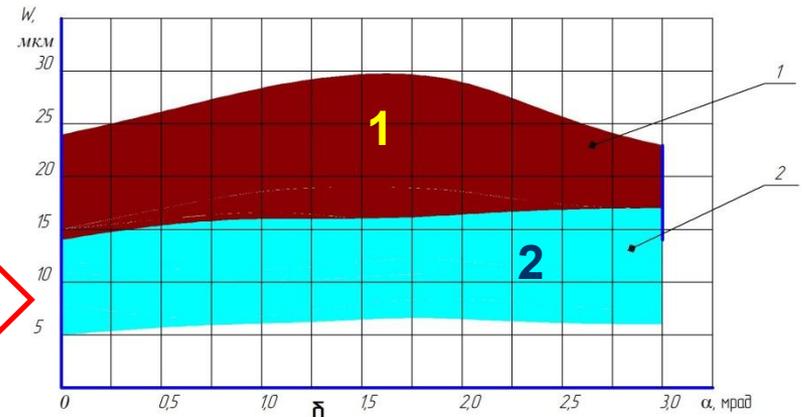
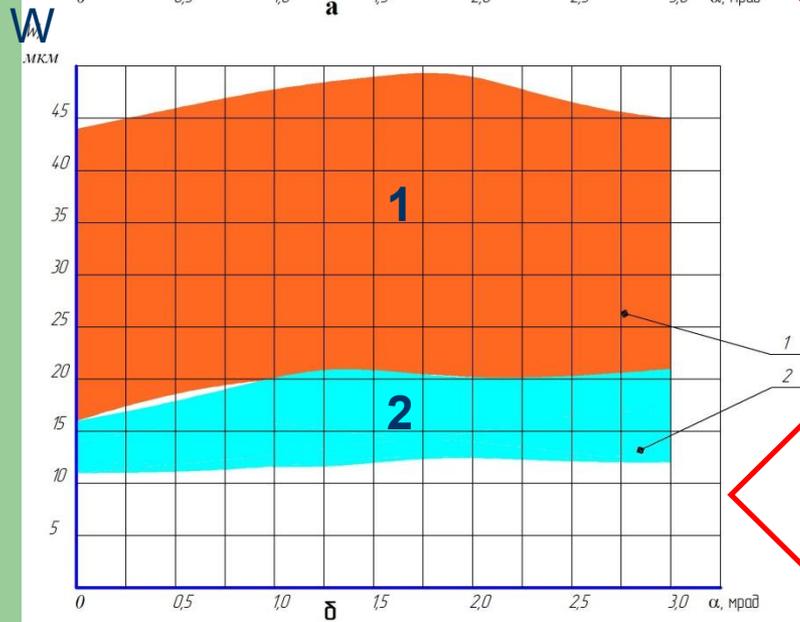
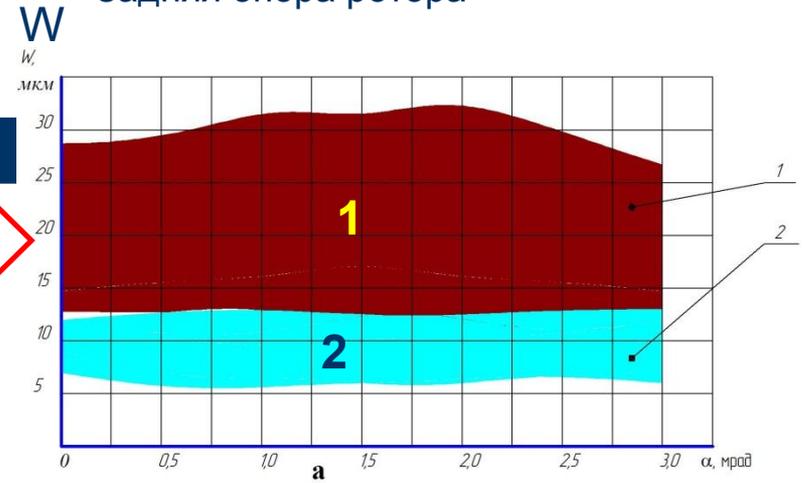


Сравнение полей вибраций опор ротора при $n = 4550 - 6825$ об/мин с перекосом валов от 0 до 3 мрад

Передняя опора ротора

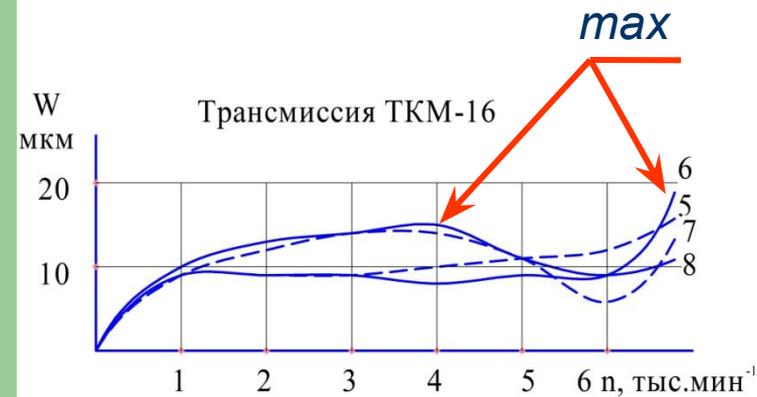
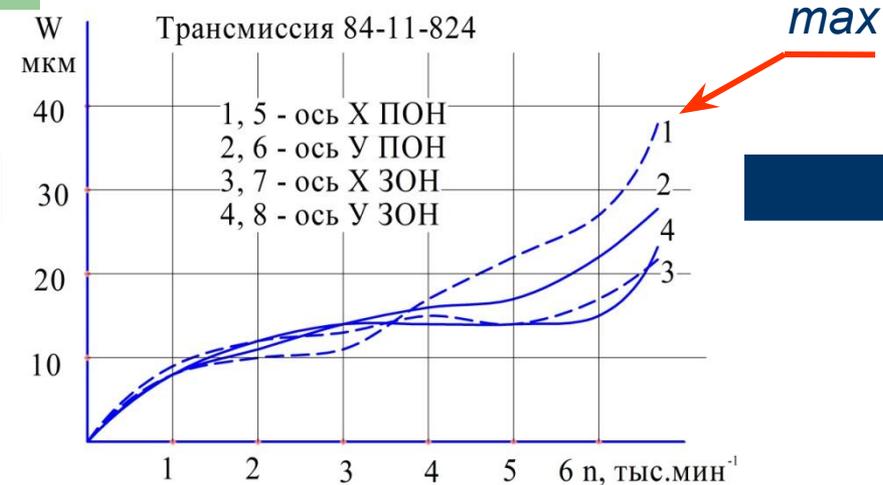


