



Научно-практическая конференция
«Техническое диагностирование высоковольтных вращающихся машин при переходе
на обслуживание по реальному состоянию»

Вибрационный контроль состояния механической системы статоров турбогенераторов

Григорьев А.В.
ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг»
Email: grav@k66.ru
Тел. 8-912-262-21-13



Исходные важные тезисы

Состояние технического объекта — это объективная реальность, характеризующаяся степенью способности и готовности объекта к реализации его заявленных качеств.

Степень способности и готовности — в свою очередь, определяется степенью соответствия значений параметров, характеристик и критериев, отражающих свойства и качества объекта, определённым контрольным уровням.

Состояние многокомпонентного технического объекта в целом всегда определяется его самым слабым звеном.

Пояснение понятий

- 1. Механическая система статора** — часть конструкции статора, предназначенная для компоновки и удержания всех необходимых элементов статора и для восприятия и выдерживания всех статических и динамических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации турбогенератора.
- 2. Состояние механической системы статора** — объективная реальность, характеризующаяся степенью соответствия параметров, отражающих механические свойства и качества системы определённым контрольным уровням.

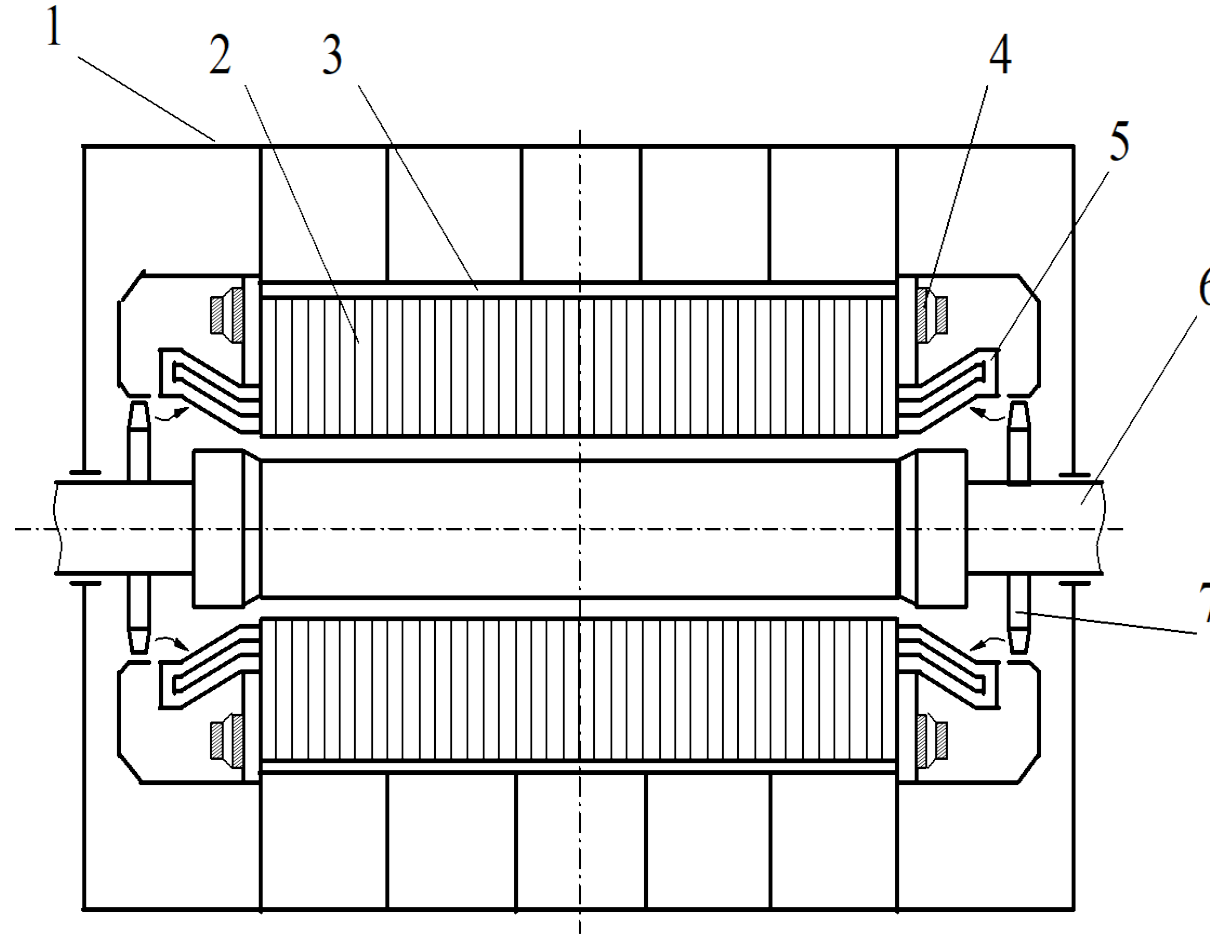
Составные части механической системы статора

1. Сердечник - (незаменяемая активная часть)
2. Система крепления сердечника к корпусу статора.
3. Корпус статора
4. Фундамент статора

Значимость механической системы статора

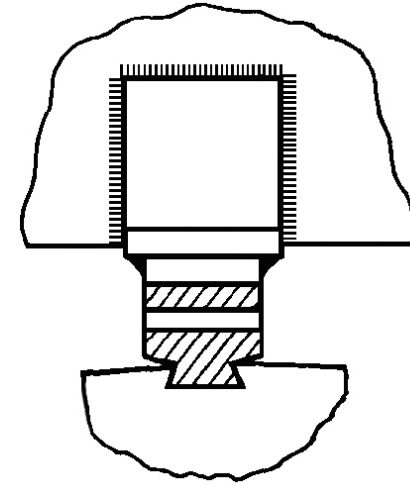
1. Самая важная часть механической системы статора - **сердечник**: при безвозвратной утрате сердечником работоспособности требуется замена статора.
2. Замена статора – означает замену генератора: генератор как единица оборудования идентифицируется по статору.
3. Работоспособное состояние сердечника – главный фактор, обуславливающий срок службы генератора.
4. Сохранение работоспособного состояния сердечника статора обуславливается состоянием механической системы статора.
5. Состояние механической системы статора – это и важная часть характеристики технического состояния статора.

Схема конструкции турбогенератора



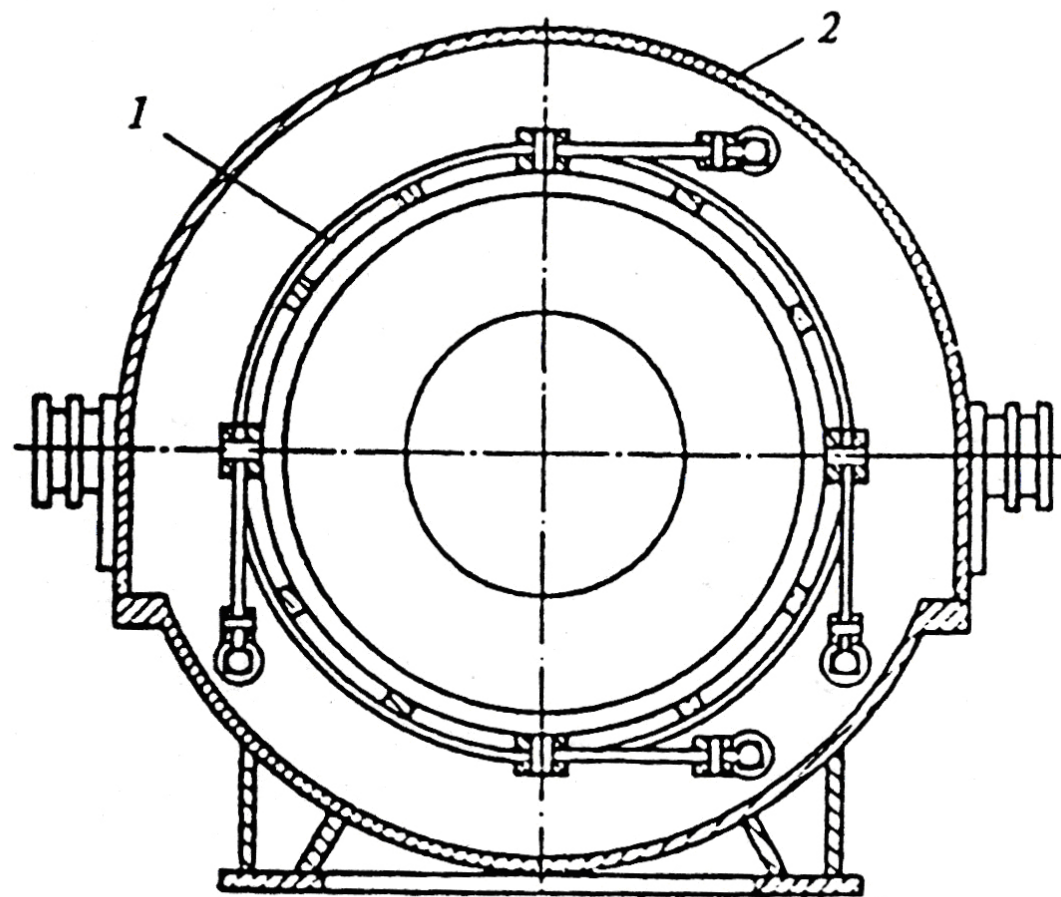
1-корпус статора, 2-сердечник статора, 3-стяжная призма сердечника,
4-нажимная плита сердечника, 5-обмотка статора, 6-ротор. 7-вентилятор

Крепление сердечника статора в корпусе ТГ



1-нажимная плита, 2-стенка корпуса статора,
3-стяжная призма, 4-сердечник

Подвеска сердечника в корпусе турбогенераторов ТГВ-200 и ТГВ-300



Качество механической системы статора

Обуславливается свойствами материалов, массовыми характеристиками, геометрическими соотношениями, внутренними напряжениями, условиями сопряжения частей конструкции.

Особое значение имеет надлежащая спрессованность активной стали сердечника, являющегося силовой основой механической системы.

Механическая система статора должна выдерживать все неизбежные эксплуатационные механические, термомеханические, вибрационные нагрузки, при этом уровень вибрации на корпусе статора не должен превышать допустимых правилами эксплуатации значений.

О ВИБРАЦИИ

Вибрация – естественный отклик механической конструкции на возмущающие её периодические динамические силы.

Уровень вибрации – результат взаимодействия возмущающих сил и конструкции, наделённой определёнными механическими и динамическими свойствами. Значения параметров вибрации отражают механические свойства конструкции.

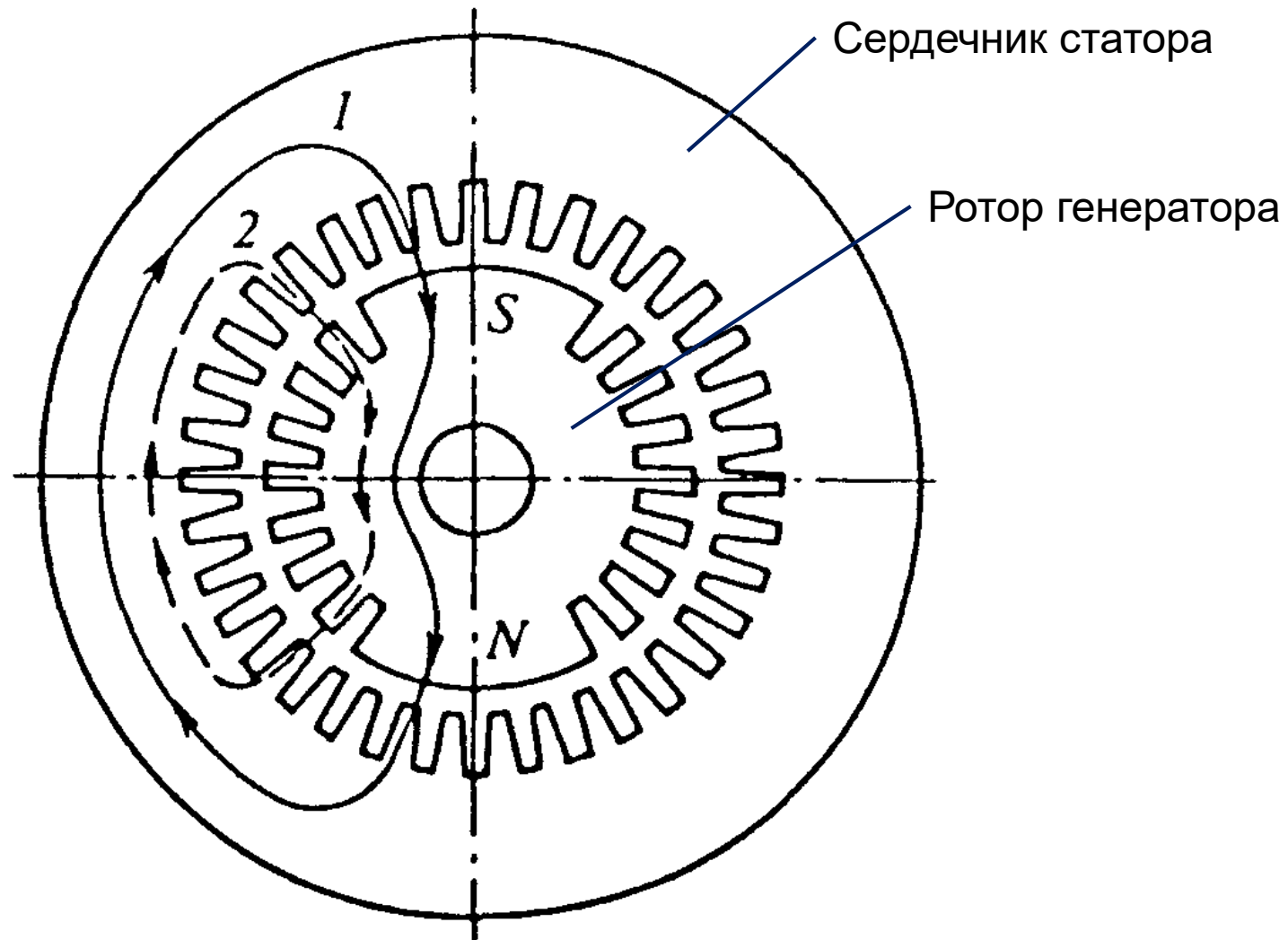
Неизменность значений параметров вибрации при неизменности сил, возбуждающих вибрацию, - свидетельство неизменности механических свойств конструкции.

Вибрационная устойчивость – свойство объекта при заданной вибрации выполнять заданные функции и сохранять в пределах норм значения параметров.

