

Министерство энергетики и электрификации СССР
Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский институт
имени Ф.Э.Дзержинского

В.И.ПЕТРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ И УСТРАНЕНИИ
ВИБРАЦИИ БЛОЧНЫХ ТУРБОАГРЕГАТОВ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971 г.

Министерство энергетики и электрификации СССР
Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский институт
имени Ф.Э.Дзержинского

На правах рукописи

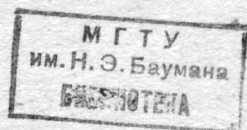
В.И.ПЕТРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ
И УСТРАНЕНИИ ВИБРАЦИИ БЛОЧНЫХ ТУРБОАГРЕГАТОВ

(05.189 Парогенераторостроение и турбостроение)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971 г.



Работа выполнена в Центральном конструкторском бюро "Глав-
энергоремонта" Министерства энергетики и электрификации СССР

Направляем Вам для ознакомления и отзыва _____ экз.
автореферата диссертации В.И. ПЕТРОВИЧА.

Научный руководитель - канд. техн. наук РУНОВ Б.Т.

Официальные оппоненты - доктор техн. наук МИРОНОВ В.Д.
канд. техн. наук ВАСИЛЬЕВА Р.В.

Ведущее предприятие - НИИ "Электросила".

Автореферат разослан _____ 1971 г.

Защита диссертации состоится _____ 1971 г. на засе-
дании Совета ВТИ г. Москва, Ж-68, Ленинская слобода, 28, в ау-
дитории института.

Заверенный и скрепленный печатью отзыв об автореферате
просим направить в адрес Совета в двух экземплярах.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВТИ.

Ученый секретарь
Совета

П.И. КИСЕЛЕВ

Надежность работы турбин, генераторов и электродвигателей в значительной степени определяются их вибрационным состоянием. Повышенная вибрация приводит к ускоренному износу и выходу из строя ответственных элементов машин (роторов, статоров, подшипников и т.д.).

В последнее десятилетие отечественная энергетика пополнилась блочными турбоагрегатами мощностью 300, 500 и 800 Мвт. С вводом в эксплуатацию этих машин пришлось проводить специальные вибрационные исследования (определение критических скоростей, динамической податливости опор и т.д.), для чего необходима виброизмерительная и балансирующая аппаратура, обеспечивающая высокую точность измерений.

Вибрационные измерения могут производиться, как при фиксированных числах оборотов (при балансировке, снятии контурных характеристик, определении зависимости вибрации турбоагрегата от его нагрузки и т.д.), так и при различных числах оборотов, например, при снятии скоростных характеристик.

Установление причин и устранение вибрации турбоагрегатов требует от приборов кроме высокой точности измерений еще и большую оперативность, так как время для проведения измерений часто бывает ограниченным, особенно при снятии скоростных характеристик.

Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей для мощных турбоагрегатов, вес роторов которых составляет десятки тонн, а длина — десятки метров, размах вибросмещения на подшипниках не должен превышать 30 мк.

Сложный спектр вибрации турбоагрегатов накладывает жесткие требования на частотные и фазочастотные характеристики виброисследовательских приборов. Спектр вибрации блочных турбоагрегатов не может быть с необходимой точностью измерен современными виброисследовательскими приборами из-за их ограниченного частотного диапазона, особенно на низких частотах. Поэтому необходимо расширить частотный диапазон этих приборов, что позволит снизить частотные и фазочастотные погрешности измерений параметров вибрации турбоагрегатов.

Современное состояние электроники позволяет создавать электронные блоки виброисследовательских приборов с достаточно широким частотным диапазоном и малыми погрешностями, поэтому их частотный диапазон и погрешности определяются характеристиками вибродатчиков.

Попытки расширения частотного диапазона вибродатчиков путем изменения их конструкций не приводили к желаемым результатам, особенно при расширении частотного диапазона в сторону низких частот (ниже 10-12 гц). При увеличении сейсмической массы или уменьшении жесткости пружин сейсмического подвеса происходит снижение верхней граничной частоты, уменьшение устойчивости, увеличение паразитной поперечной чувствительности и т.д.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию путей повышения точности измерений и расширению частотного диапазона виброисследовательских приборов для турбоагрегатов в область высоких и низких частот. Поставленная задача была решена с помощью введения в вибродатчик электромеханической положительной обратной связи по смещению (+ОСС).

Практическими результатами работы явилось создание виброисследовательских приборов, имеющих широкий частотный диапазон и высокую точность измерений параметров вибрации.

Работа состоит из введения, пяти глав и выводов.

В первой главе формулируются технические требования к приборам для вибрационных исследований турбоагрегатов, дается обзор и классификация этих приборов, и анализируются принципы построения измерительных блоков и вибродатчиков.