Задняя опора ротора

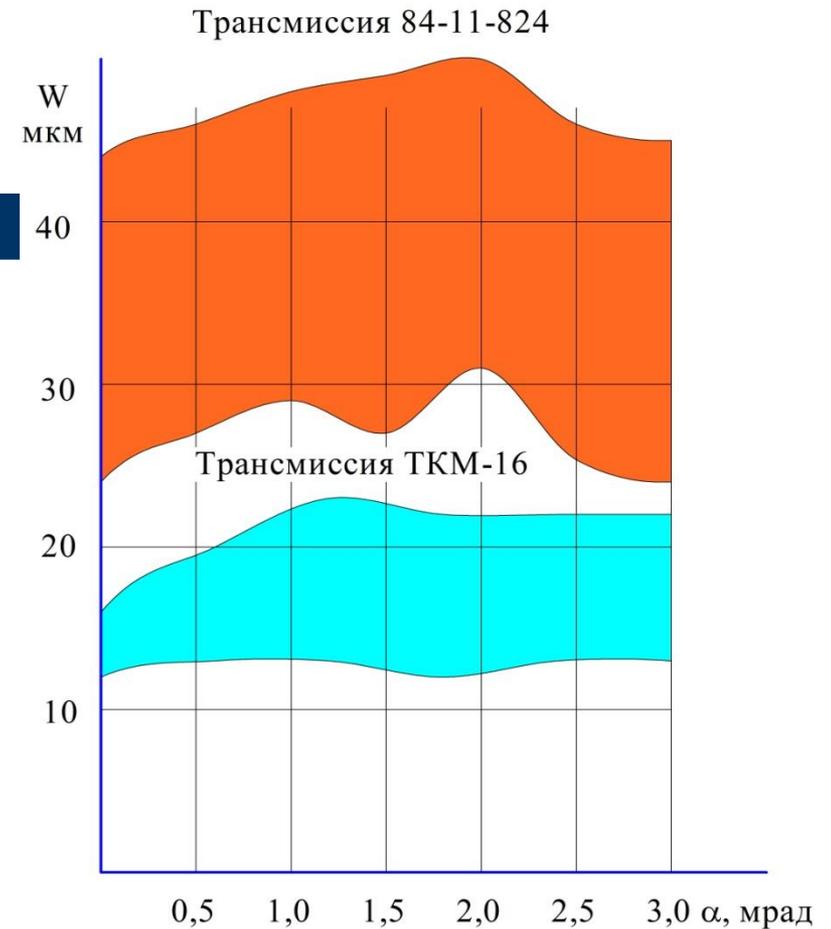


При установке трансмиссий: 1 – 84-11-824, 2 – ТКМ-16

Сравнение уровней виброперемещений опор ротора при использовании ТТП и АТП



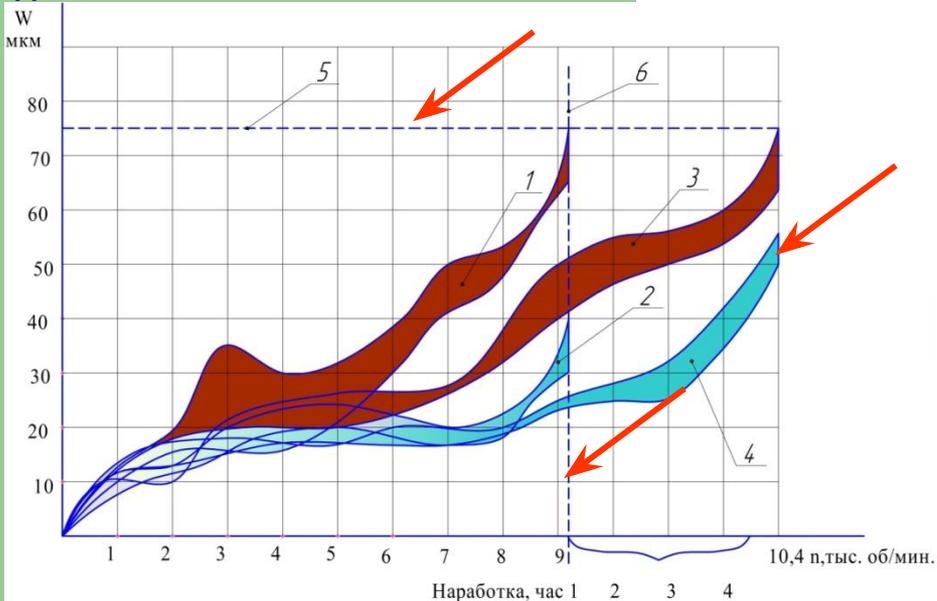
Без перекоса валов при $n = 0 - 6825$ об/мин