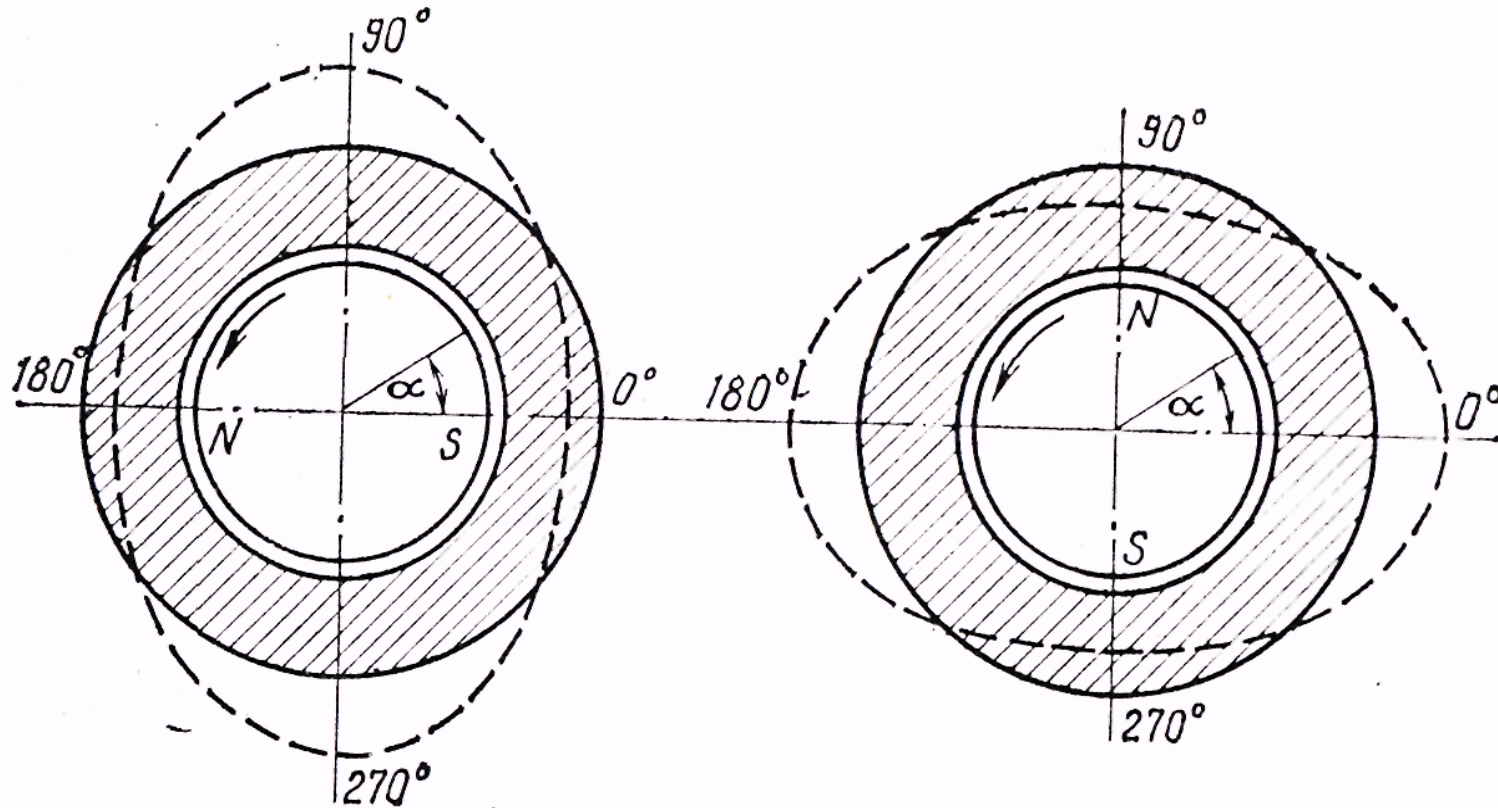
Побудители вибрации статора

1. Циркулирующее в статоре магнитное поле — электромагнитный побудитель вибрации с частотой перемагничивания сердечника.
2. Вращающийся ротор — механический побудитель вибрации обратной частоты ротора.

Рабочее магнитное поле генератора

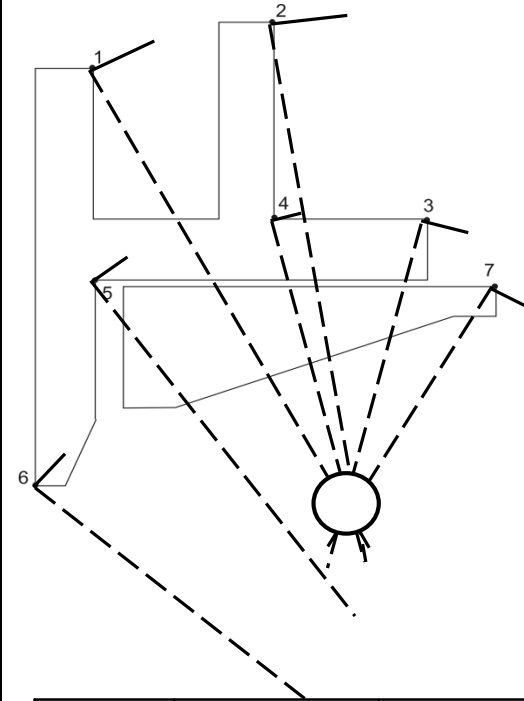
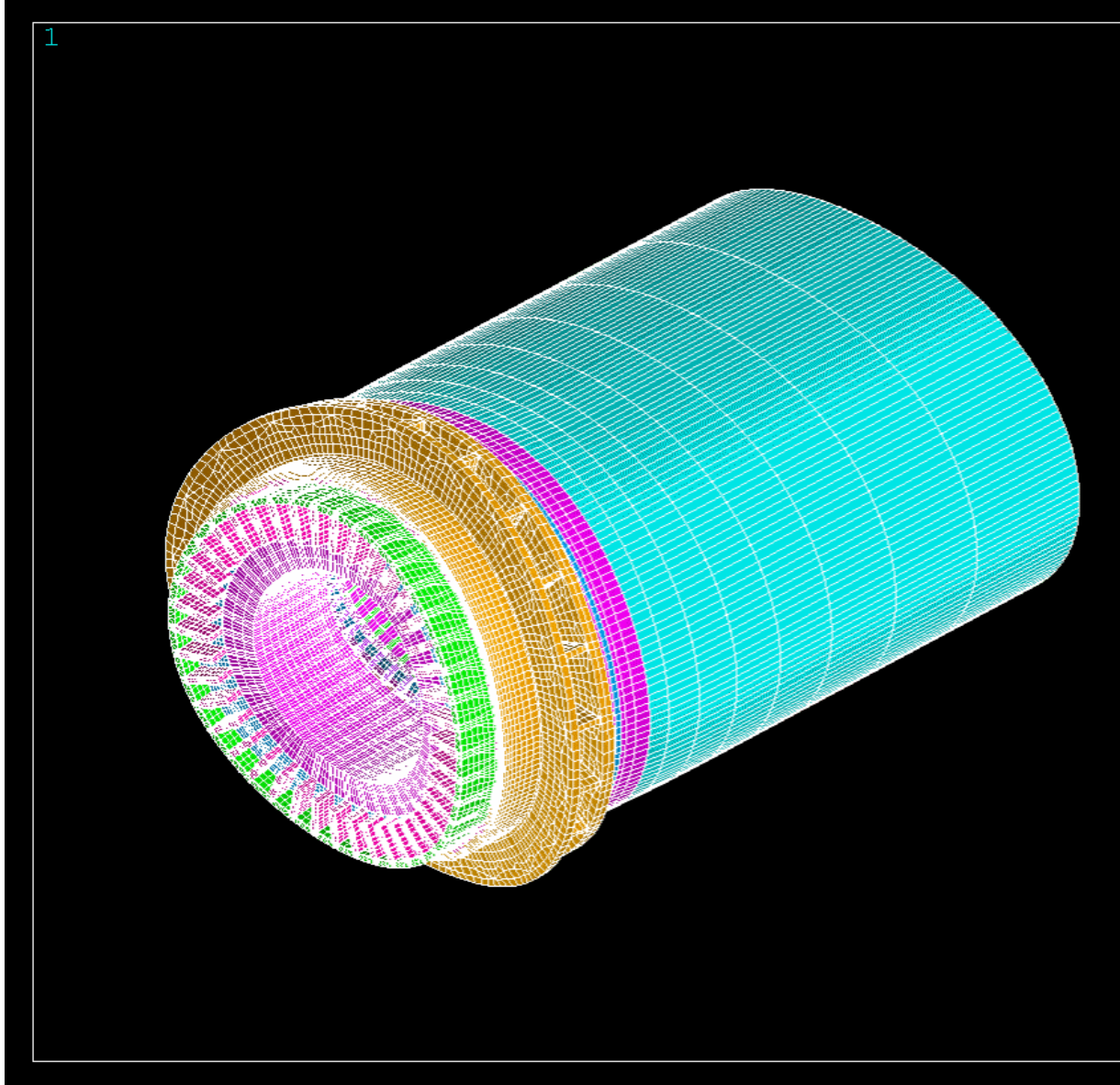


Деформация сердечника статора под действием магнитного поля



Овальная деформация, циркулирующая по кольцу сердечника с частотой его перемагничивания, - это отклик сердечника на пронизывающее его вращающееся магнитное поле.

Деформация сердечника статора работающего ТГ



№ ТОЧКИ	$2A_r$, мкм	$2A_z$, мкм
1	8,8	23
2	2,2	24,4
3	-3	15,5
4	2,6	14,1
5	9,2	14,1
6	10,6	9,3
7	-7,2	13,2

Типичная траектория движения вала. ГОСТ Р ИСО 7919-1-99



O — среднее положение траектории; K — мгновенное положение центра вала; \bar{x} , \bar{y} — средние значения перемещения вала; $x(t)$, $y(t)$ — изменяющиеся со временем значения перемещения вала

Сердечник статора через магнитное поле жёстко связан с телом ротора (обмен энергией осуществляется в неподвижных друг относительно друга магнитных полях — третий закон электромеханики)

Условия вибрационной устойчивости конструкции

Напряжения возникающие в конструктивных материалах вследствие периодических деформаций не должны превышать их пределы упругости и усталости.

Вибрационные деформации узлов и элементов конструкции не должны вызывать вибрационные соударения или относительные перемещения в узлах сопряжения элементов конструкции.

Собственные частоты конструкции, её узлов и элементов не должны совпадать или быть близкими с частотами возбуждающих вибрацию сил.

Разрушительные действия вибрации

С набором срока эксплуатации, вследствие естественных процессов старения, релаксации, износа конструктивных элементов, утрачиваются начальные механические свойства конструкции статора – теряется монолитность связей частей конструкции. Упругие колебания конструкции отягчаются возникновением вибрационных соударений элементов конструкции. Виброустойчивость конструкции утрачивается. Вибрация из естественного атрибута функционирующего агрегата превращается в агрессивно действующий разрушительный фактор.

Вибрационные повреждения статора



Ослабление затяжки гайки
на стяжной призме
сердечника статора



Резьба на стяжной призме
сердечника, истёртая
гайкой, затяжка которой
была утрачена



Выкрашивание пакета
зубца сердечника,
вследствие его
распрессовки

Вибрационные повреждения статора



Гайка и стопорная шайба стяжной призмы сердечника, упавшие на обмотку статора

Вибрационные повреждения статора



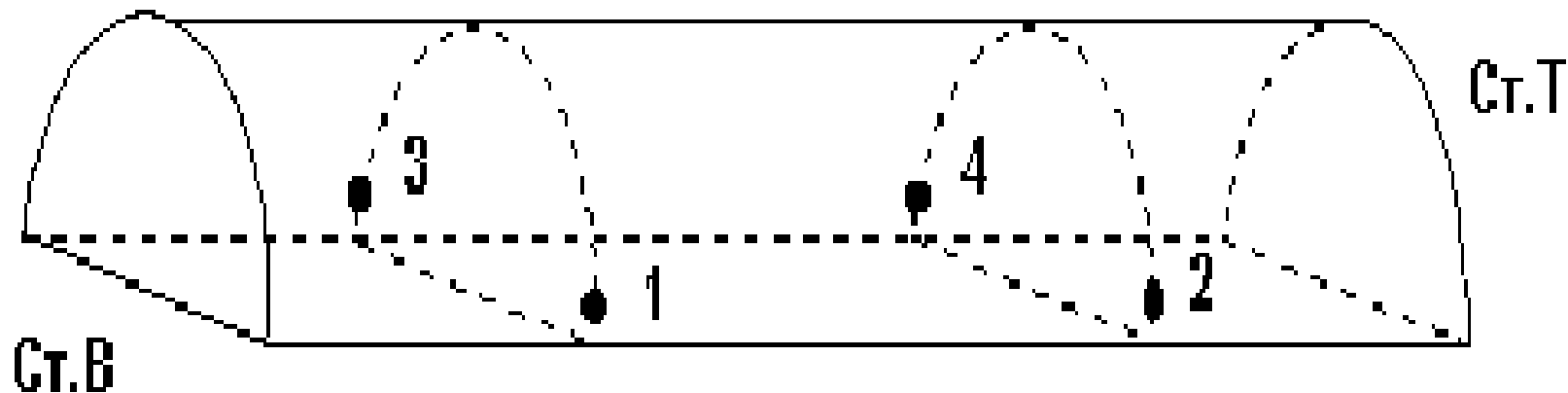
Выкрашивание пакета зубца сердечника, вследствие его распрессовки

Пример повреждения статора из-за дефектного сердечника



Регистрация вибрационных сигналов статора с целью контроля его состояния

Схема точек съёма вибрационных сигналов с корпуса статора

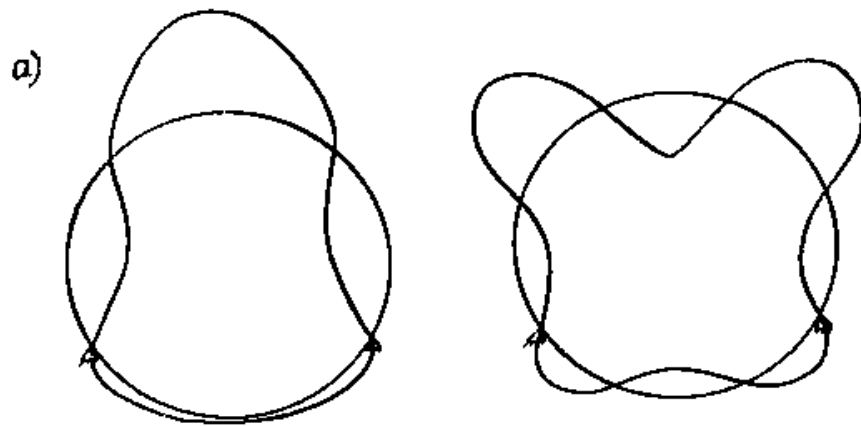


Вибрационные сигналы на корпусе статора косвенно отражают возмущения сердечника в виде его радиальной деформации магнитным полем и радиальных перемещений побуждаемых вибрационными эволюциями возбуждённого ротора, которые передаются на корпус статора через узлы крепления сердечника к корпусу

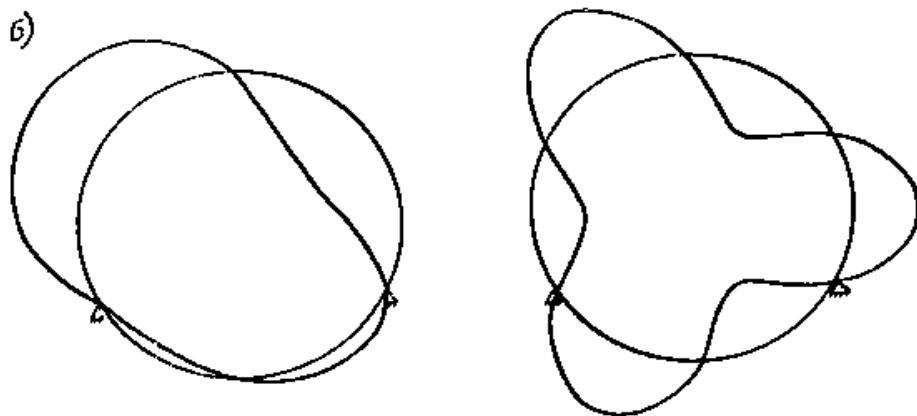
Съём вибрационных сигналов с корпуса статора