Современные виброисследовательские приборы должны иметь частотный диапазон от 8 до 300 гц при сдвиге фазы, не превышаю-

чем 20^0 в частотном диапазоне 15-300 гц. Если ввести обозначение:

$$D = \frac{f_v}{f_H} \quad (I)$$

где D - частотный диапазон виброисследовательских приборов;

f_H - частота первого резонанса сейсмической системы вибродатчика;

f_v - частота высшего резонанса сейсмической системы вибродатчика,

то для виброисследовательских приборов должно удовлетворяться условие:

$$D \geq 40$$

Анализ современных отечественных и зарубежных виброизмерительных приборов, имеющих вибродатчики с сейсмической системой, состоящей из плоских пружин, и электродинамическим преобразователем, показывает, что они имеют

$$D < 20$$

Из-за конструктивных особенностей сейсмических вибродатчиков их частотный диапазон начинается с 10-15 гц и простирается до 200-300 гц, но всегда $D < 20$. Снижение собственной частоты путем увеличения сейсмической массы или уменьшения жесткости пружин приводит к увеличению статического прогиба, что вызывает увеличение паразитной чувствительности к неизмеряемым компонентам вибрации, уменьшение устойчивости и надежности, снижение верхней граничной частоты.

Пьезоэлектрические вибродатчики не позволяют с достаточной точностью измерять вибрацию на низких частотах при небольших амплитудах. Кроме того, наличие двойного интегрирования увеличивает фазочастотные погрешности на низких частотах.

Проведенный анализ позволяет сформулировать задачи исследования.

Разработать новые виброисследовательские приборы, удовлетворяющие сформулированным нами в первой главе техническим требованиям.

Для решения этой задачи необходимо разработать и исследовать систему, позволяющую расширить частотный диапазон вибродатчиков (следовательно, и виброисследовательских приборов) в сторону высоких и низких частот.

Расширение частотного диапазона должно быть осуществлено путем снижения собственной частоты сейсмической системы вибродатчика без увеличения статического прогиба, снижения верхней граничной частоты и ухудшения других параметров.

Для увеличения точности измерений необходимо разработать систему контроля и калибровки виброисследовательских приборов в условиях электростанций.

Во второй главе исследуются и анализируются существенные методы коррекции частотных характеристик сейсмических систем вибродатчиков: пассивная электрическая и электромеханическая с отрицательной обратной связью по ускорению.

В работе проведен анализ частотных характеристик и погрешностей при использовании пассивной электрической коррекции. Электрическая коррекция преобразует параметры сейсмической системы f_1 и β_1 в требуемые параметры f_2 и β_2 с помощью 4-х полюсника, последовательно соединенного с вибродатчиком.

В процессе коррекции происходит перемножение частотных характеристик вибродатчика и корректирующего четырехполюсника

$$(S_1 V_1)(S_K V_K) = S_2 V_2 \quad (2)$$

где V_1 , V_K и V_2 - частотные характеристики вибродатчика, четырехполюсника и устройства, получаемого в результате коррекции;

S_1 , S_K и S_2 - коэффициенты пропорциональности, а также ослабление сигнала, вырабатываемого вибродатчиком, обратно пропорционально квадрату понижения собственной частоты:

$$u_2 = u_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (3)$$

где U_1 - напряжение, вырабатываемое вибродатчиком;

U_2 - напряжение, снимаемое с четырехполюсника;

f_1 и f_2 - собственные частоты системы до и после коррекции.

В работе показано, что применение электрической коррекции требует большой стабильности параметров сейсмической системы вибродатчиков и четырехполюсников, так как их незначительные изменения могут привести к большим амплитудно-частотным погрешностям. Значительное уменьшение сигнала не позволяет измерять малые уровни вибрации, а требования большой стабильности исключают возможность взаимозаменяемости вибродатчиков.

Снижение собственной частоты вибродатчика с помощью обратной связи по ускорению основано на том, что обратная связь осуществляется через дифференцирующий контур в вибродатчиках электродинамического типа или двойной дифференцирующий контур в вибродатчиках индуктивного и емкостного типа, т.е. к сейсмической массе прикладывается сила, пропорциональная виброускорению. Собственная частота и степень затухания сейсмической системы при отрицательной обратной связи по ускорению (-ОСУ) определяются из выражения:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m + \gamma}} ; \quad \beta_2 = \frac{h}{\sqrt{C(m + \gamma)}} \quad (4)$$

где C, m - коэффициент жесткости и масса сейсмической системы вибродатчика;

γ - коэффициент обратной связи по ускорению.

Уменьшение собственной частоты с помощью отрицательной обратной связи по ускорению сопровождается уменьшением чувствительности вибродатчика, так же как и при электрической коррекции.