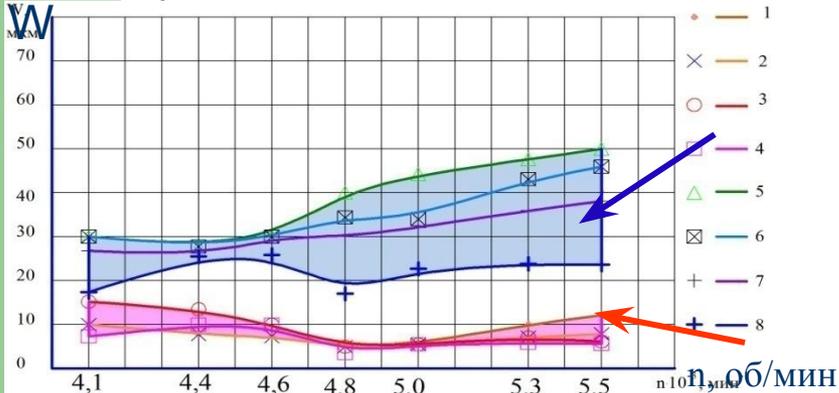
При перекосе валов от 0 до 3 мрад и $n = 6825$ об/мин

Эффективность снижения уровней виброперемещений опор роторов при использовании АТП

W



Сравнение результатов измерения виброперемещений (W) ротора в зависимости от частоты его вращения (n) с использованием ТПП и применения предложенной методики монтажа и коррекции монтажных дисбалансов; 1, 2 – поля вибраций в вертикальной и горизонтальной плоскостях ротора, смонтированного по ТПП; 3, 4 – поля вибраций после проведенной коррекции, 5 – аварийный уровень вибраций, 6 – частота аварийного останова



Результаты коррекции монтажных дисбалансов валопровода агрегата: 1, 2 – оборотная составляющая вибраций по осям Y, X передней опоры, 3, 4 – то же задней опоры; 5, 6 – общий уровень вибраций по осям Y, X передней опоры, 7, 8 – то же задней опоры

W

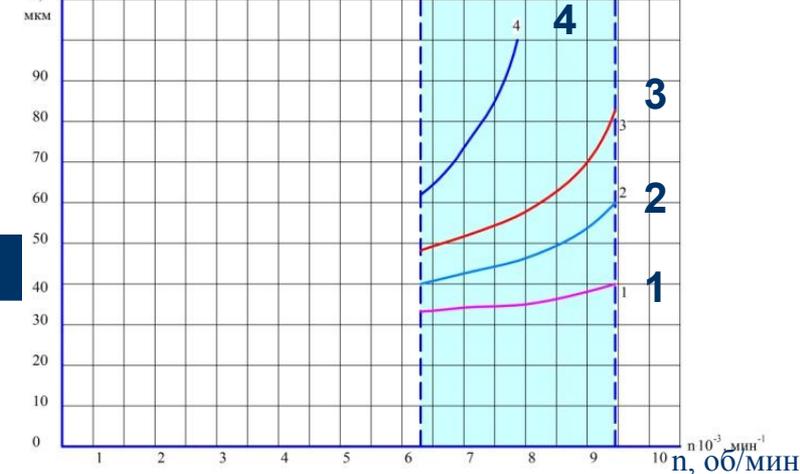


График зависимости виброперемещений от частоты вращения при моделировании монтажных дисбалансов:

1 – 340 г·мм, 2 – 680 г·мм, 3 – 1020 г·мм, 4 – 1700 г·мм

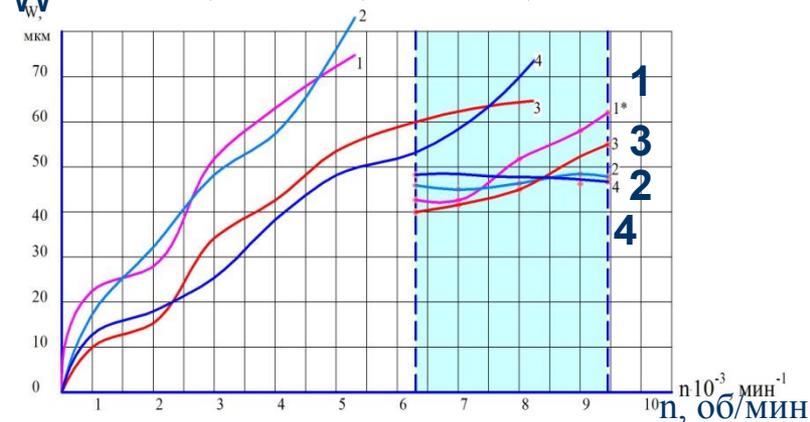
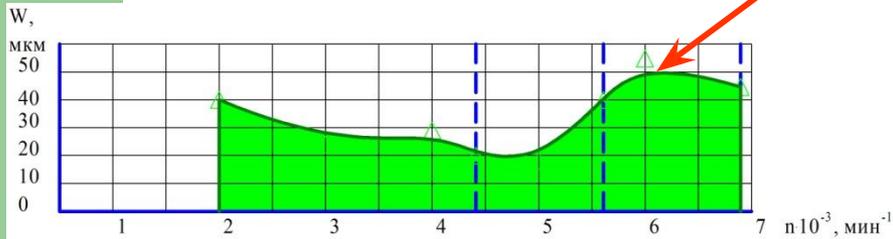
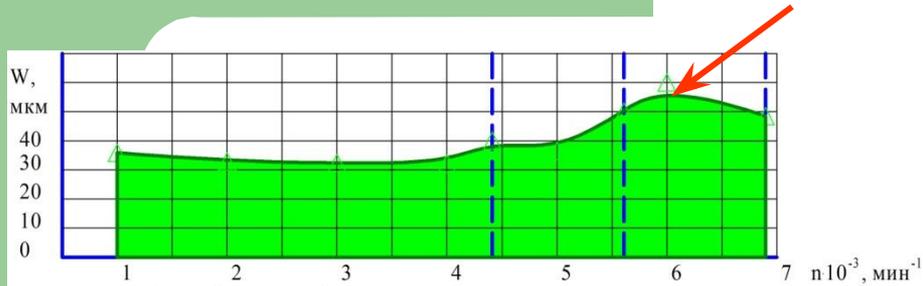
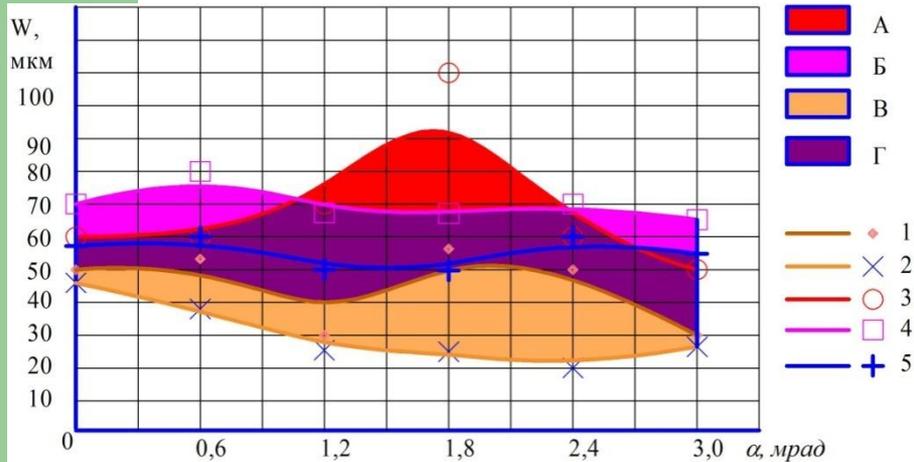