Формы свободных колебаний кольца на жестких шарнирных опорах



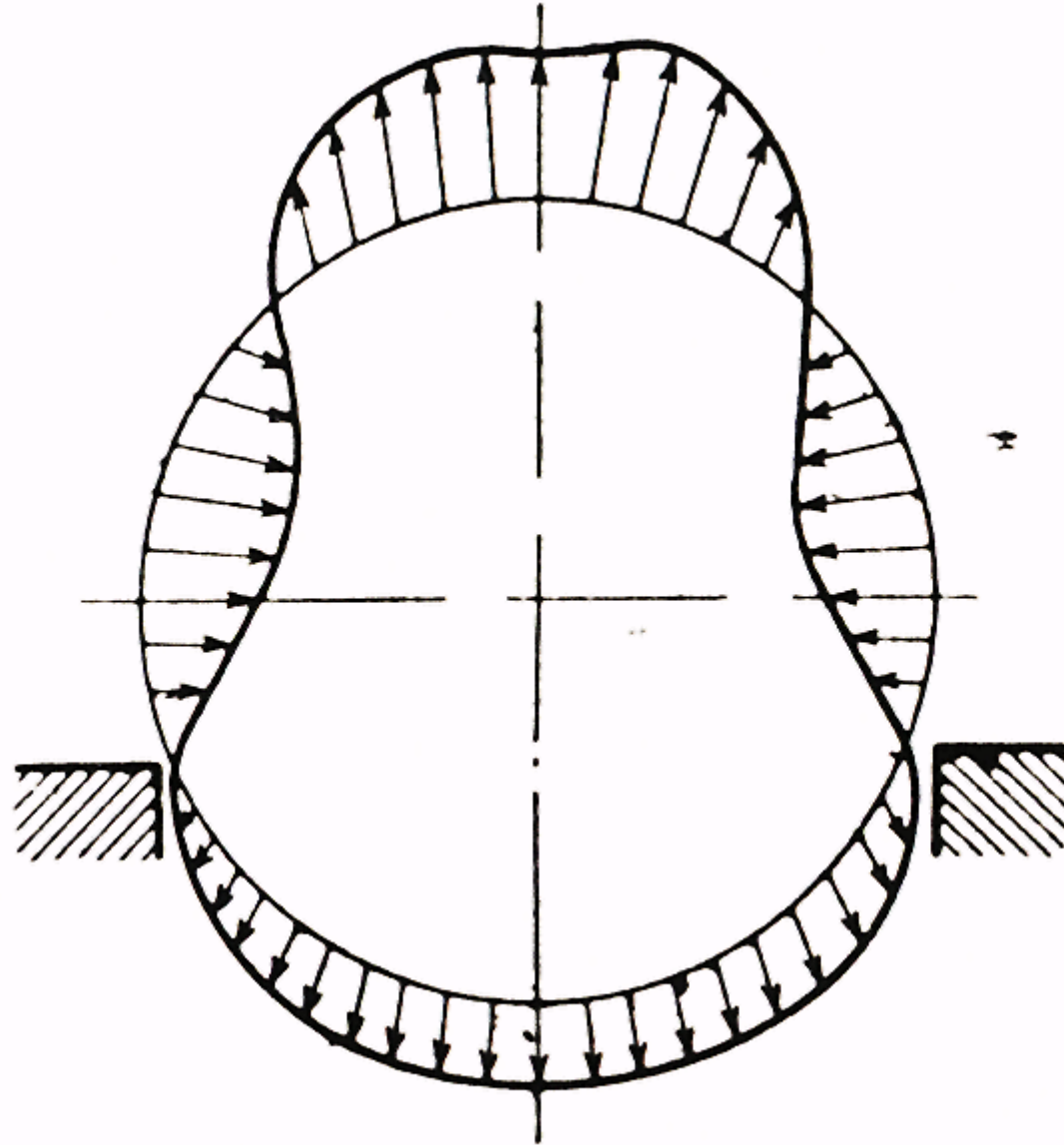
а) - симметричные;



б) - несимметричные;

Источник: Детинко Ф.М., Загородная Г.А., Фастовский В.М.
Прочность и колебания электрических машин. Энергия, Л., 1969.

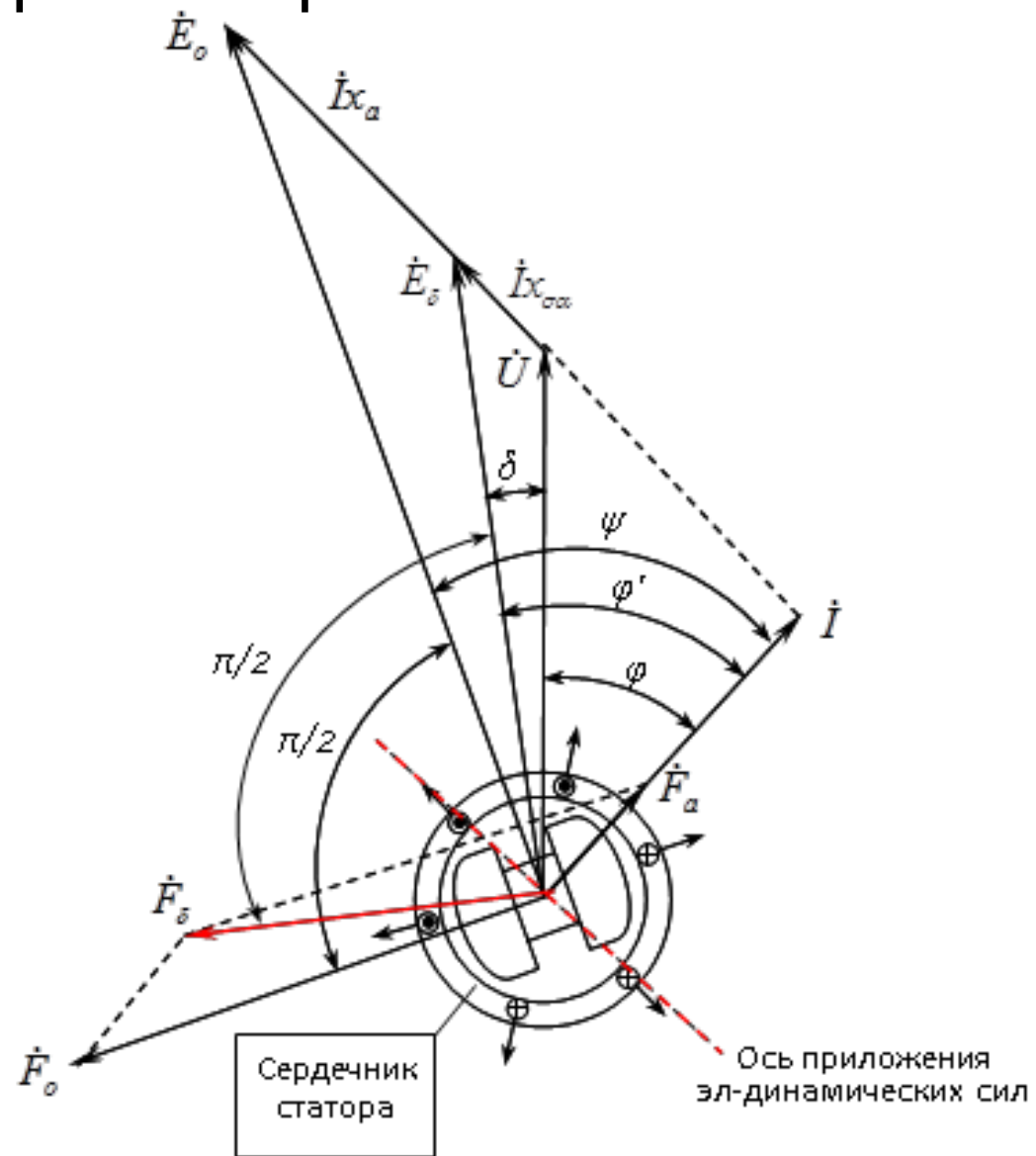
Распределение вибрации по контуру корпуса статора



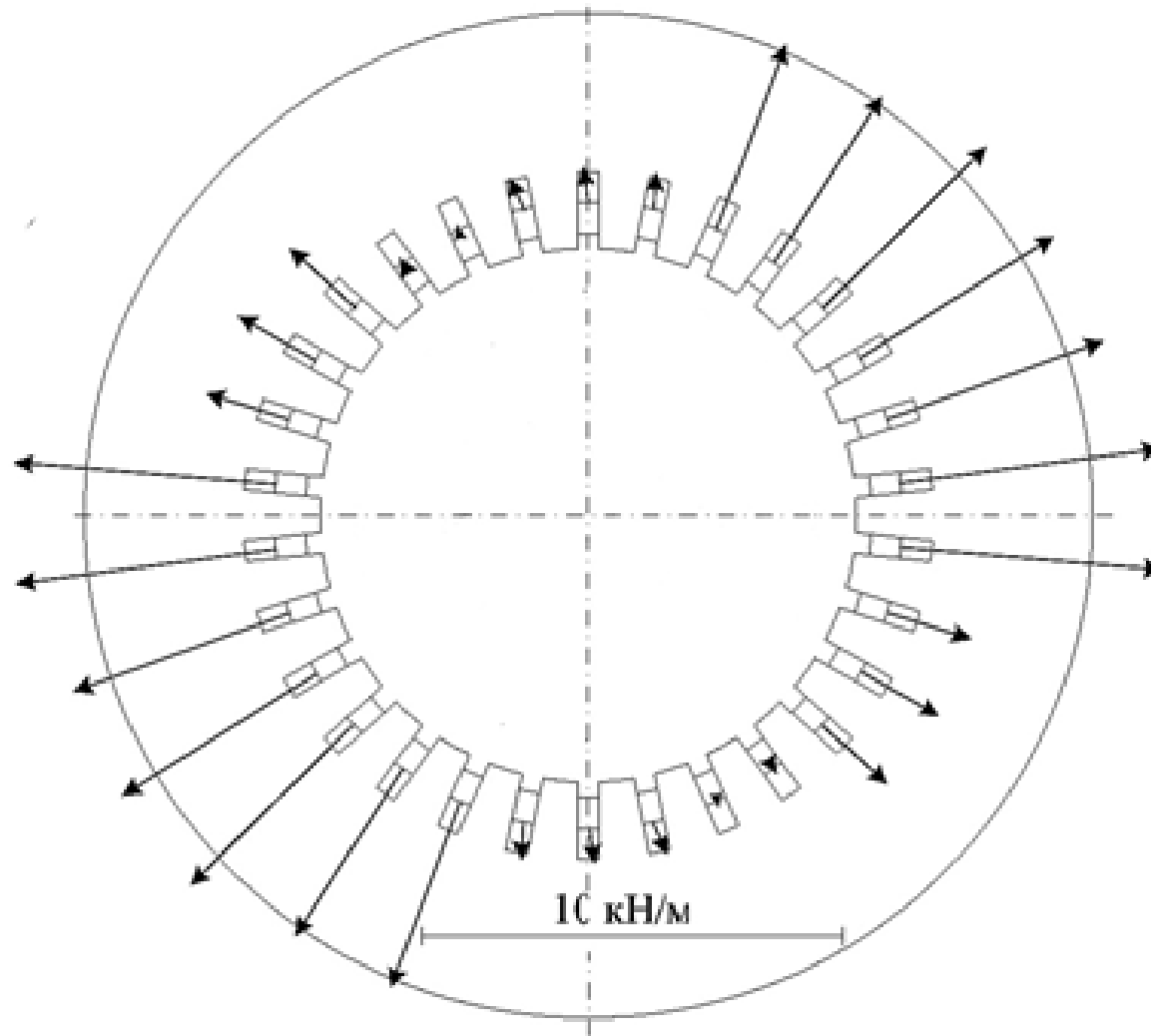
Вибрационные взаимовлияния узлов, конструктивных свойств и режимных параметров турбогенератора



Связь вибрации статора с параметрами режима работы эл.машины



Распределение электродинамических усилий по пазам статора и ротора в режиме номинальной нагрузки



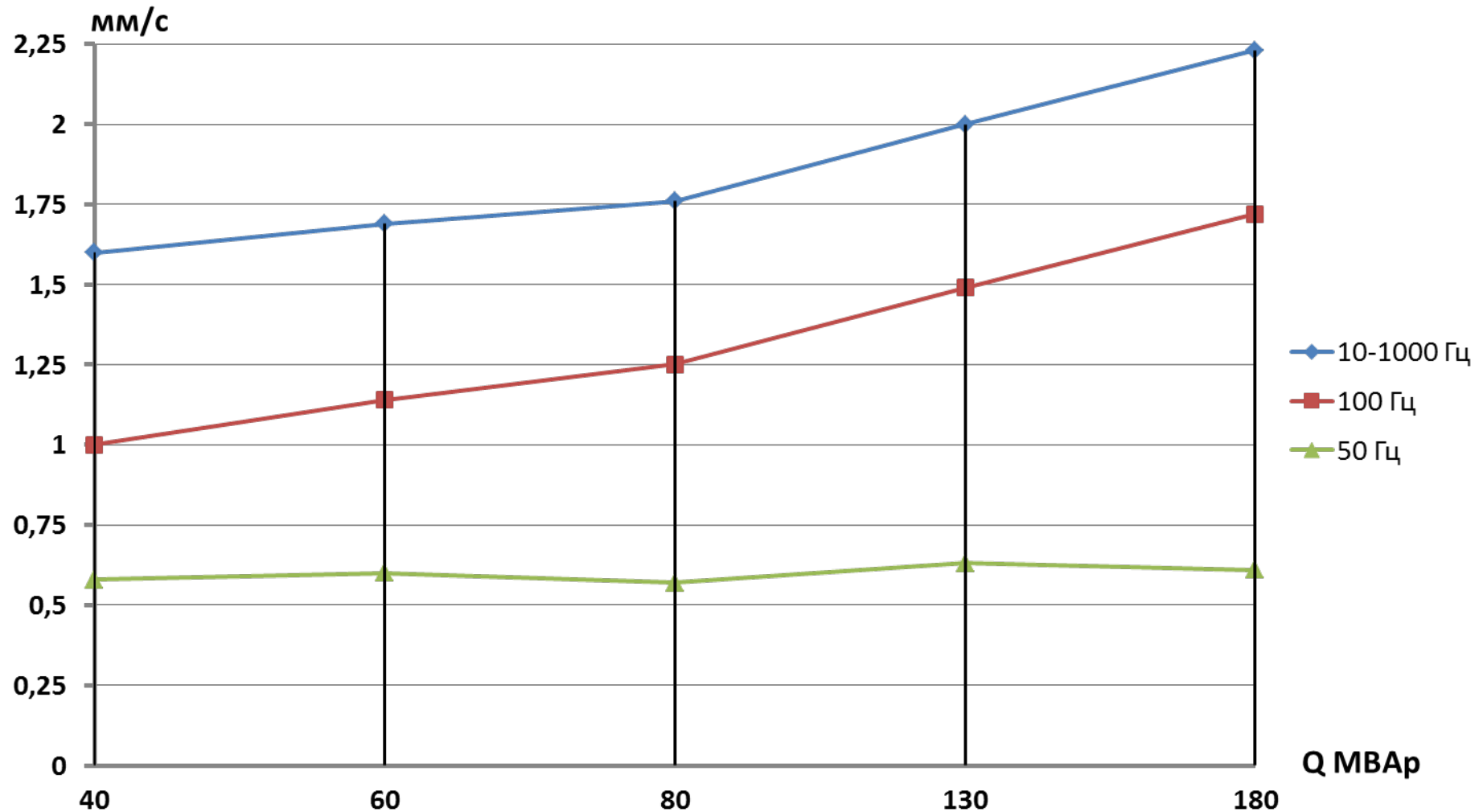
Источник: Милых В.И., Бадовский В.А. Численно-полевой анализ силовых взаимодействий в турбогенераторе // Электротехника і Електромеханіка. 2009. №3.

Зависимость вибрации статора от реактивной нагрузки

(ТГ ТВВ-320, опытные данные, 2015г.)

Время, МИН.	Нагрузка		Напр. статора	Ток статора			Напр. рот.	Ток рот.		Замеры вибрации		
	акт.	реакт.		А	В	С			Т х.г.	S общ	50Гц	100Гц
	МВт	МВАр	кВ	кА	кА	кА	В	кА	°С	мм/с	мм/с	
0	301	40	18,6	9,3	9,4	9,5	290	2,1	36	1.6	0.58	1.0
5	301	60	18,65	9,4	9,5	9,6	300	2,2	36	1.69	0.6	1.14
10	301	80	18,98	9,5	9,5	9,6	330	2,3	36	1.76	0.57	1.25
26	301	100	19	9,4	9,5	9,6	300	2,2	36	1.77	0.57	1.32
35	301	130	19,4	10	10,1	10,2	380	2,6	36	2.0	0.63	1.49
45	301	180	19.6	10,5	10,5	10,6	400	2,8	37	2.23	0.61	1.72

Значения гармоник 100 и 50 Гц при изменении реактивной и неизменной (301 МВт) активной мощности турбогенератора ТВВ-320



Аналитическое выражение зависимости 100-герцовой гармоника вибрации от параметров режима турбогенератора

$$K_{\text{вибр}} = \left(I_0^{*2} + I_a^{*2} - 2I_0^* I_a^* \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) \right) - \frac{x_{\sigma\alpha}}{x_\alpha} I_a^{*2} (\cos \varphi' - \cos(90 - \varphi'))$$

$$\psi = \arctg \{ [\sin \varphi + I^* \cdot (x_a^* + x_{\sigma a}^*) / U^*] / \cos \varphi \}, \text{ град};$$

$$\varphi' = \arctg (\sin \varphi + I^* \cdot x_{\sigma a}^* / U^*) / \cos \varphi, \text{ град};$$

Коэффициент $K_{\text{вибр}}$ отражает изменение суммарной радиальной силы, действующей с частотой перемагничивания на конструкцию статора, вследствие изменения параметров режима турбогенератора

Вывод формулы объяснён в статье: Влияние параметров рабочего режима на вибрацию статора турбогенератора. - Электричество. 2017. № 9. С.65-69.