На высоких частотах в дифференцирующем контуре изменяется сдвиг фазы, что приводит к изменению коэффициента обратной связи γ и увеличению амплитудно-частотных погрешностей. Кроме того, большая мощность, потребляемая катушкой обратной связи, ограничивает амплитудный диапазон измеряемой вибрации.

На основании проведенного анализа делается вывод, что перечисленные специфические особенности вибродатчиков с электрической коррекцией и с -ОСУ практически исключают возможность применения этих методов в балансировочной и виброисследовательской аппаратуре, предназначенной для работы в условиях электростанций.

Электрическая коррекция и электромеханическая с обратной связью по ускорению могут успешно применяться для измерения низкочастотной вибрации с большими амплитудами, например, гидрогенераторов, транспорта, строительных сооружений.

В третьей главе проводится исследование вибродатчиков с положительной обратной связью по смещению. Имеющиеся до сего времени опыты по применению положительной обратной связи по смещению (+ОСС) были безуспешными из-за возникновения в сейсмической системе автоколебаний, даже при незначительном снижении ее собственной частоты (на 30-50%).

В процессе наших исследований были выявлены причины возникновения автоколебаний и разработаны методика расчета, конструкции и схемы, позволяющие исключить возможность их возникновения при снижении собственной частоты вибродатчика примерно в пять раз.

Уравнение движения сейсмической системы вибродатчика с положительной обратной связью по смещению имеет вид:

$$\ddot{y} + 2\beta_1 \omega_1 \dot{y} + \omega_1^2 y = \ddot{E} \quad (5)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\frac{c - \alpha_1}{m}} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha}$ - собственная круговая частота вибродатчика с +ОСС;

ω_0 - собственная круговая частота вибродатчика без +ОСС;

α_1 - коэффициент обратной связи по смещению;

$\alpha = \frac{\alpha_1}{m}$ - приведенный коэффициент +ОСС;

$\beta_1 = \frac{h}{2\sqrt{m(c - \alpha_1)}} + \text{ОСС}$ - степень затухания вибродатчика с +ОСС.

Как видно из (5), +ОСС снижает собственную частоту вибродатчика и увеличивает степень затухания.

Коэффициент обратной связи α_1 , равен:

$$\alpha_1 = B_1 \cdot B_2 \cdot K_y \cdot K_u \quad (6)$$

где B_1, B_2 - прямой и обратный коэффициенты преобразования вибродатчика;

K_y, K_n - коэффициенты передачи усилителя и интегрирующего контура.

Приведенные зависимости справедливы для схемы с идеальным интегрирующим контуром, в котором сдвиг фаз $\varphi_c = 90^\circ$, и напряжение, вырабатываемое вибродатчиком с интегрирующим контуром, пропорционально только вибро смещению. В реальном интегрирующем контуре на низких частотах сдвиг фаз φ_c меньше 90° , и вектор обратной связи можно представить как сумму двух векторов, один из которых пропорционален вибро смещению, а другой - вибро скорости

$$\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_1' + j \bar{\alpha}_1'' \quad (7)$$

Тогда степень затухания и собственную частоту можно записать в виде:

$$\beta = \beta_1 - \frac{\alpha_1''}{2\sqrt{m(c - \alpha_1')}}; \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_1'} \quad (8)$$

Условием устойчивости такой системы будет

$$\beta_1 - \frac{\alpha_1''}{2\sqrt{m(c - \alpha_1')}} > 0 \quad (9)$$

Поэтому на низких частотах, когда $\varphi_c < 90^\circ$, при достаточно большом значении α_1 могут возникнуть автоколебания.

Для устранения возможности возникновения автоколебаний в вибродатчик с +ОСС была введена дополнительная обратная связь по скорости. Условие устойчивости в этом случае выражается зависимостью:

$$\beta_1 + \beta_2 > \frac{\alpha_1''}{2\sqrt{m(c - \alpha_1')}} \quad (10)$$

где β_2 - приведенный коэффициент отрицательной обратной связи по скорости.

Значение коэффициента β_2 можно сделать столь большим, что всегда будет выполнено условие устойчивости. Однако увеличение β_2 ограничивается допустимыми амплитудно- и фазочастотными погрешностями, вследствие чего для увеличения α , необходимо применять интегрирующий контур с большей постоянной времени, что позволяет снизить α_1'' .

В процессе исследований была испытана схема с емкостным вибродатчиком без интегрирующего контура и установлено, что на устойчивость системы существенным образом влияет нелинейность пружин вибродатчика и усилителей.

Коэффициент +ОСС в нелинейной системе можно представить в виде

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \alpha'(y) \quad (II)$$

где α_0 - коэффициент +ОСС, не зависящий от амплитуды вибрации;

$\alpha'(y)$ - коэффициент +ОСС, зависящий от амплитуды вибрации.