График зависимости виброперемещений от частоты вращения после коррекции монтажных дисбалансов с применением адапционных методов: 1, 3 – передняя опора, 2, 4 – задняя опора компрессора

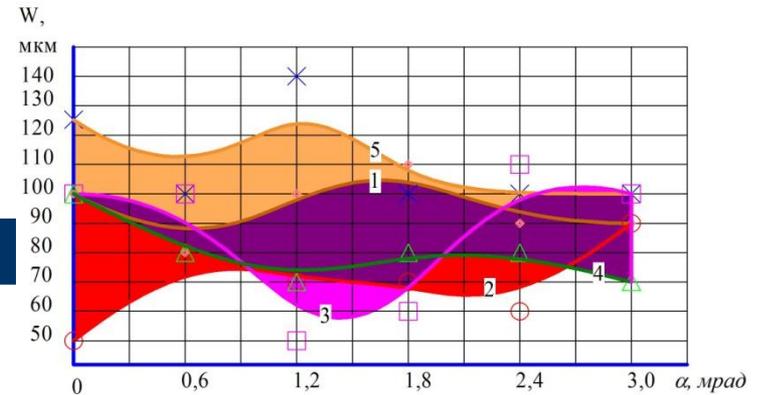
Сравнение уровней виброперемещений контрольных поверхностей трансмиссии ТКМ-16



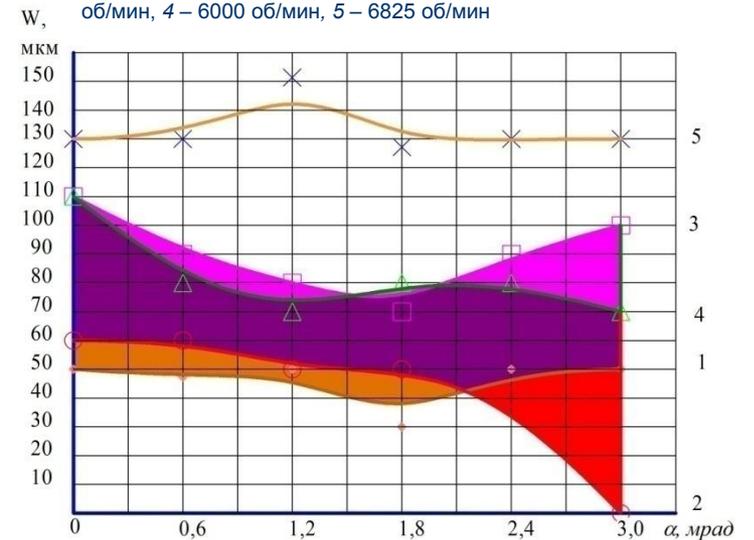
Поле вибраций передней контрольной дорожки трансмиссии по оси X при установке с перекосом осей валов в 3 град



Виброперемещения передней контрольной дорожки трансмиссии ТКМ-16 по оси X: 1 – 4550 об/мин, 2 – 5000 об/мин, 3 – 5600 об/мин, 4 – 6000 об/мин, 5 – 6825 об/мин