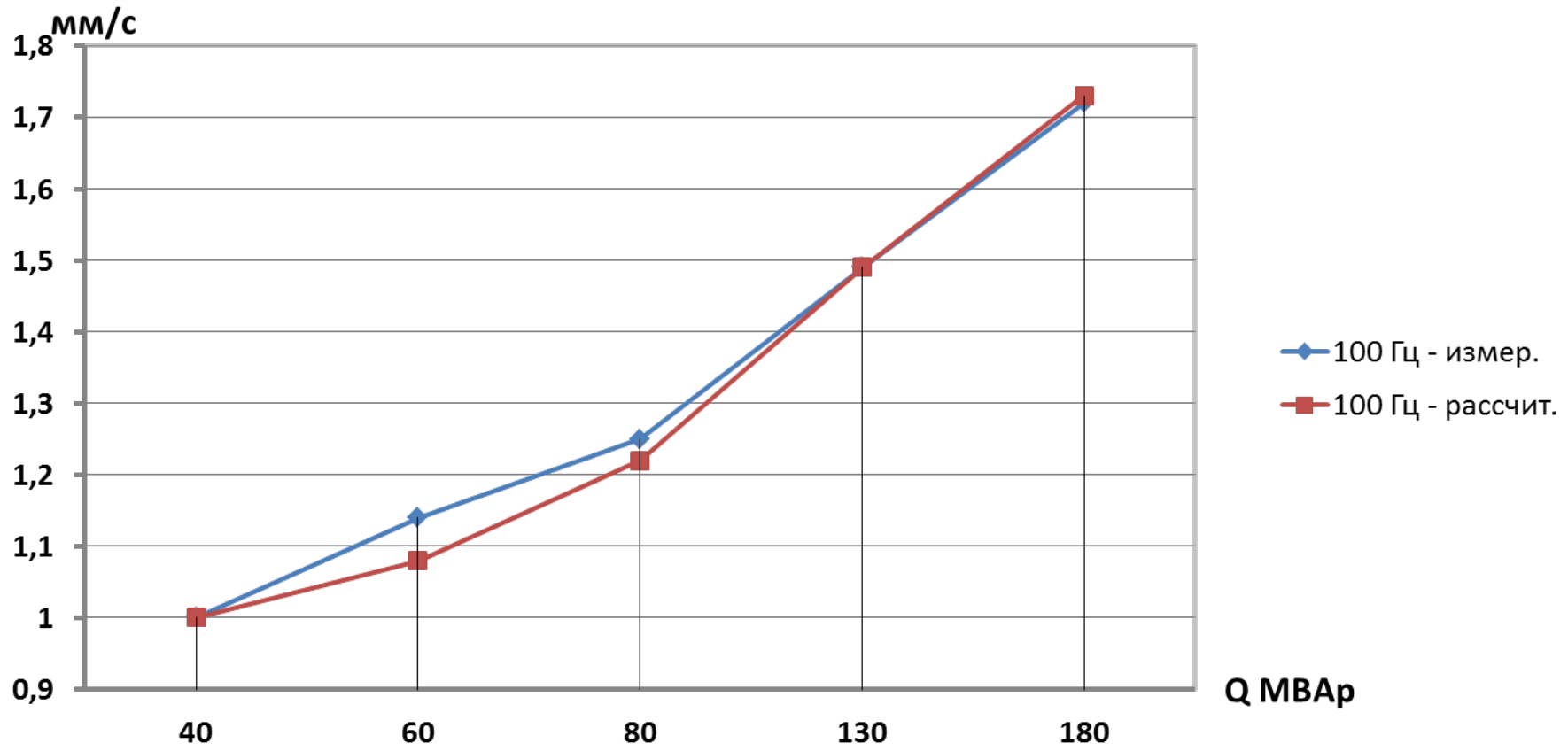
Проверка формулы аналитической зависимости 100-герцовой гармоника вибрации от параметров режима турбогенератора

P,	Q,	cos φ	φ,	$K_{\text{вибр.}}$	Изменен. $K_{\text{вибр.}}$	$V_{\text{(общ.)}}$ 10-1000 Гц	Изменен. $V_{\text{общ.}}$	Гармоника 50 Гц	Изменен. 50 Гц	Гармоника 100 Гц	Изменен. 100 Гц
МВт	МВАр		град		%	мм/с	%	мм/с	%	мм/с	%
301	40	0,994	6,3	0,31	100	1,6	100	0,58	100	1	100
301	60	0,981	11,2	0,34	108	1,69	106	0,6	103	1,14	114
301	80	0,964	15,5	0,38	122	1,76	110	0,57	98	1,25	125
301	130	0,887	27,5	0,47	149	2	125	0,63	109	1,49	149
301	180	0,842	32,6	0,54	173	2,23	139	0,61	105	1,72	172

Прогнозируемое значение 100-герцовой гармоника в номинальном режиме

300	186	0,85	31,9	0,68	219					2,19	219
-----	-----	------	------	------	-----	--	--	--	--	------	-----

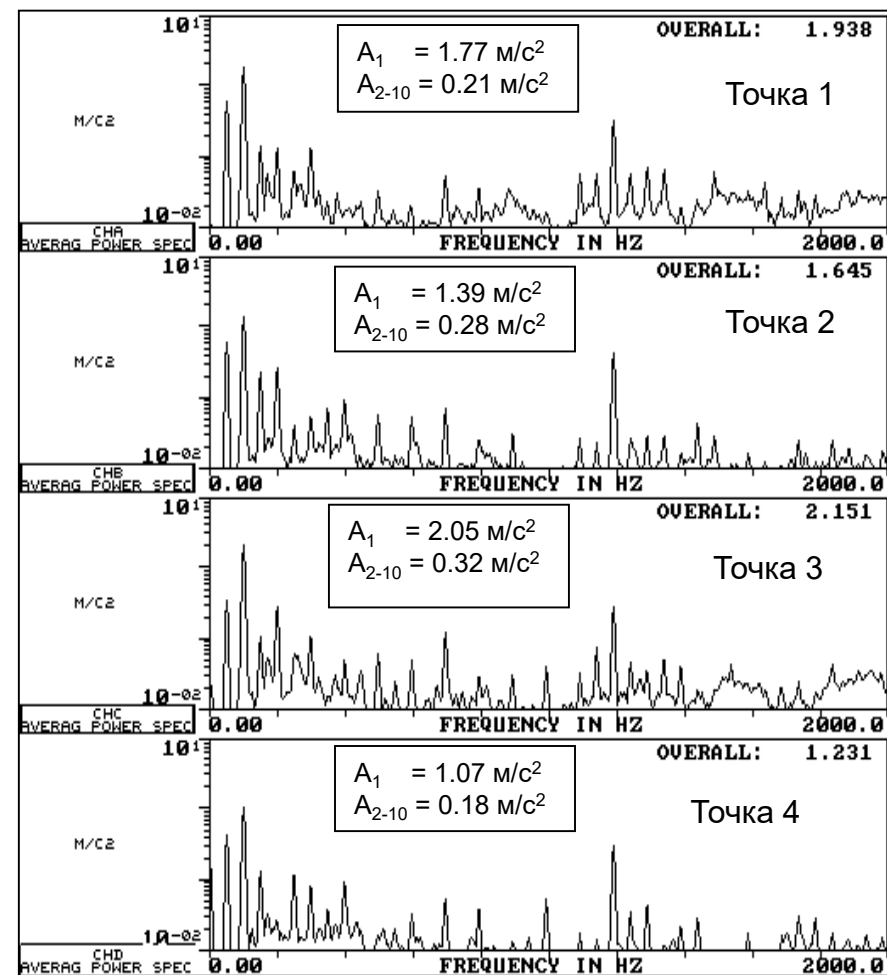
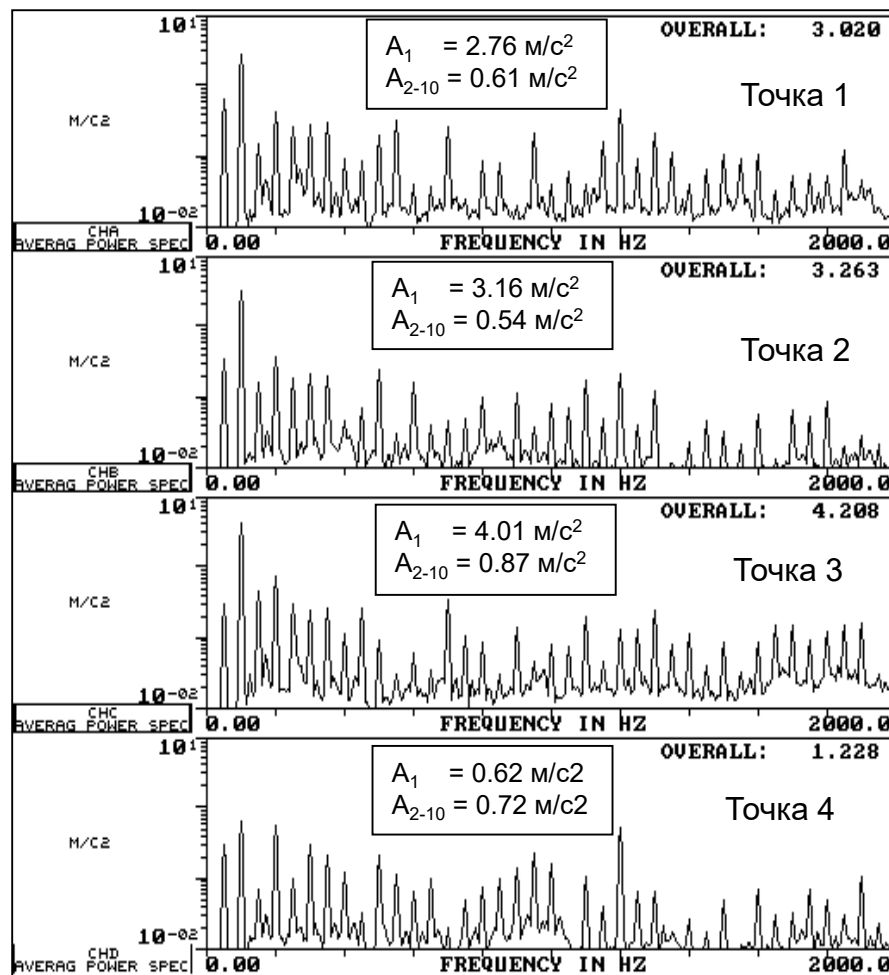
Соотношение измеренных значений 100-герцовой гармоники и рассчитанных через $K_{вибр}$



Спектры вибрации, зарегистрированные на поверхности корпуса турбогенератора ТГВ-300

С оборванными стяжными призмами

После ремонта



Параметры контроля вибрации

$$A_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N a_{i1}; \quad A_{2-10} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=2}^{10} a_{ij}^2}$$

A_1 (м/с²) – СКЗ виброускорения на частоте 100Гц;

A_{2-10} (м/с²) – СКЗ виброускорения в полосе 200...1000Гц;

a_{i1} – СКЗ виброускорения в точке номер i на частоте 100Гц;

a_{ij} – СКЗ виброускорения в точке номер i на частоте $j \times 100$ Гц,
где j принимает значения от 2 до 10;

N – число точек съёма вибрационных сигналов.

Примеры результатов вибрационного контроля статоров турбогенераторов

Состав контролируемых параметров

На частоте 100Гц

A_{1cp} - СКЗ виброускорения, m/s^2 - среднее по 4-м точкам контроля

A_1 Ст.В - СКЗ виброускорения, m/s^2 - среднее по точкам со Ст.В.

A_1 Ст.Т - СКЗ виброускорения, m/s^2 - среднее по точкам со Ст.Т.

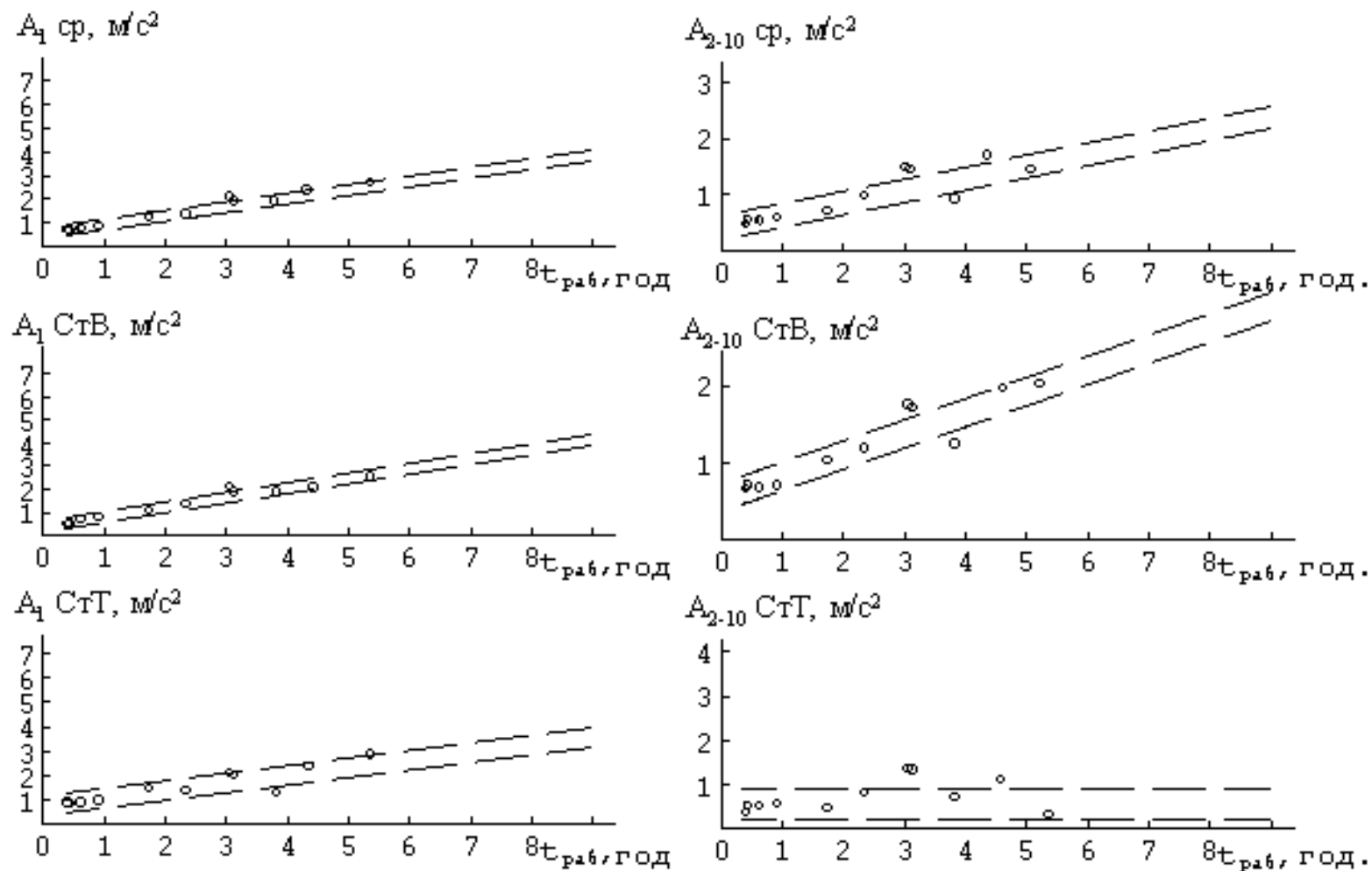
В полосе частот 200-1000Гц

A_{2-10cp} - СКЗ виброускорения, m/s^2 - среднее по 4-м точкам контроля

A_{2-10} Ст.В - СКЗ виброускорения, m/s^2 - среднее со Ст.В

A_{2-10} Ст.Т - СКЗ виброускорения, m/s^2 - среднее по точкам со Ст.Т.