Условие устойчивости при параметрическом возбуждении вибродатчиков с +ОСС имеет вид:

$$\eta < \frac{\beta_1}{3K^2} \quad (I2)$$

где $\eta = \frac{\alpha'(y)}{\alpha_1}$ - относительная нелинейность;

$K = \frac{\omega_0}{\omega_1}$ - коэффициент понижения собственной частоты.

Таким образом, коэффициент обратной связи ограничивается не только фазовыми сдвигами, но и нелинейностью системы. На основании этого был сделан вывод, что для большего снижения собственной частоты необходимо применять вибродатчики с легкой сейсмической массой, пружинами с линейной силовой характеристикой и усилителями с малыми нелинейными искажениями.

Применение +ОСС позволило снизить собственную частоту разработанных нами вибродатчиков и расширить их частотный диапазон примерно в пять раз. Частотные характеристики вибродатчика с +ОСС и без нее изображены на рис. I.

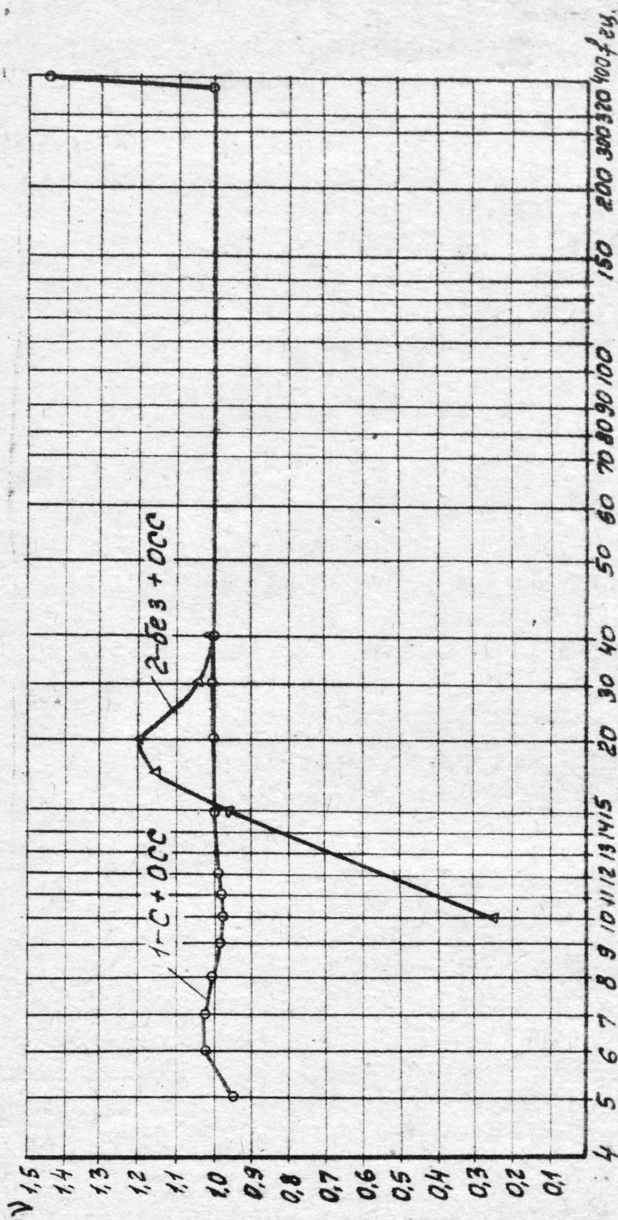


Рис. I. Амплитудно-частотные характеристики выродатчика с +0CC

Поскольку при $\omega = 0$, $\alpha_1 = 0$, снижение собственной частоты сейсмической системы не сопровождается увеличением ее статического провиса и снижением частот высших резонансов.

Положительная обратная связь не уменьшает чувствительности вибродатчика. Катушка обратной связи потребляет малый ток (несколько миллиампер), что облегчает режим работы усилителей и позволяет проводить измерения в широком диапазоне амплитуд.

В работе проведен анализ частотных погрешностей для вибродатчиков с +ОСС, возникающих на низких частотах из-за паразитной обратной связи по скорости. Паразитная обратная связь по скорости уменьшает степень затухания вибродатчика на низких частотах.

Полную степень затухания можно выразить как

$$2\beta(x) = 2\beta_1 - \frac{\kappa^2 - 1}{x^2 \omega_0 T_u} = 2\beta_1 - \frac{\theta}{x^2} \quad (13)$$

где $2\beta(x)$ - полная степень затухания, зависящая от частоты;

$2\beta_1$ - степень затухания вибродатчика, не зависящая от частоты;

κ - коэффициент понижения собственной частоты;

T_u - постоянная времени интегрирующего контура;

$x = \frac{\omega}{\omega_0}$ - относительная частота;

$\theta = \frac{\kappa^2 - 1}{\omega_0 T_u}$ - условный параметр вибродатчика с +ОСС.