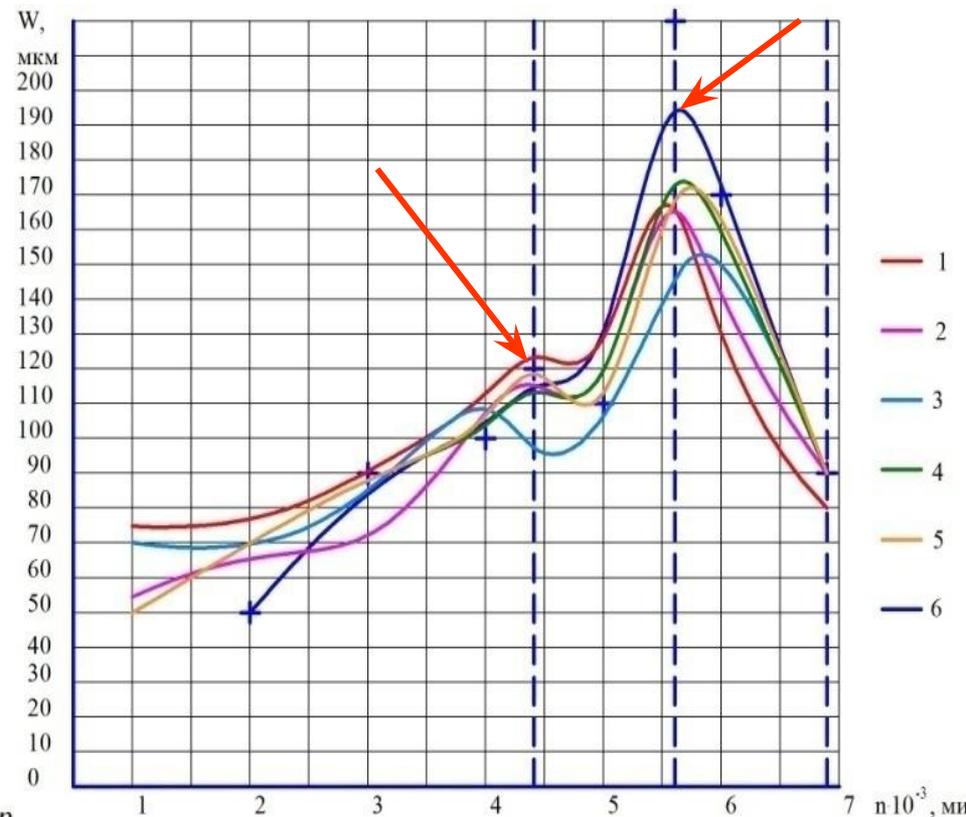
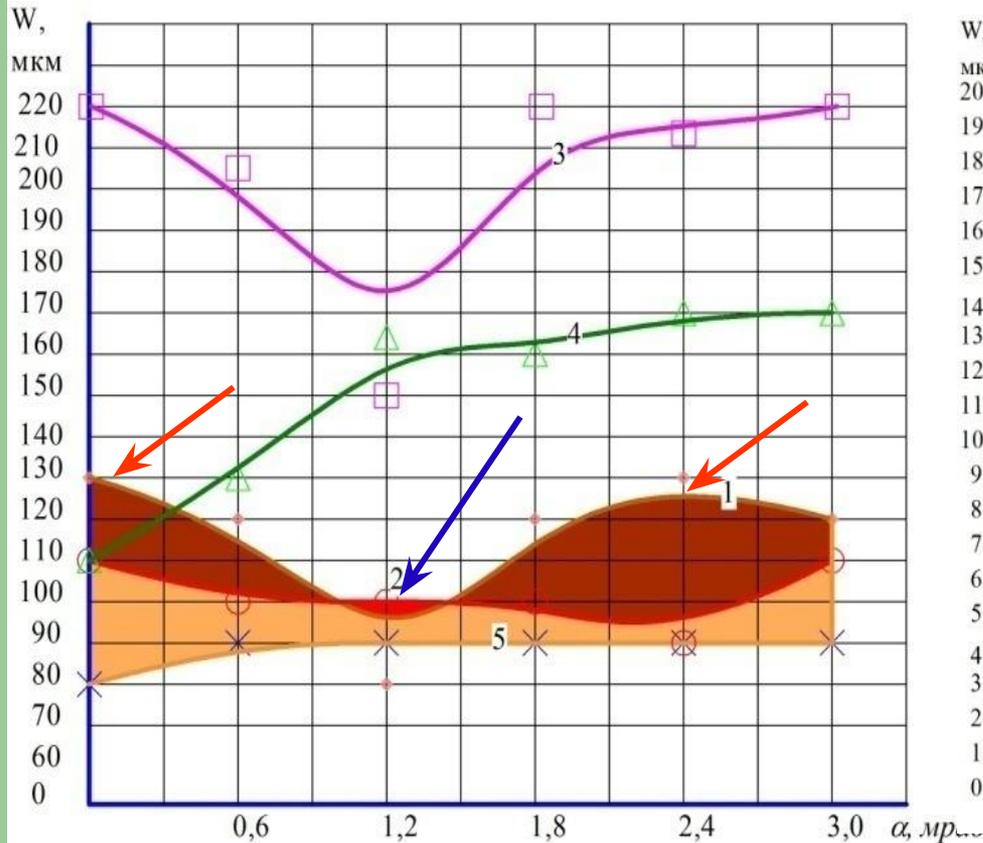
Виброперемещения задней контрольной дорожки трансмиссии ТКМ-16 по оси X: 1 – 4550 об/мин, 2 – 5000 об/мин, 3 – 5600 об/мин, 4 – 6000 об/мин, 5 – 6825 об/мин



Виброперемещения задней контрольной дорожки трансмиссии ТКМ-16 по оси Y: 1 – 4550 об/мин, 2 – 5000 об/мин, 3 – 5600 об/мин, 4 – 6000 об/мин, 5 – 6825 об/мин

Сравнение уровней осевых виброперемещений контрольного диска трансмиссии ТКМ-16

Уровни осевых вибраций контрольного диска задней опоры трансмиссии



Виброперемещения контрольного диска задней опоры трансмиссии ТКМ-16 по оси Z: 1 – 4550 об/мин, 2 – 5000 об/мин, 3 – 5600 об/мин, 4 – 6000 об/мин, 5 – 6825 об/мин