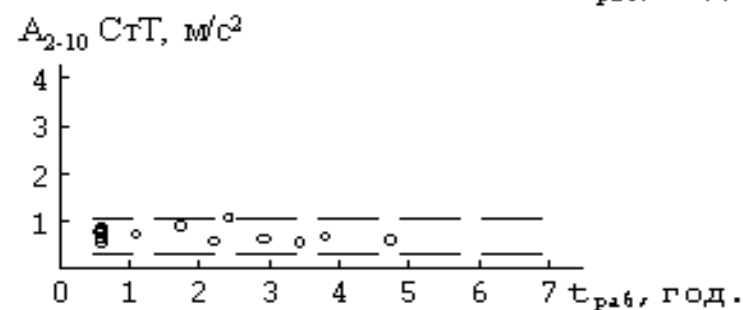
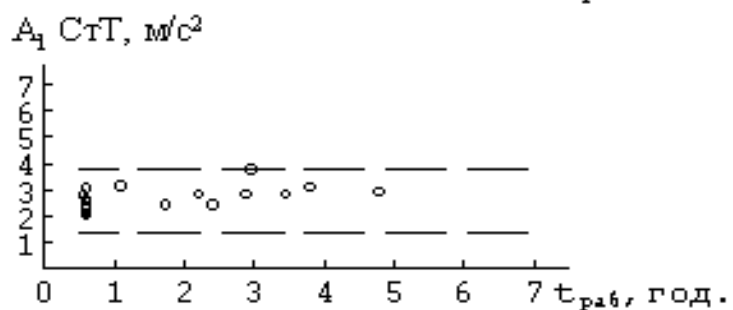
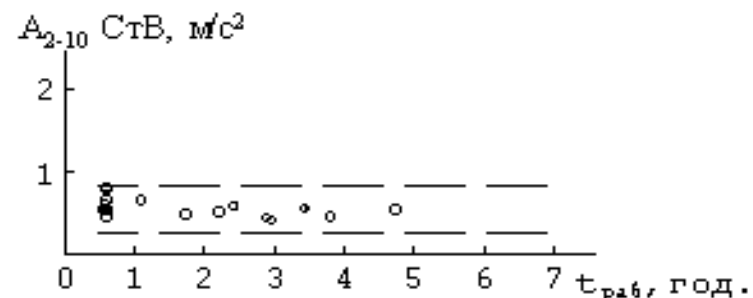
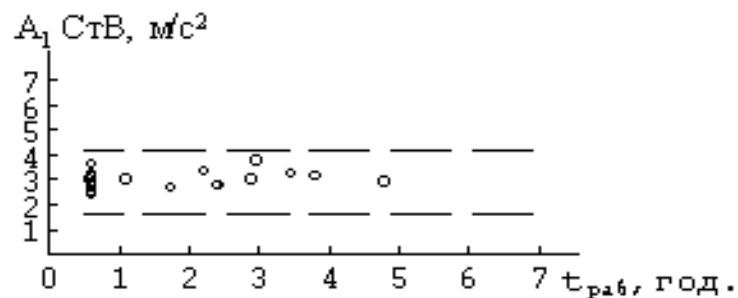
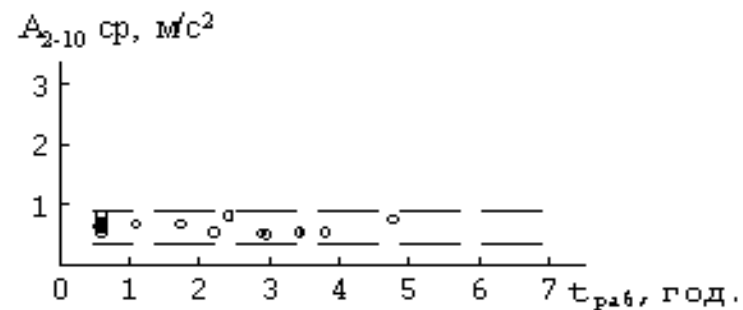
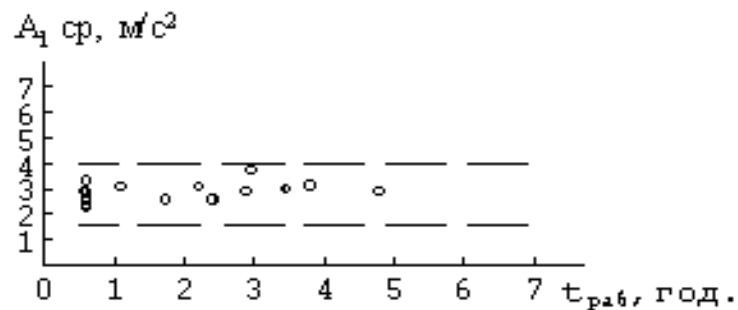
Рост вибрации статора с течением времени



A_1 - СКЗ виброускорения на частоте 100Гц

A_{2-10} - СКЗ виброускорения в полосе частот 200-1000Гц

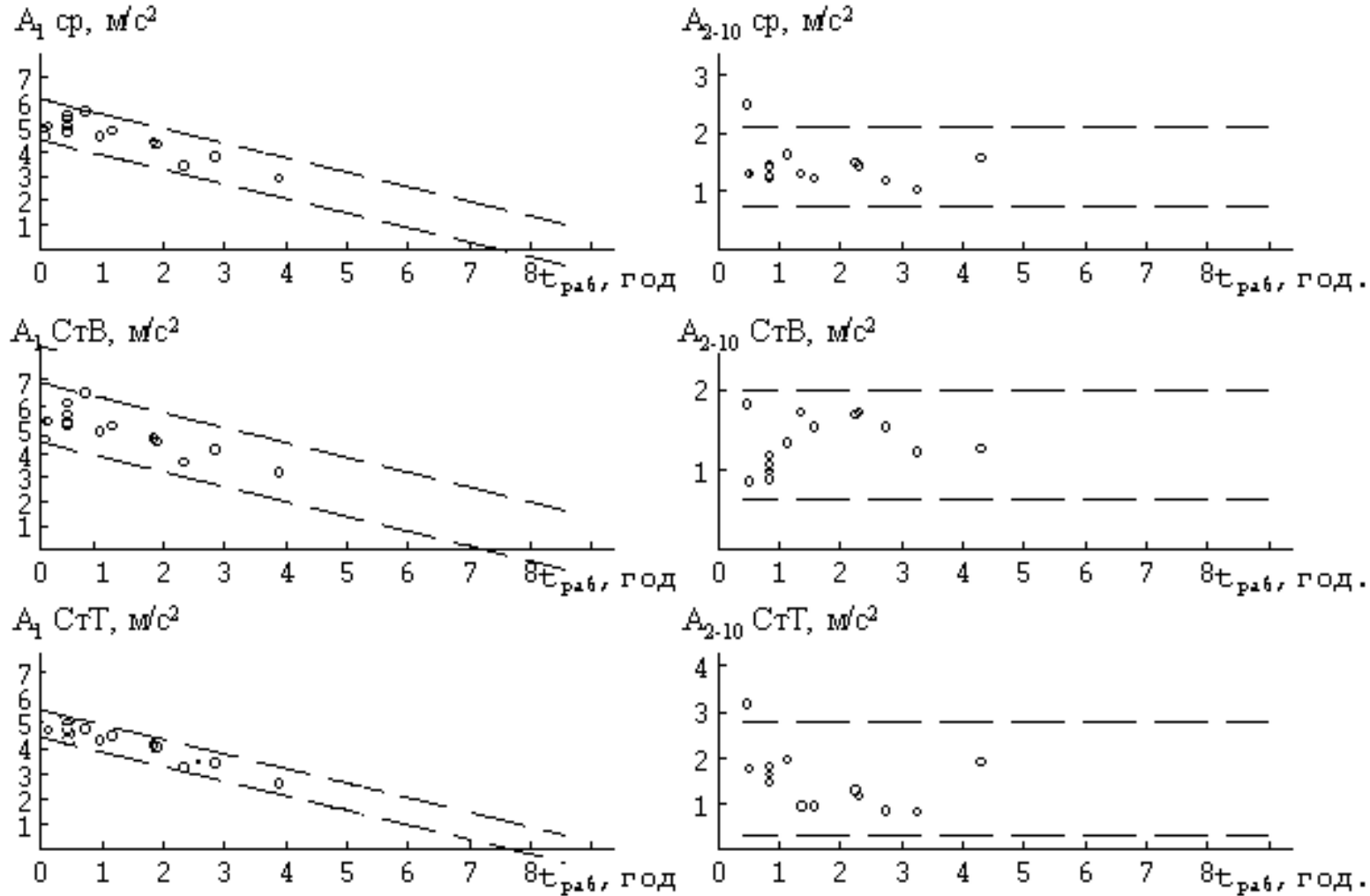
Отсутствие изменений вибрации статора



A_1 - СКЗ виброускорения на частоте 100Гц

A_{2-10} - СКЗ виброускорения в полосе частот 200-1000Гц

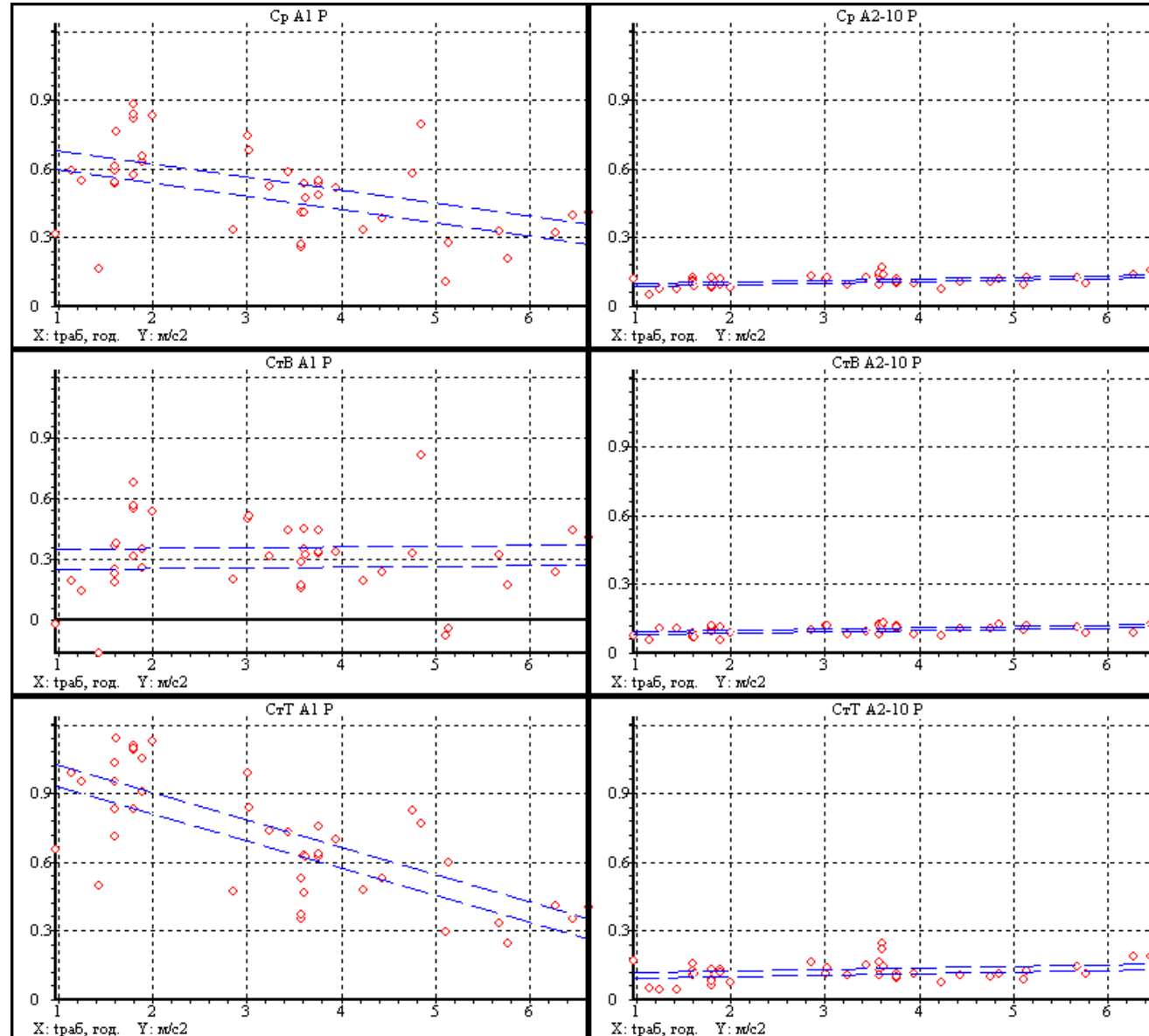
Снижение вибрации статора



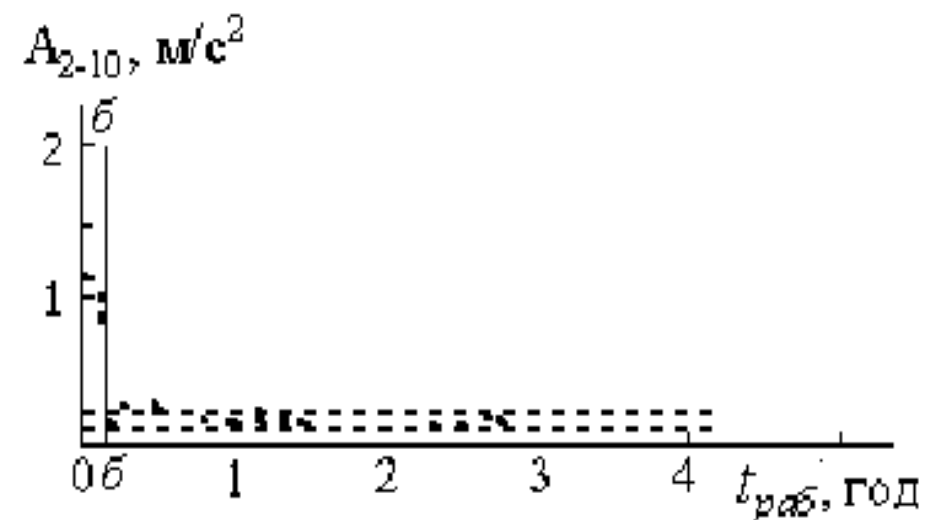
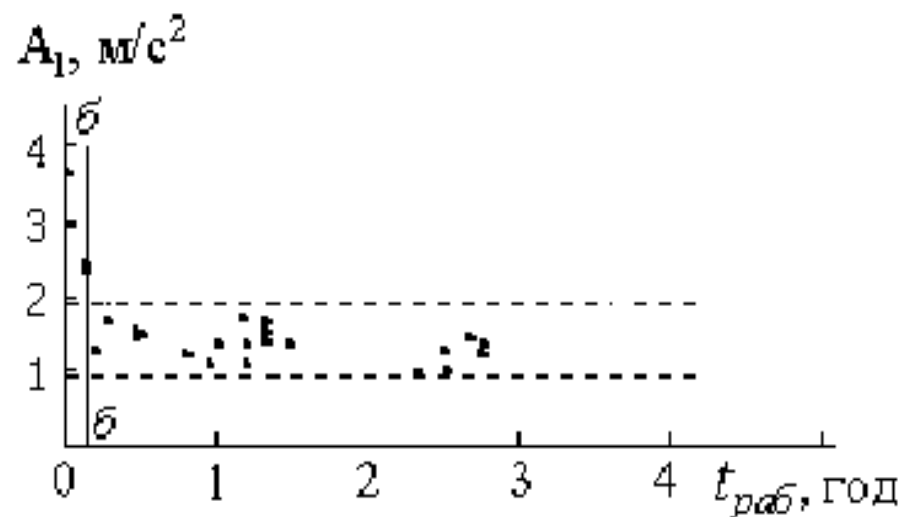
A_1 - СКЗ виброускорения на частоте 100Гц