В этом случае модуль частотной характеристики V будет

$$|V| = \frac{x^2}{\sqrt{(1-x^2)^2 + (2\beta_1 - \frac{\theta}{x^2})^2 x^2}} \quad (14)$$

При увеличении κ (следовательно, параметра θ) увеличиваются отрицательная частотная погрешность на частотах $x > 1$ и положительная на $x < 1$ (рис. 2).

Значение частот, на которых отрицательная и положительная погрешности максимальны, можно определить, если принять полную степень затухания $2\beta(x) = 1$ при $x = 1$

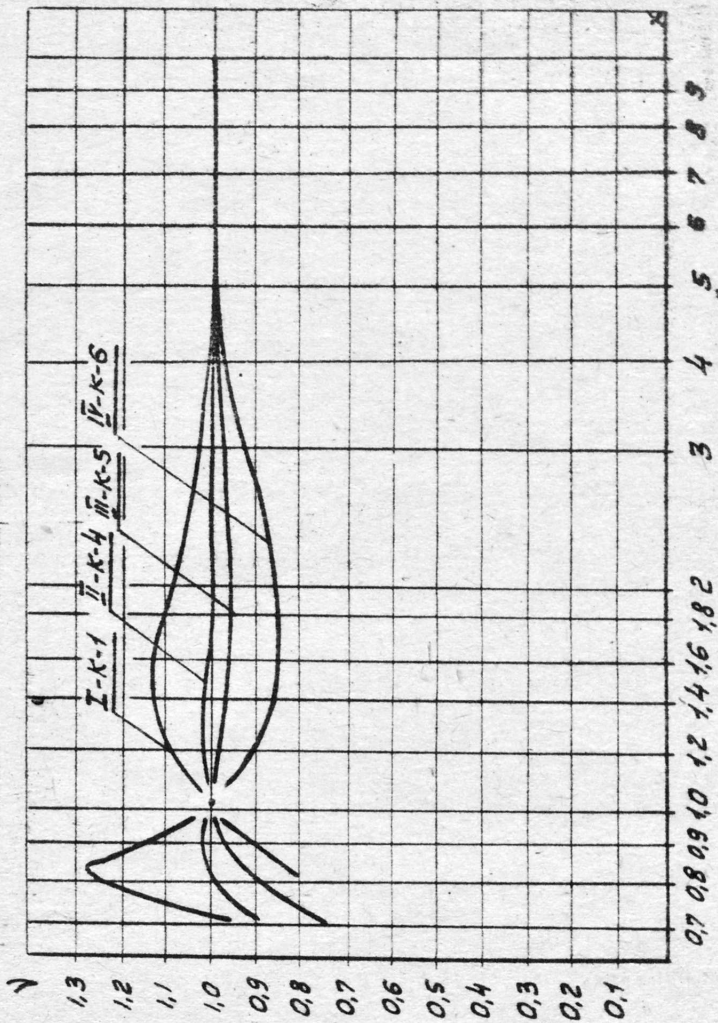


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики вибростатика с +00С при различных "К".

$$X_{1,2} = \sqrt{\frac{2\theta(\theta+1)-1}{\theta(\theta+2)-1} \pm \sqrt{\left[\frac{2\theta(\theta+1)-1}{\theta(\theta+2)-1}\right]^2 - \frac{3\theta^2}{\theta(\theta+2)-1}}} \quad (15)$$

Максимальные частотные погрешности на частотах X_1 и X_2 , зависящие от θ , можно определить по формуле:

$$\delta V_{1,2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - BC}}{\sqrt{[B - (A \pm \sqrt{A^2 - BC})]^2 + \frac{[(\theta - 1)(A \pm \sqrt{A^2 - BC}) - \theta B]^2 B}{A \pm \sqrt{A^2 - BC}}}} = K \quad (16)$$

где $A = 2\theta(\theta+1)-1$; $B = \theta(\theta+2)-1$; $C = 3\theta^2$

Графики зависимостей δV от θ , рассчитанные по формуле (16) на ЭЦМ, изображены на рис. 3, из которого видно, что δV_1 и δV_2 минимальны при $0,3 \leq \theta \leq 0,5$.