Сравнение результатов измерения осевых вибраций задней муфты трансмиссии ТКМ-16 при изменении частоты вращения: 1 – без перекоса, 2 – перекос 0,6 мрад, 3 – перекос 1,2 мрад, 4 – перекос 1,8 мрад, 5 – перекос 2,4 мрад, 6 – перекос 3 мрад

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СРАВНЕНИЯ АДАПТАЦИОННОЙ И РАНЕЕ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Показатели оценки:

- количество плоскостей уравнивания -- n
- заданное количество балансировок – m
- коэффициент погрешности балансировки (увеличение дисбаланса по технологическим причинам) после монтажа ротора (установки элементов) -- k_{σ}
- коэффициент снижения (увеличения) вибраций, обусловленный применением технологии -- k_{ν}

№ п/п	Наименование объекта	Эффективность применения ТТП		Эффективность применения АТП	
		По показателю дисбаланса	По показателю вибраций	По показателю дисбаланса	По показателю вибраций
	В ср. с технологией по ГОСТ 31320-2006 (ИСО 11342)				Повышение вибраций в рабочем диапазоне $k_{\nu} = 1-1,1$
		$k_{\sigma} = 1-1,1$	$k_{\nu} = 2-3^{**}$	$k_{\sigma} = 1$	$k_{\nu} = 1-1,1$
2	Рабочее колесо центробежного компрессора В ср. с технологией по ГОСТ 31320-2006 (ИСО 11342)	$n = 1$ $m = 2$ $k_{\sigma 1} = 3-5$ $k_{\sigma 2} = 2-3$	Повышение вибраций во время разгонных испытаний $k_{\nu} = 2-3^{**}$	$n = 2$ $m = 1$ $k_{\sigma} = 1-1,5$	Повышение вибраций во время разгонных испытаний $k_{\nu} = 1-1,2$
3	Колесо турбины (осевого компрессора) В ср. с технологией по ГОСТ 22061-76	$n = 2$ $m = 2$ $k_{\sigma} = 3-8$	<i>Данных нет</i>	$n = 1$ $m = 1$ $k_{\sigma} = 1-1,2$	<i>Данных нет</i>
4	Ротор с совпадающими рабочими и балансировочными поверхностями В ср. с технологией по ГОСТ 31320-2006 (ИСО 11342) и ГОСТ 22061-76	$n =$ $m = 1$ $k_{\sigma} =$	Повышение вибраций в рабочем диапазоне $k_{\nu} = 2-3^{**}$	$n = 8-12$ $m = 1$ $k_{\sigma} = 1-1,1$	Повышение вибраций в конце рабочего диапазона (эксперимент) $k_{\nu} = 1-1,1$
5	Ротор с несовпадающими рабочими и балансировочными поверхностями	Технологии ТТП нет* Превышение допустимого уровня вибраций в 1,5-3 раза		$n = 8-12$ $m = 1$ $k_{\sigma} = 1-1,5$	Снижение вибраций (эксперимент) $k_{\nu} = 2-3$
5	Трансмиссия (безопорный ротор) В ср. с технологией по ГОСТ 31320-2006 (ИСО 11342)	$n = 2$ $m = 1$ $k_{\sigma} = 1-1,1$	Повышение вибраций в рабочем диапазоне $k_{\nu} = 2-3^{**}$	$n = 4$ $m = 1$ $k_{\sigma} =$	Снижение вибраций (внедренная технология) $k_{\nu} = 1,5-3$
6	Валопровод В ср. с технологией по ГОСТ 31320-2006 (ИСО 11342)	$n = 2$ $m =$ по конечному результату $k_{\sigma} =$	Повышение вибраций в рабочем диапазоне $k_{\nu} = 2-3^{**}$	$n = 4-6$ $m = 1$ $k_{\sigma} = 1-1,2$	Снижение вибраций (эксперимент) $k_{\nu} = 2-4,5$

*Уравнивание проводится применительно к п.4, возможна последующая коррекция по ГОСТ 26875-86 Вибрация. Аппаратура переносная балансировочная. Технические требования

**Статистические данные, сформированные на основе анализа результатов ПСИ в НПО «Искра»

Патентная защита решений и оценка разработок



СТАНКИ. ПРИБОРЫ
29 марта

ДИПЛОМ

награждается

НИР КАФЕДРЫ
«ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ»
ПГТУ

Повышение динамической устойчивости высокоскоростных газотурбинных двигателей и агрегатов на основе применения нового метода адапционной сборки и балансировки роторов и валов

авторы: Макаров В.Ф., Белобородов С.М., Ковалев А.Ю.

Исполняющий обязанности министра промышленности, инноваций и науки Пермского края

Д.В. Дробинин

Генеральный директор Выставочного центра «Пермская ярмарка»