A_{2-10} - СКЗ виброускорения в полосе частот 200-1000Гц

Разнонаправленные тенденции по сторонам статора

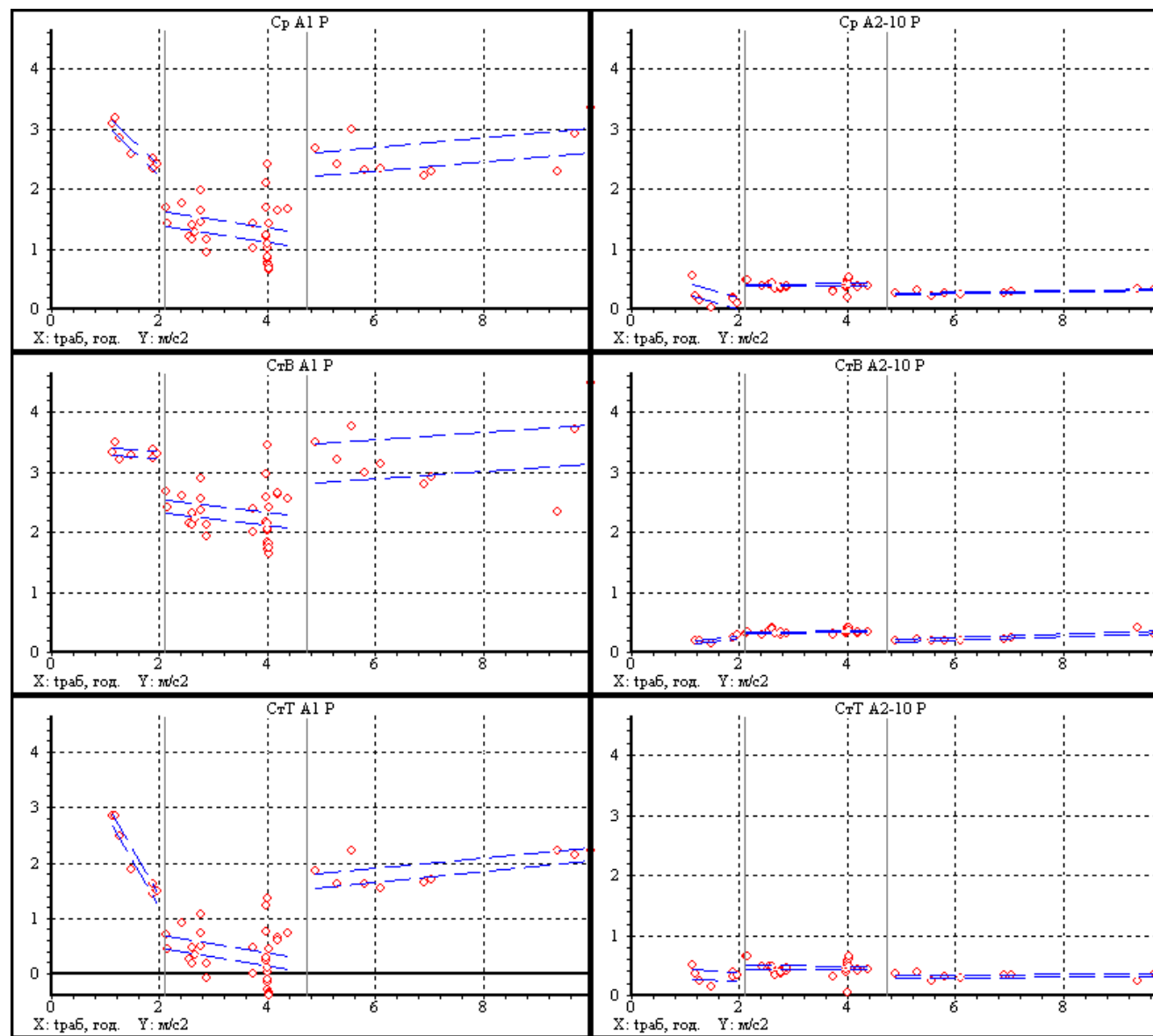


Изменение вибрации статора после восстановления крепления нажимной плиты сердечника

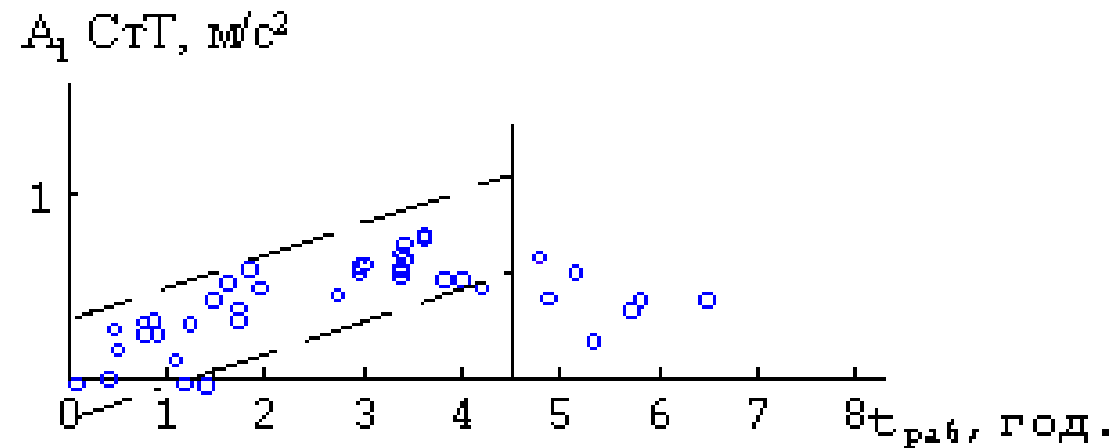
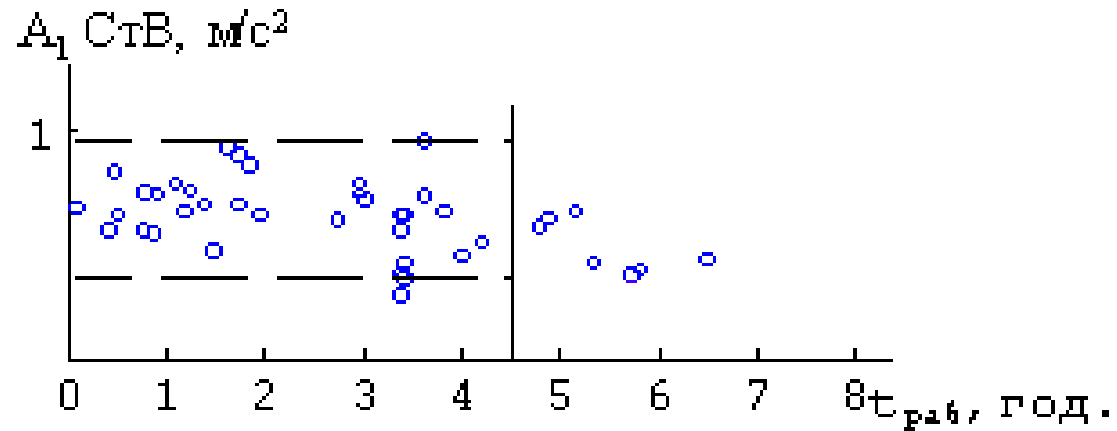


Линией «б-б» обозначена граница периодов измерений до и
после восстановления крепления нажимной плиты

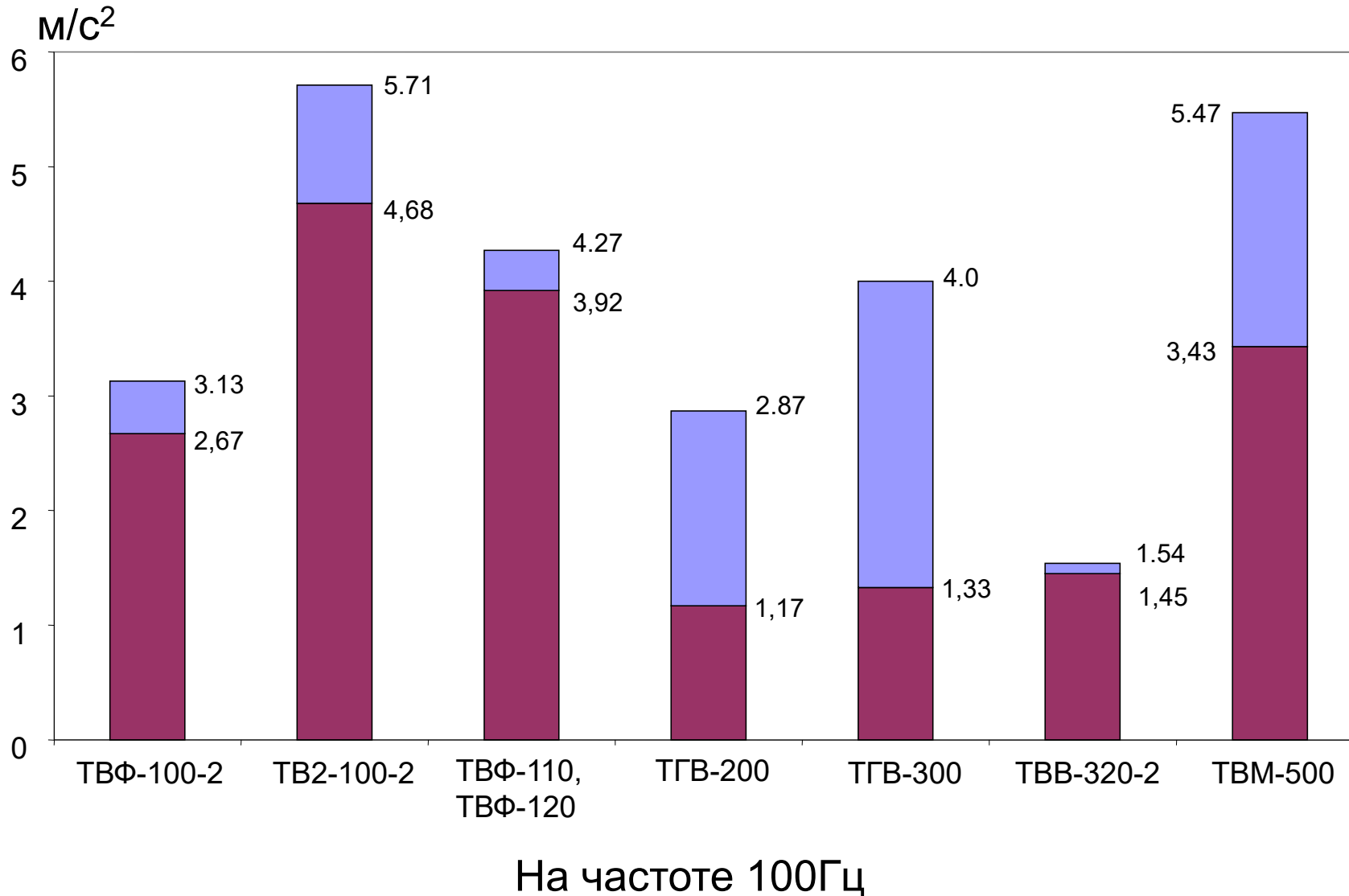
Изменения вибрации статора при двукратной замене ротора



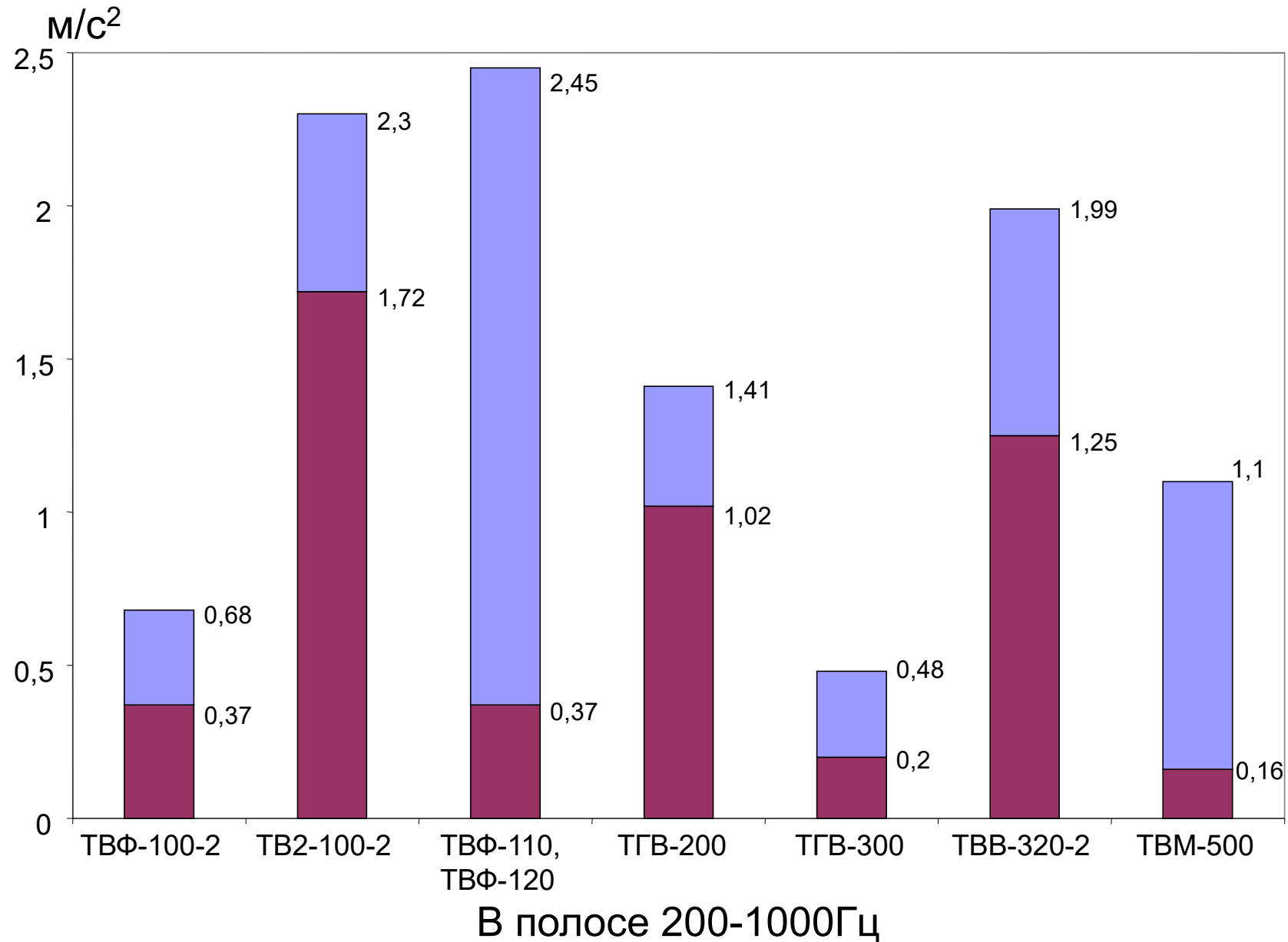
Изменение вибрации статора после устранения со стороны турбины (ст.Т) случайного контакта транспортного болта с сердечником



Ранжирование статоров по уровню вибрации



Ранжирование статоров по уровню вибрации



Оценка технического состояния

Регулярный контроль вибрационных параметров статора ТГ позволяет оценивать степень деградации механической системы статора.