Постоянная времени интегрирующего контура τ_u может быть выбрана из следующего соотношения:

$$\frac{\kappa^2 - 1}{\omega_0 v_{\max}} \leq \tau_u \leq \frac{\kappa^2 - 1}{\omega_0 v_{\min}} \quad (17)$$

где $v_{\max}$ и $v_{\min}$ определяются при заданных частотных погрешностях $\delta V_{1,2}$ из графиков (рис. 3), либо приближенно по упрощенной формуле:

$$0,4(1 + 2\delta V)^2 \geq \theta \geq 0,4(1 - 2\delta V)^2 \quad (18)$$

Как видно из графика зависимости $\delta V_{1,2}$ от θ (рис. 3), при правильно выбранных значениях θ можно получить частотную характеристику сейсмической системы вибродатчика с погрешностью $\delta V\% < 2\%$.

Выбор между $v_{\max}$ и $v_{\min}$ осуществляется, исходя из допустимого отношения сигнала к шуму и допустимого сдвига фазы $\Delta \varphi$:

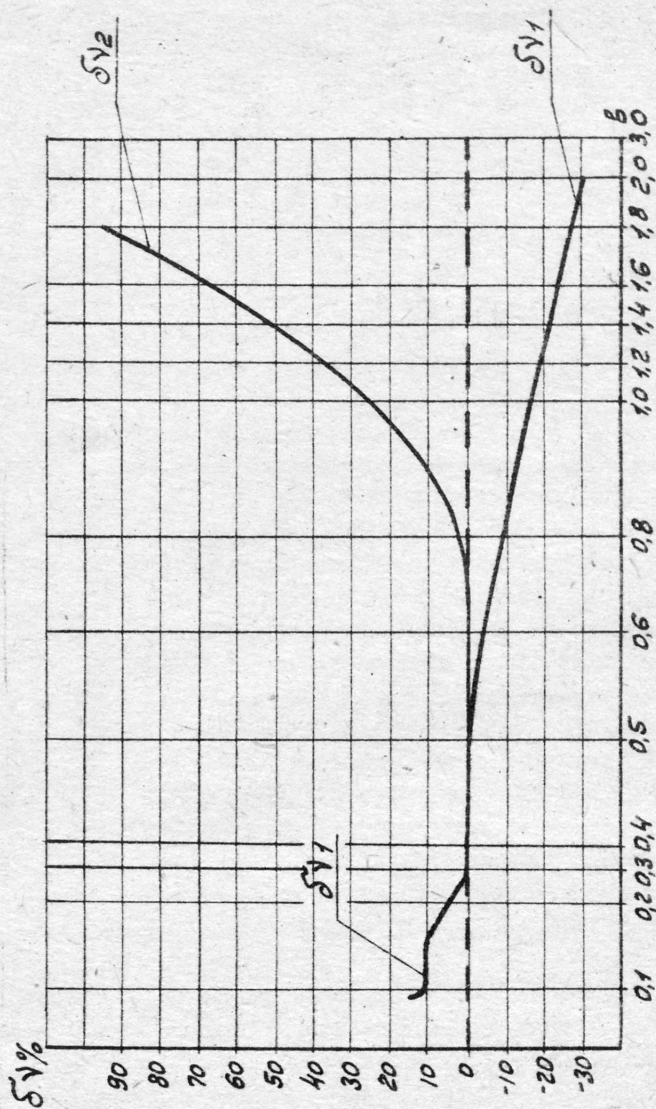


Рис. 3. Графики зависимостей максимальных погрешностей от "B"

$$\Delta \varphi = \arctg \frac{\frac{\theta}{x}(1-x^2)^2}{(1-x^2)^2 + x^2(\theta+1) - \theta} \quad (19)$$

В работе проведен анализ стабильности вибродатчиков с +ОСС.

За критерий стабильности было принято изменение собственной частоты вибродатчика с +ОСС от изменений параметров вибродатчика и усилителя

$$\delta f_1 = \frac{\kappa^2}{2} \delta(\omega_0; B_1; B_2; K_u; K_y) \quad (20)$$

где $\delta(\omega_0; B_1; B_2; K_u; K_y)$ - изменение параметров цепи обратной связи;

δf_1 - относительное изменение собственной частоты вибродатчика с +ОСС.

Из выражения (20) следует, что нестабильность собственной частоты вибродатчика с +ОСС в $1/2 \kappa^2$ раз больше нестабильности в цепи обратной связи. Поэтому в вибродатчиках с +ОСС необходимо применять усилители, нестабильность которых не превышает $\pm 1\%$. Такие усилители реально осуществимы при применении схем на кремниевых транзисторах с глубокими отрицательными обратными связями.

Для исключения влияния на частотную погрешность астатической нестабильности устройства желательно принимать начало частотного диапазона 15-20% выше собственной частоты ω_1 .

Для уменьшения влияния температуры на параметры вибродатчика в них введены компенсирующие цепочки, состоящие из активных сопротивлений и термосопротивлений.

В четвертой главе изложены результаты исследований и разработки методов и схем электрической калибровки вибродатчиков с +ОСС.