С.А. Клинов

Схема движения информации в ходе изготовления роторов

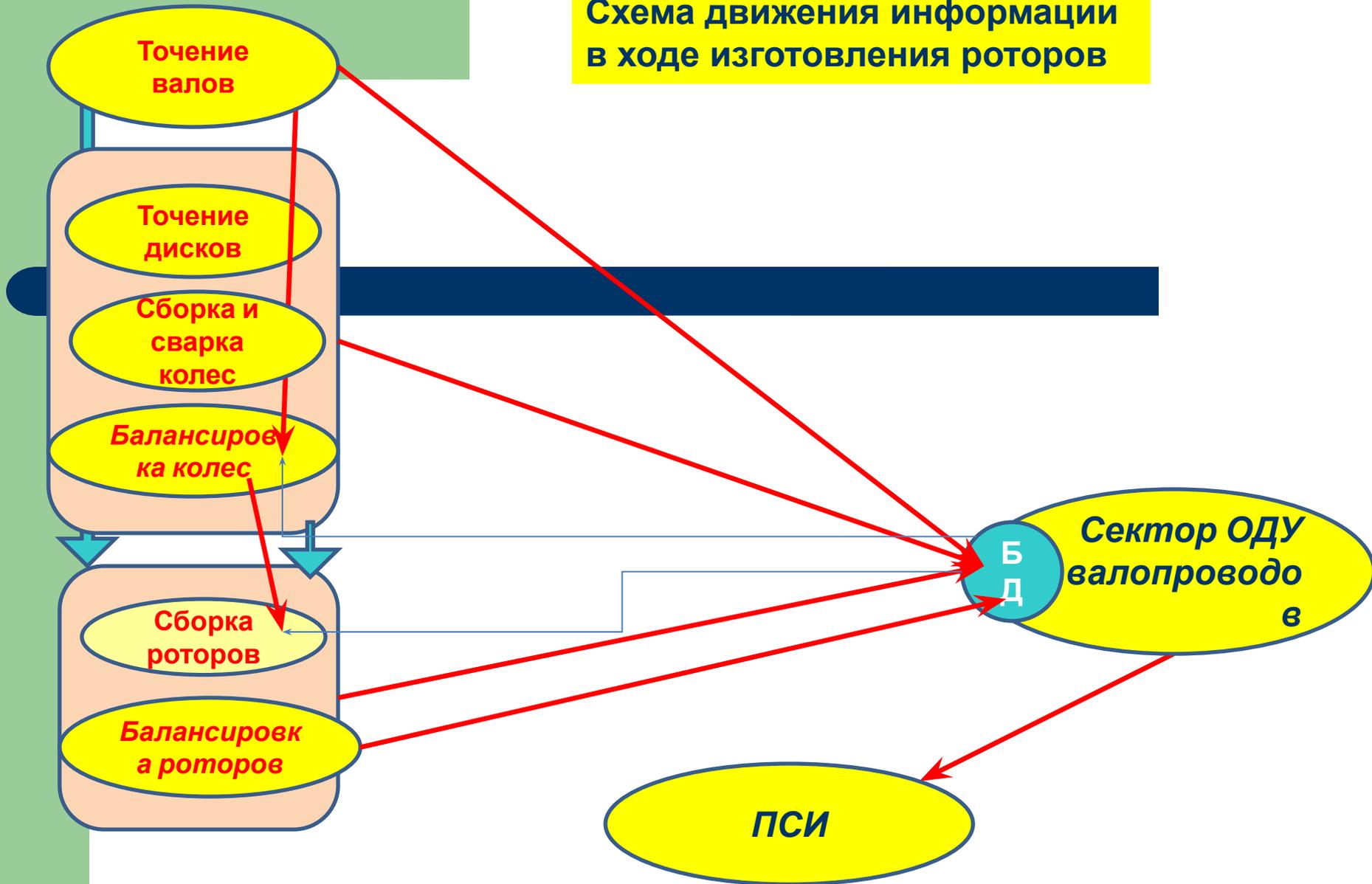


Схема нормализации технологических дисбалансов

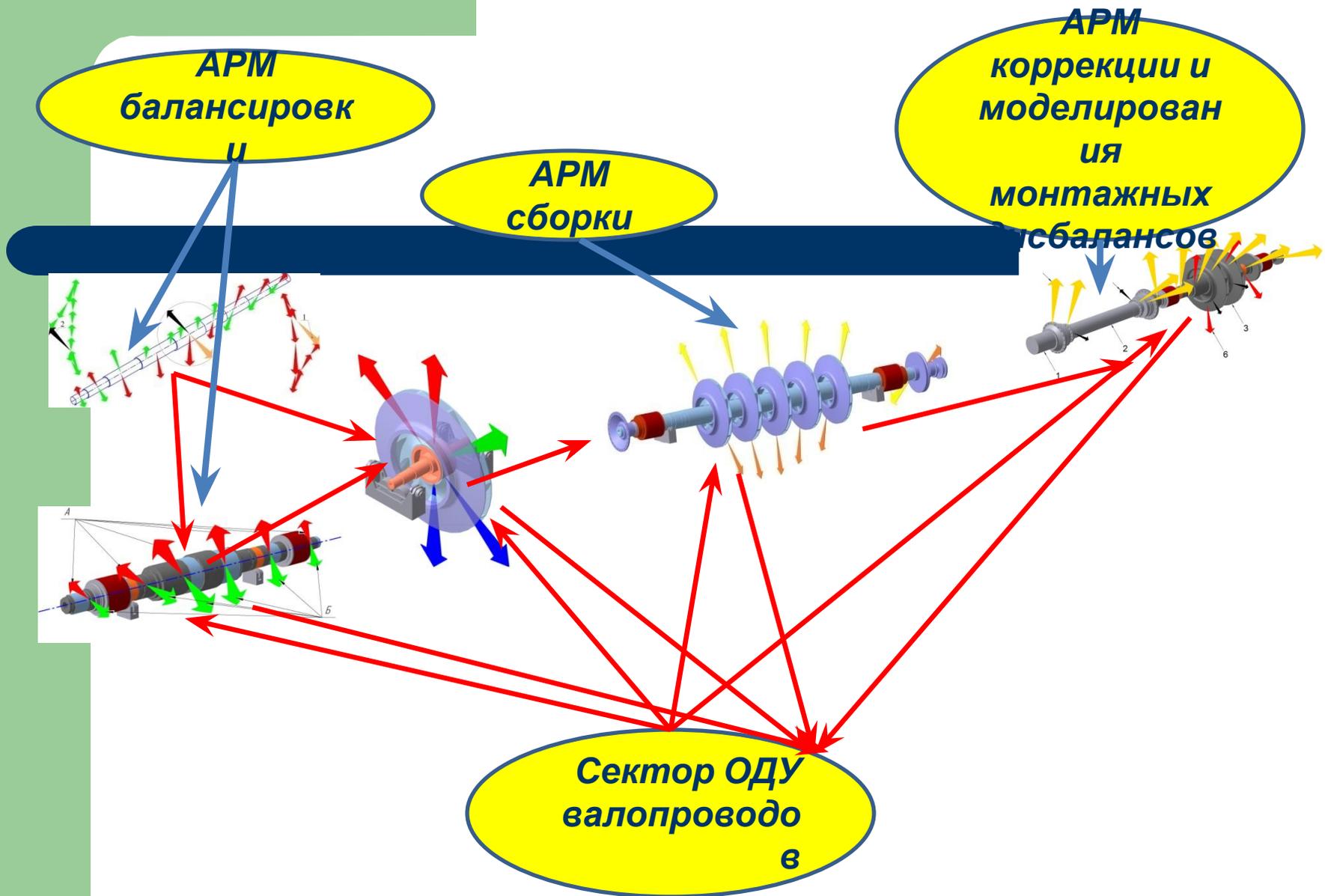
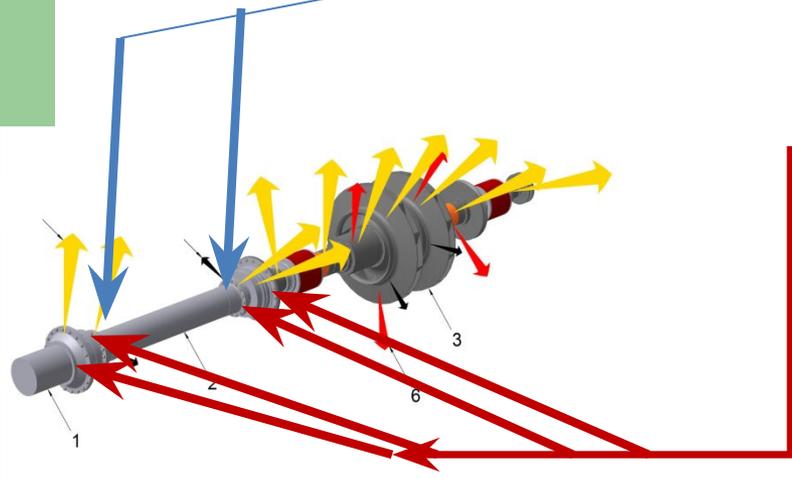


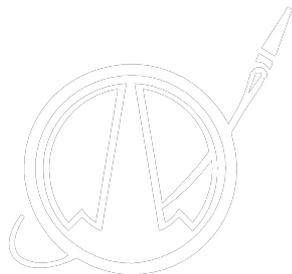
Схема коррекции монтажных дисбалансов



ВЫВОДЫ

Полученные научные результаты позволили сформулировать следующие выводы:

1. Разработанная методология технологического обеспечения высокой динамической устойчивости роторов и валопроводов обеспечивает управление процессом сборки, получение заданных параметров уравновешенности при использовании программного обеспечения научно обоснованного технологического процесса, экономию средств и времени.
2. Разработанные основы расчета, анализа и задания параметров сборки роторов обеспечивают минимизацию их локальных монтажных дисбалансов.
3. Разработанные, апробированные и внедренные в технологические процессы адаптирующие методы сборки обеспечивают высокий технико-экономический эффект:
 - применение расчетно-имитационного метода подготовки валов к сборке, обеспечивает экономию **свыше 3200000 рублей в год**;
 - применение прецизионного метода подготовки элементов роторов к сборке, обеспечивает снижение стоимости сборочных работ **на 20 – 25 %**;
 - применение расчетно-эксцентриситетного метода сборки роторов обеспечивает уменьшение монтажных дисбалансов с одновременным **снижением объема работ на 25 – 30%**;