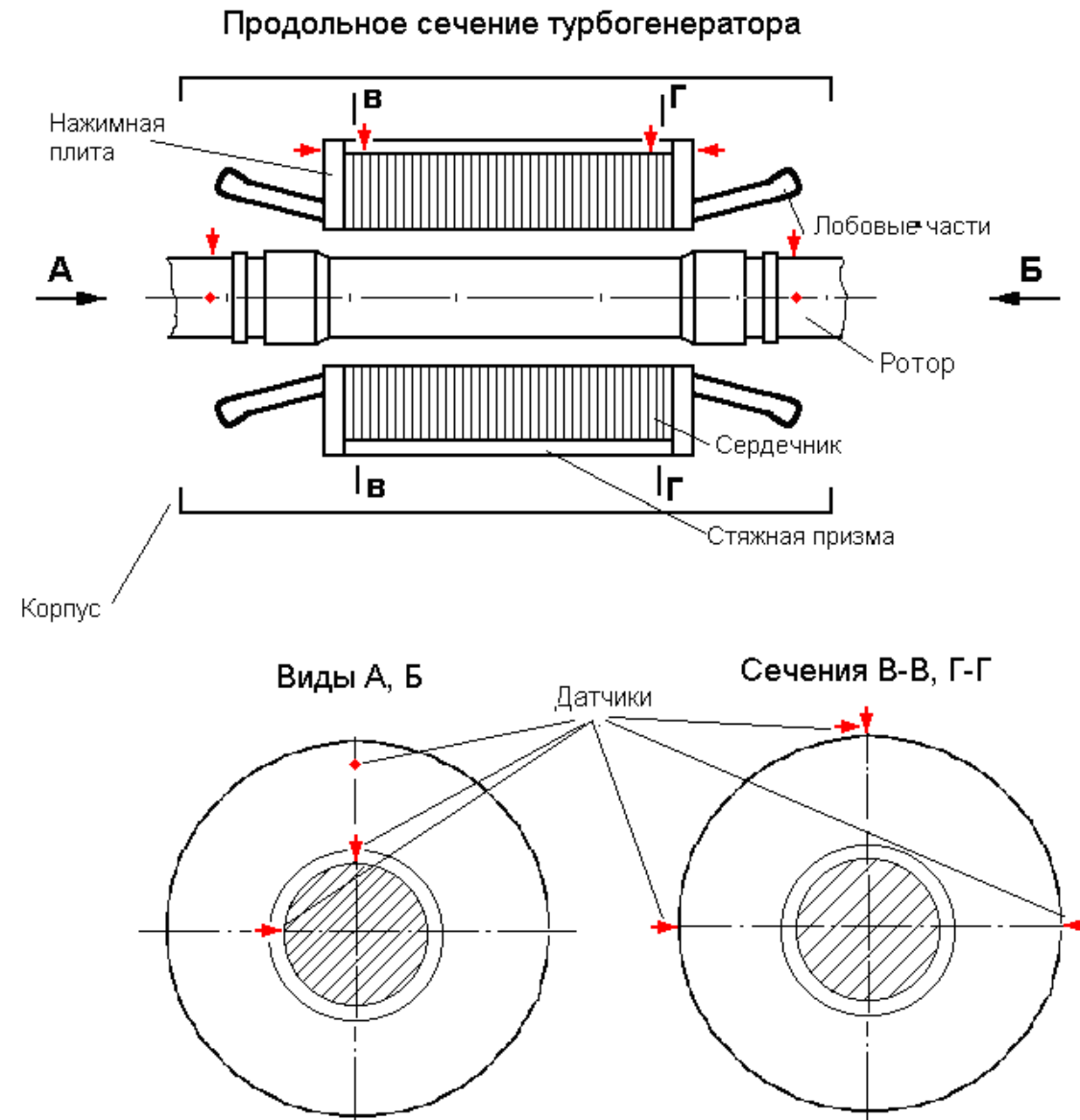
Оценка осуществляется через

- соотношение фактических уровней вибропараметров с контрольными значениями,**
- ранжирование по уровню вибрационных параметров однотипных статоров,**
- учёт скорости нарастания вибрационных параметров,**
- выявление локальных вибрационных аномалий.**

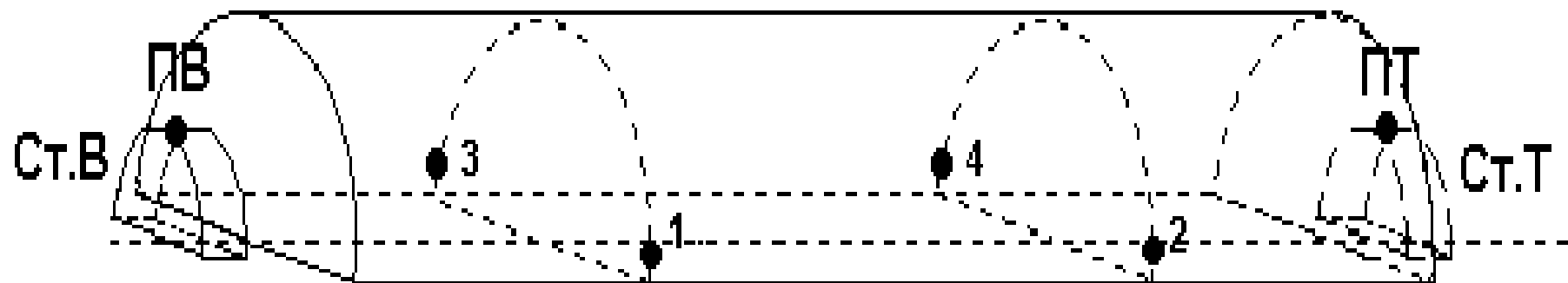
Об оснащении датчиками вибрации статоров турбогенераторов в интересах контроля их технического состояния

Оснащение статоров турбогенераторов стационарными датчиками вибрации существенно расширяет возможности и качество вибрационного контроля и открывает перспективы внедрения новых эффективных алгоритмов контроля технического состояния статоров.

Оптимальное оснащение статора ТГ датчиками вибрации



Упрощённое оснащение статора ТГ датчиками вибрации



Выводы

Регулярный контроль и анализ вибрационных сигналов на статоре турбогенератора позволяют:

- отслеживать монотонные и регистрировать скачкообразные изменения вибрационных параметров;
- выявлять и прогнозировать изменения состояния механической системы статора;
- ранжировать статоры по состоянию их механической системы;
- подбирать режимы эксплуатации турбогенераторов, при которых минимизируется скорость деградации механической системы статора;
- вырабатывать решения о проведении специальных обследований статора и затем на основе их результатов осуществлять своевременные ремонтные мероприятия.

Модальные исследования сердечника статора

Задачи:

1. Контроль собственных частот сердечника.
2. Контроль спресованности сердечника.

Сущность метода модальных исследований

Двухканальному спектральному анализу подвергаются сигналы возбуждения и отклика конструкции.

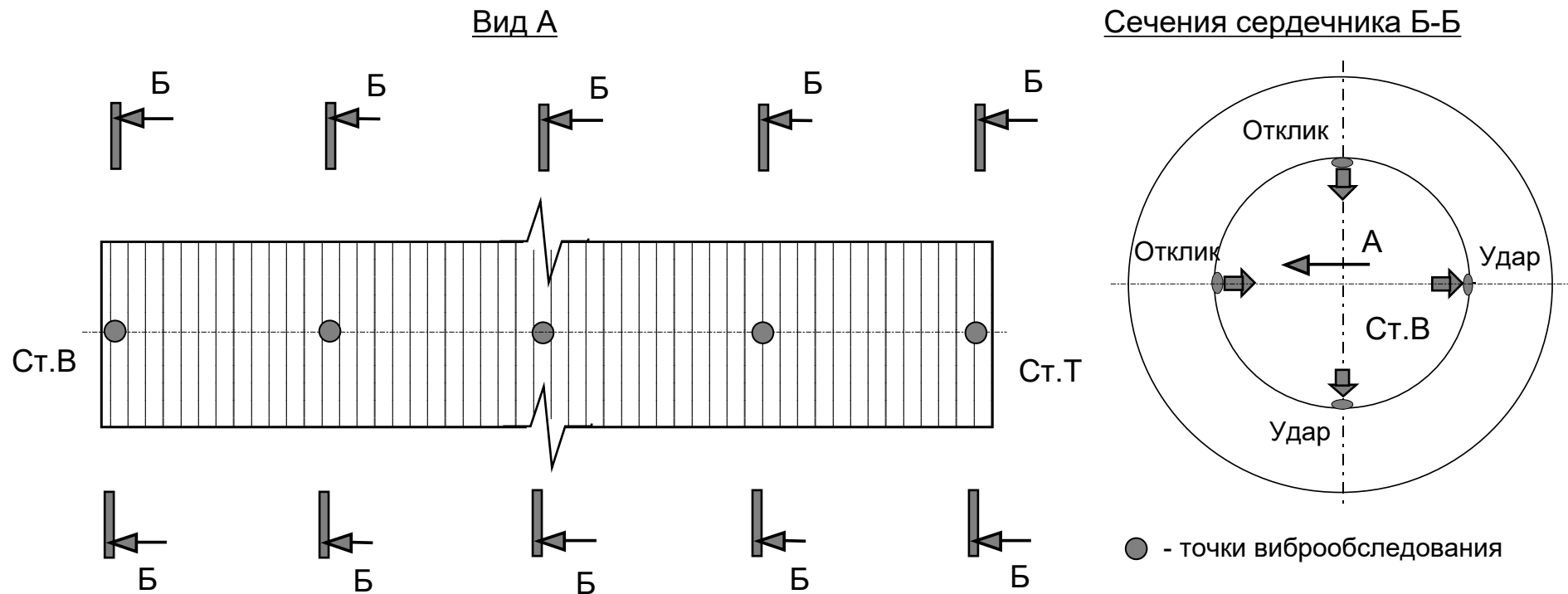
Определяются вибромеханические характеристики: **собственная частота колебаний** и **логарифмический декремент колебаний** – аналог коэффициента поглощения энергии колебаний.

Собственная частота колебаний характеризует жёсткость конструкции – способность сопротивляться деформации.

Логарифмический декремент характеризует скорость затухания колебаний. Чем больше логарифмический декремент, тем сильнее затухание.

Снижение резонансной частоты и повышение декремента колебаний свидетельствуют о снижении жёсткости и плотности сердечника статора.

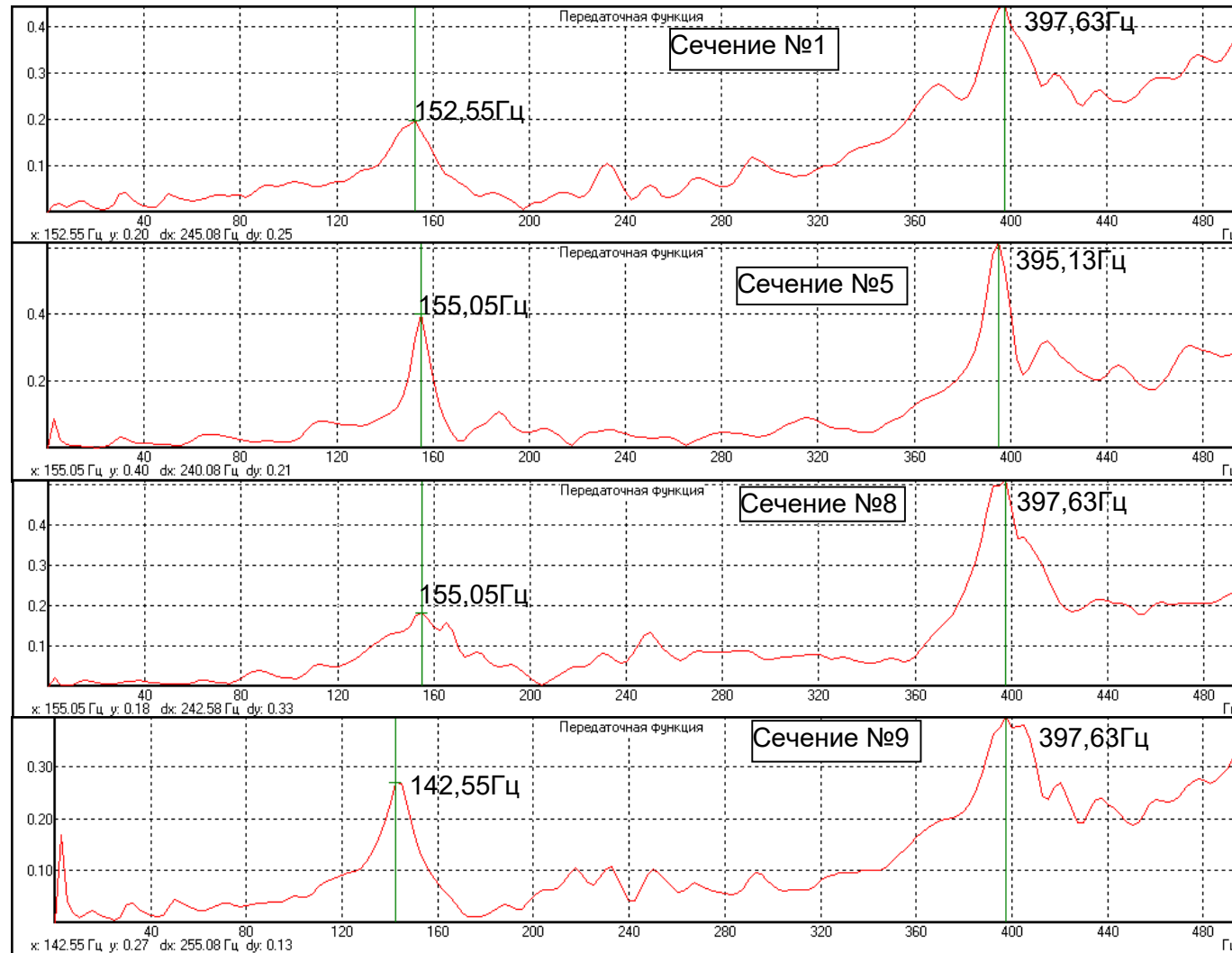
Схема вибрационного обследования сердечника статора