Если в вибродатчиках без обратной связи изменение их электрических параметров, а также параметров измерительного блока не влияет на параметры сейсмической системы (собственную частоту и степень затухания), в вибродатчиках с +ОСС параметры сейсмической системы зависят от электрических параметров вибродатчиков и электронной схемы цепи обратной связи. Поэтому в балансировочных и виброизмерительных приборах должна быть предусмотрена возмож-

Таблица I

Тип прибора	Для синусоидальной вибрации			Для полигармонической вибрации			Поперечител. в %	Допуск-ное уско-рение	Диапаз-имое изме-ряемой амплит. мк	Час-отная погреш-ность %	Тем-пера-тур. погреш-ность %	Вес при-бора	
	f_H гц	f_B гц	$D \delta 2A\%$	f_H гц	f_B гц	$D \delta 2A\%$						изме-рит. ро-блок	вио-дат-чик
с БИП-5 ВД -4	14	190	13 ± 10 (х)	35	190	5,5 ± 23	5	6	5+1000	± 5 ± 10 (хх)	± 2	12	I
с БИП-5М ВД -5	12	200	17 ± 10 ± 15 (х)	30	200	7 ± 13	5	6	5+1000	± 5 ± 10 (хх)	± 2	12	0,5
с ПКВ-1 ВДК-2	7	300	43 ± 8 ± 12 (xxx)	17	300	18 ± 12	4	6	2+500	± 3 ± 8 (хх)	± 2	10 ^{xxxx}	0,5
с БИП-6 ВД -6	5,5	390	71 ± 6 ± 8 (х)	12	390	38 ± 10	3	6	2+1000	± 3 ± 8 (хх)	± 2	6	0,5

- х) - Приведенная погрешность с полосовым и фильтрами
 хх) - Частотная погрешность с полосовыми фильтрами
 xxx) - Приведенная погрешность при измерении анализатором гармоник
 xxxx) - Вес преобразовательного восьмиканального блока

1565262

ность их калибровки в условиях электростанций без применения вибростендов.

Наличие в вибродатчиках с +ОСС катушки обратной связи позволяет осуществлять электрическую калибровку приборов, что практически невозможно в вибродатчиках без обратной связи. Для калибровки на катушку обратной связи подается стабилизированное по амплитуде напряжение от сети переменного тока с частотой 50 гц, под действием которого сейсмическая масса совершает колебательное движение с частотой 50 гц.

По определенному с помощью электрической калибровки значению погрешности $\delta 2\%$ можно вычислить изменение собственной частоты сейсмической системы при изменении электрических параметров

$$f_2 = f_1 \left(1 + \frac{\kappa^2}{2} \cdot \frac{\delta 2\%}{100} \right) \quad (21)$$

Применение электрических калибровочных устройств в разработанных нами приборах БИП-6 и ПКВ-1 дало хорошие результаты: погрешность калибровки электрическим методом не превышала $\pm 3\%$.

В пятой главе описаны разработанные нами балансировочные и виброисследовательские приборы, в которых применены вибродатчики с +ОСС; приведены сравнительные характеристики приборов с вибродатчиками с +ОСС типа БИП-6 и ПКВ-1 с прибором БИП-5, имеющим вибродатчики без +ОСС.

В то время, как динамический частотный диапазон прибора БИП-5 $D < 18$ (от 12 до 200 гц), а первый амплитудный диапазон от 5 до 50 мк, новый виброисследовательский прибор ПКВ-1 имеет $D \approx 40$ (от 8 до 320 гц) и первый амплитудный диапазон $D \approx 63$ (от 6 до 380 гц) и аналогичный ПКВ-1 амплитудный диапазон. Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице I.

ВЫВОДЫ

1. Решение проблемы обеспечения надежности эксплуатации крупных паровых турбоагрегатов связано с проведением комплексных вибрационных исследований, требующих применения аппаратуры с частотным диапазоном измерений полигармонической вибрации от 15 до 350 гц и синусоидальной вибрации от 6-8 гц.

Применяемые в отечественной энергетике виброисследовательские приборы имеют диапазон измерений полигармонической вибрации от 30-40 до 150-200 гц и синусоидальной вибрации от 12-15 гц. Поэтому для удовлетворения современных требований к виброисследовательским приборам их частотный диапазон измерений должен быть расширен как в область низких, так и в область более высоких частот.

2. Частотный диапазон виброизмерительных приборов лимитируется динамическими характеристиками сейсмических систем вибродатчиков.

Расширение частотного диапазона в сторону низких частот путем изменения конструкции сейсмической системы сопровождается снижением верхней граничной частоты измеряемого диапазона, уменьшением устойчивости сейсмической системы, повышением ее чувствительности к неизмеряемым компонентам вибрации и сокращает срок службы вибродатчика.