 - применение расчетно-эксцентриситетного метода сборки валопроводов с установкой многозвенных элементов обеспечивает **уменьшение монтажных дисбалансов в 18 – 25 раз**.
4. Выполненное математическое моделирование вибросостояния валов и роторов подтвердило правильность направления реализации рабочей гипотезы в части снижения изгибов роторов.
5. Разработанное программное обеспечение позволит создать автоматизированные рабочие места:
 - инженера-технолога сборочного цеха для проектирования технологического процесса по заранее заданным параметрам сборки роторов;
 - оператора сборочных работ для формирования блока исходных данных состояния валов после изготовления и параметров для каждого этапа сборки;
 - испытателя на стенде приемо-сдаточных испытаний компрессоров.
4. Разработанное программное обеспечение позволяет создать автоматизированное рабочее место шеф-инженера пуско-наладочных работ с коммутацией на монтажных площадках.
5. Результаты, полученные в ходе экспериментальной сравнительной проверки, подтвердили эффективность метода коррекции монтажного дисбаланса валопровода.
6. Выполненное натурное экспериментальное исследование закономерностей и связей уровней вибраций и дисбалансов обеспечило разработку показателя виброустойчивости валопровода и его элементов.
7. Проектирование и изготовление трансмиссий в НПО «Искра» с использованием разработанной методологии существенно повысило качество их сборки, обеспечило **снижение уровня вибраций не менее чем в 2 раза** в рабочем диапазоне частот и **в 2 – 2,5 раза – на максимальных оборотах**.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