Модальные исследования сердечника

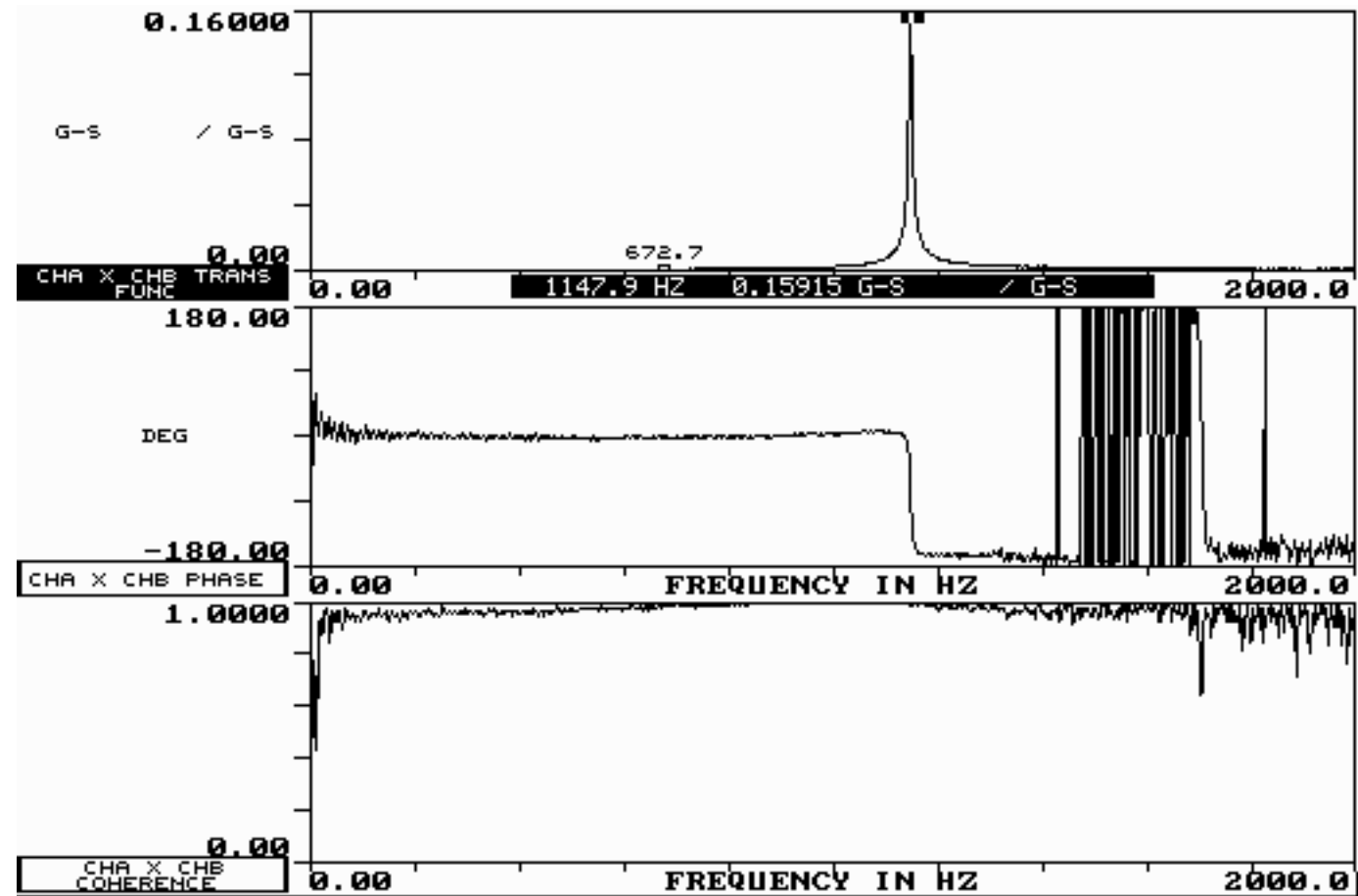


Передаточные функции в сечениях сердечника

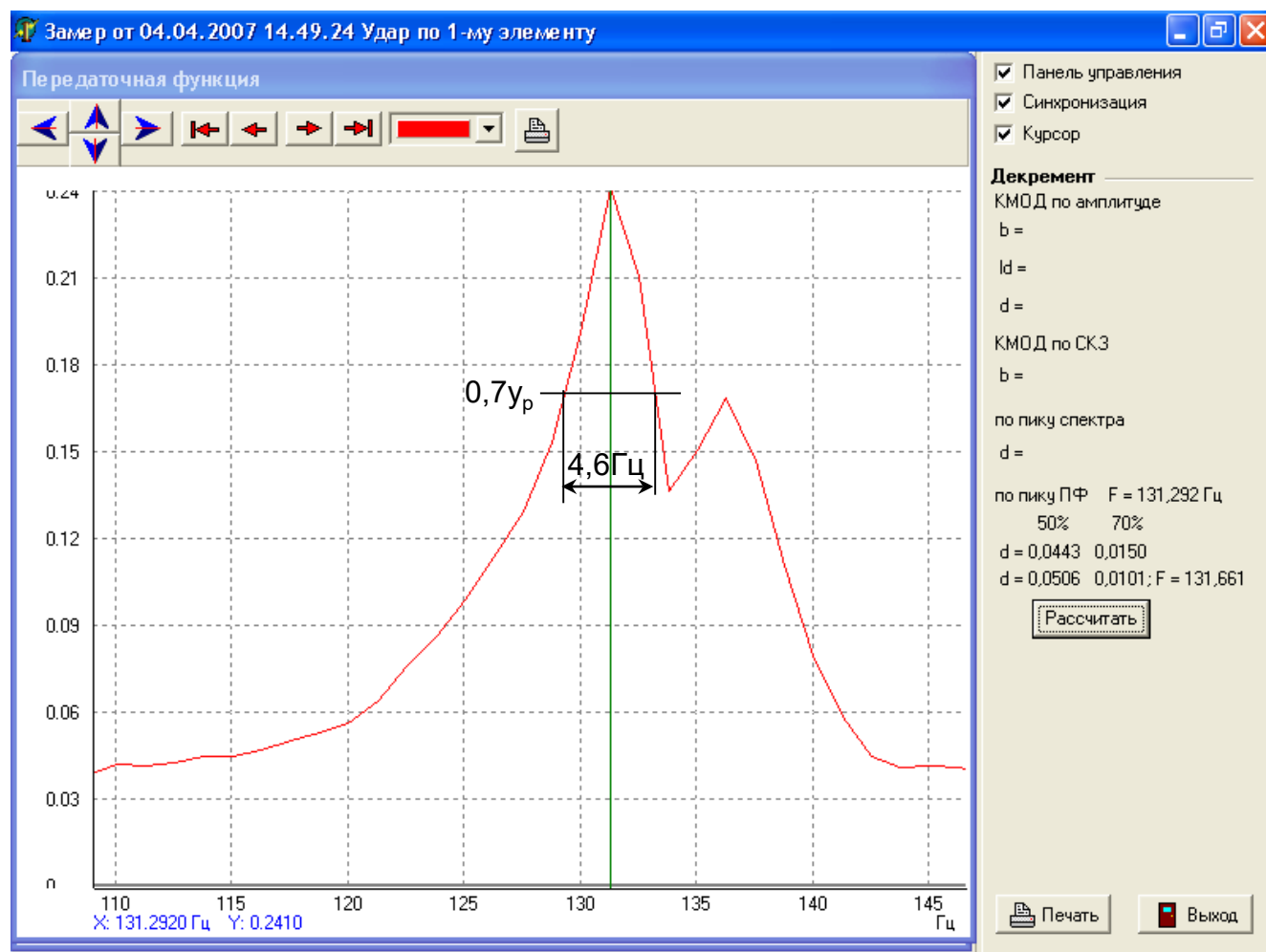


Логарифмический декремент колебаний $\delta = \Delta f / 2f_p$, где f_p – рез. частота,
 Δf - ширина рез. пика на уровне половинной мощности (0,7 уровня рез. пика)

Идентификация резонансного пика
передаточной функции с помощью функций взаимной фазы
и когерентности сигналов возбуждения и отклика



Расчёт декремента колебаний по параметрам резонансного пика



$\delta = \Delta f / 2f_p$,
 где f_p – рез. частота, Гц;
 Δf - ширина рез. пика
 передаточной функции на
 уровне половинной
 мощности (0,7 уровня рез.
 пика), Гц.

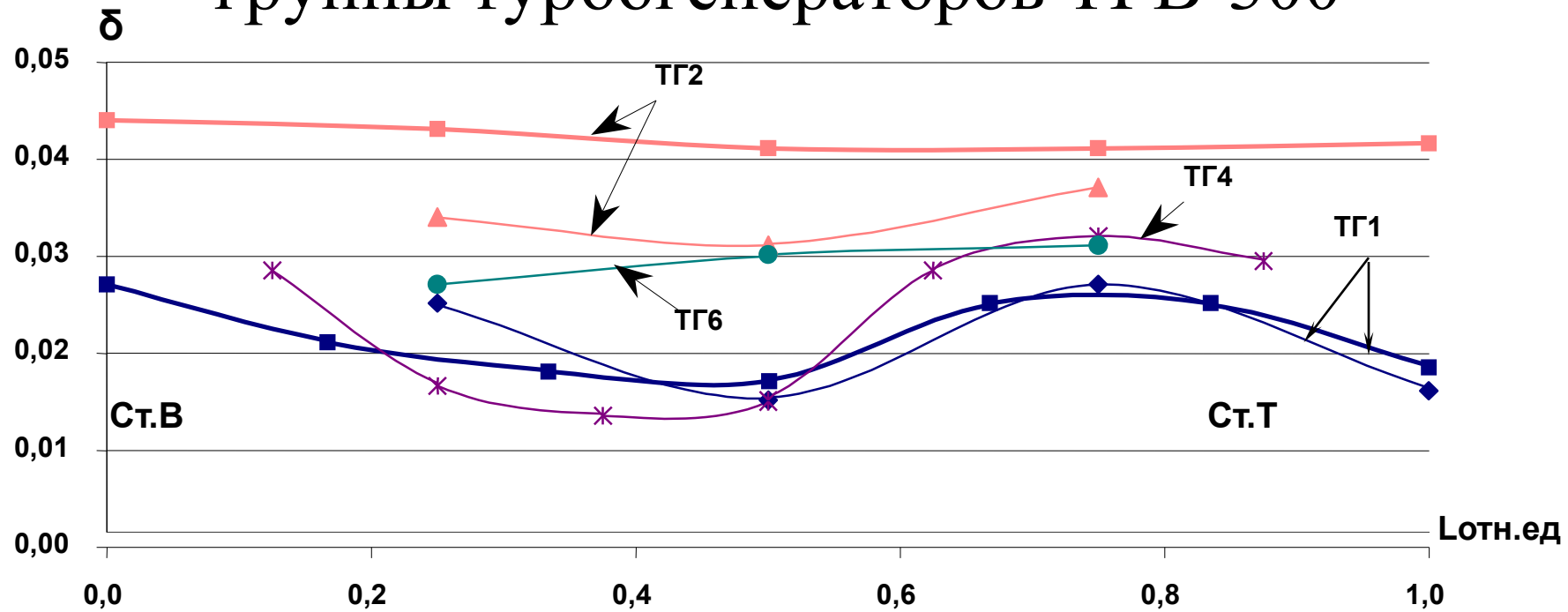
Логарифмический декремент колебаний – натуральный логарифм отношения двух последовательных максимальных или минимальных значений величины при затухающих свободных колебаниях. (ГОСТ24346 -80)

$$\delta = 0,5\Delta f/f_p = 0,5 \cdot 4,6/131,3 = \mathbf{0,0175}$$

Примеры результатов модальных исследований сердечников статоров

Полученные результаты подтверждают способность метода с помощью объективных параметров выявлять и контролировать процесс утраты сердечником статора ключевого для сохранения его работоспособности качества — плотности спрессованности активной стали.

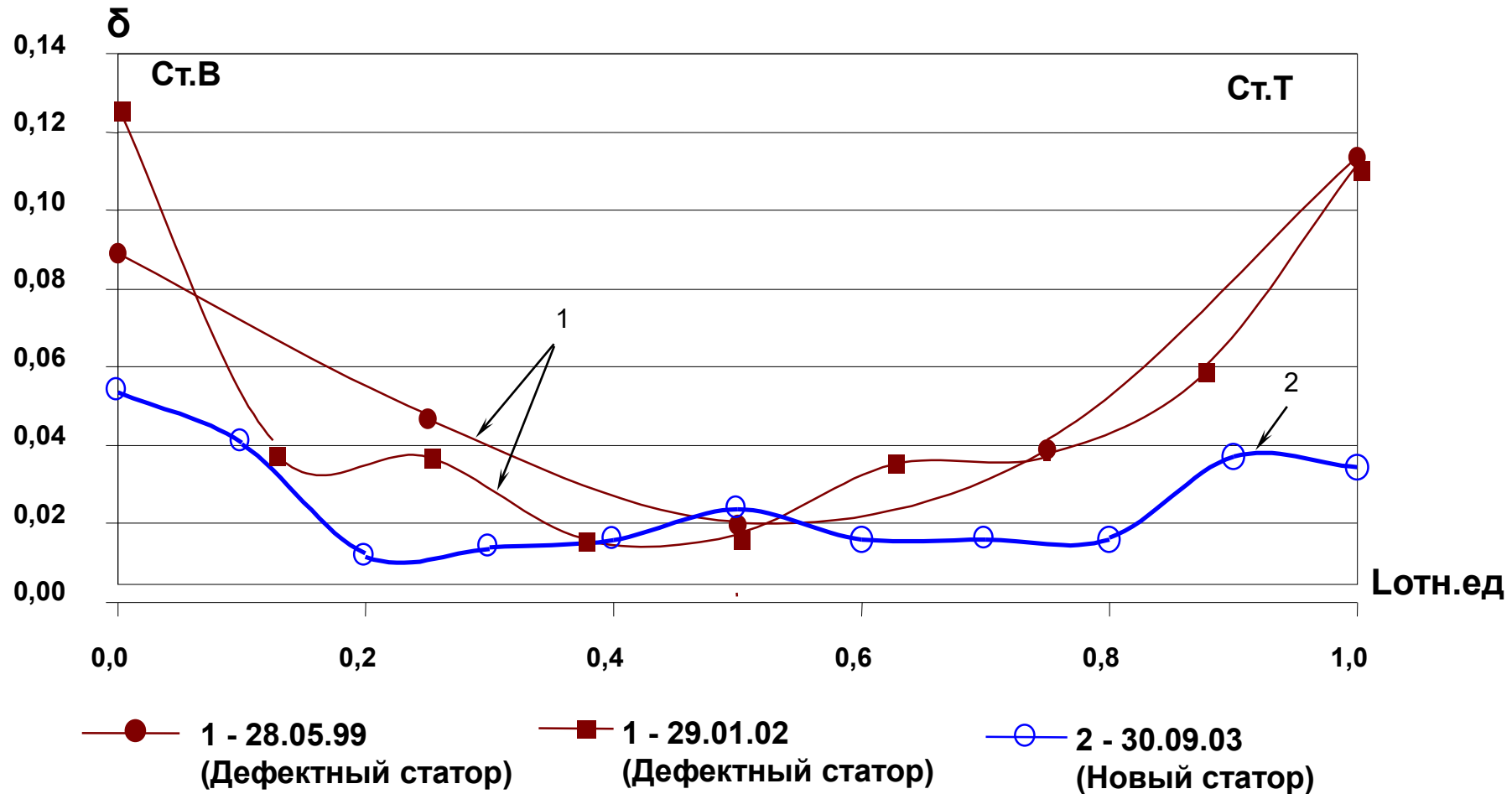
Декременты колебаний сердечников статоров группы турбогенераторов ТГВ-300



◆ ТГ1 -17.09.96
 ■ ТГ1 - 10.06.02
 ▲ ТГ2 - 15.04.96
 ■ ТГ2 - 20.08.98
✱ ТГ4 - 22.05.01
 ● ТГ6 - 20.03.97

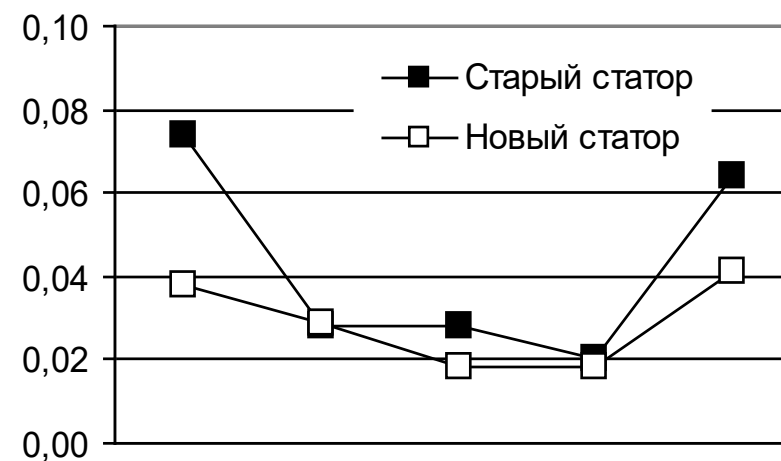
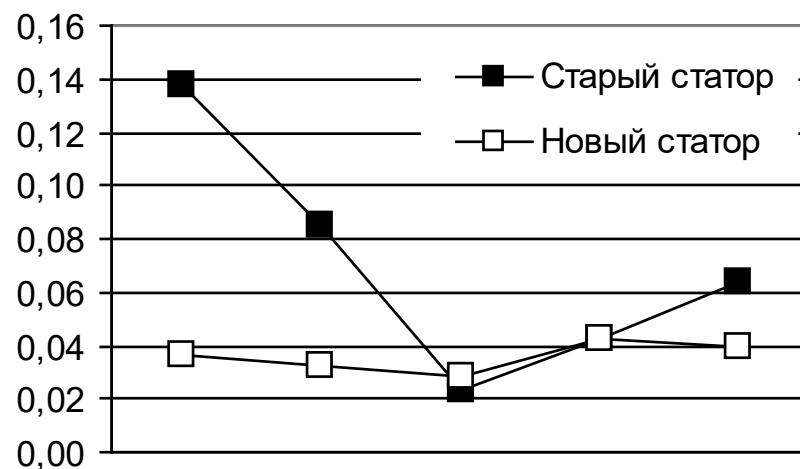
δ - декремент колебаний, L - длина сердечника статора,
 Ст.В – сторона возбuditеля, Ст.Т – сторона турбины

Сравнение декрементов колебаний дефектного и нового статоров



δ - декремент колебаний, L - длина сердечника статора, 1 -дефектный сердечник, 2 -сердечник нового статора, Ст.В – сторона возбуждителя, Ст.Т – сторона турбины

Сравнение декрементов колебаний сердечников заменённых и новых статоров турбогенераторов типа ТВВ-320-2



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !!