Поэтому более рациональным путем расширения частотного диапазона вибродатчиков в сторону низких частот является использование специальных корректирующих устройств.

3. Проведенный анализ показал существенные недостатки используемых до последнего времени схем улучшения частотных характеристик вибродатчиков при применении их в виброисследовательских приборах с помощью электрической коррекции (пассивного четырехполюсника, соединенного последовательно с вибродатчиком) и с помощью электромеханической коррекции путем применения отрицательной обратной связи по ускорению.

Расширение частотного диапазона вибродатчиков с помощью электрической коррекции сопровождается значительным уменьшением ^{их} чувствительности (повышением нижнего предела измеряемых амплитуд вибрации), увеличением погрешности в области резонанса

и делает невозможным подключение к одному измерительному блоку нескольких вибродатчиков.

Снижение собственной частоты вибродатчиков с помощью отрицательной обратной связи по ускорению сопровождается снижением верхней граничной частоты измеряемого диапазона, значительным снижением их чувствительности и уменьшением устойчивости вибродатчика в области высоких частот.

4. Наиболее целесообразным методом расширения частотного диапазона вибродатчиков является коррекция их частотных характеристик с помощью положительной обратной связи по смещению.

Применение положительной обратной связи по смещению позволяет расширить частотный диапазон виброизмерительных приборов в 5 и более раз без ухудшения остальных характеристик и без снижения чувствительности вибродатчика.

5. Детальный анализ схем коррекции характеристик вибродатчиков с помощью положительной обратной связи по смещению позволил разработать оптимальные условия и границы ее применения и создать наиболее целесообразную конструкцию вибродатчиков.

6. Важным преимуществом вибродатчиков с положительной обратной связью по смещению является возможность их калибровки в эксплуатационных условиях без вибростендов.

7. На основе разработанных вибродатчиков с положительной обратной связью по смещению были созданы виброисследовательские приборы типа БИП-6 и ПКВ-1, обладающие значительно расширенным частотным диапазоном.

Сравнительные испытания этих приборов (таблица 1) и опыт эксплуатации на электростанциях (Назаровская ГРЭС, Каширская ГРЭС и др.) убедительно показали их преимущества перед аналогичными приборами с некорректированными вибродатчиками.

Широкое внедрение разработанного метода расширения частотного диапазона виброисследовательской аппаратуры позволит решить проблему обеспечения отечественной энергетики надежными приборами, применение которых сократит время простоев крупных турбоагрегатов при проведении исследовательских и наладочных работ.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. ПЕТРОВИЧ В.И. Виброизмерительный прибор БИП-5. Сб. "Уравновешивание роторов энергетических машин", г.Москва, 1962 г., изд-во "Энергия".
2. ПЕТРОВИЧ В.И. Стробоскоп с искусственным сдвигом фазы. Сб. "Уравновешивание роторов энергетических машин", г.Москва, 1962 г., изд-во "Энергия".
3. ПЕТРОВИЧ В.И. Некоторые методы расширения частотного диапазона сейсмических вибродатчиков. Сб. "Вибрационная техника", № 1, МДНТП, 1965 г.
4. ПЕТРОВИЧ В.И., БРАНОВСКИЙ М.А., САБЛУКОВ В.М. "Анализатор спектра вибрации". Авторское свидетельство СССР № 172063, бюллетень изобретений № 12, 1965 г.
5. ПЕТРОВИЧ В.И. Новые разработки виброизмерительных приборов в области виброизмерительной аппаратуры. Сб. "Ремонт оборудования турбинных цехов", изд-во "Энергия", Москва, 1966 г.
6. ПЕТРОВИЧ В.И. Прибор ПКВ-1. Сб. "Вибрационная техника", № 1, МДНТП, Москва, 1968 г.
7. ПЕТРОВИЧ В.И. Новые разработки виброизмерительных приборов с расширенным частотным диапазоном. Сб. "Новые методы исследования шумов и вибраций и кибернетическая диагностика машин и механизмов", г.Каунас, 1970 г.

Результаты работы доложены на семинарах по вибрации в Московском Доме научно-технической пропаганды (1965, 1968 гг.), на III Всесоюзной конференции по уравниванию роторов (г.Одесса, 1967 г.), на IV всесоюзной конференции по виброметрии (г.Киев, 1969 г.) и Всесоюзном симпозиуме. "Новые методы исследования шумов и вибраций и кибернетическая диагностика машин и механизмов" (г.Каунас, 1970 г.).

Отдел научно-технической информации

Технический редактор Н.В.Посвянская

Д-118042. Подп. к печати и в свет
15/1-1971 г.

РТ ВТИ № 40. Тир. 170 экз. Бесплатно