

6  
А 66

322

ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПРИ ИНСТИТУТЕ  
ЭЛЕКТРОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАШИН (ИНЭУМ)

---

на правах рукописи

Инженер РАЗУМИХИН В.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ  
АВТОГЕНЕРАТОРНОГО КОЛЬЦА ЧАСТОТНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СО СТЕРЖНЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

(05.253 - Приборы и устройства автоматики  
и телемеханики)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 1970

+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПРИ ИНСТИТУТЕ  
ЭЛЕКТРОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ МАШИН (ИНЭУМ)

---

на правах рукописи

Инженер РАЗУМИХИН В.М.

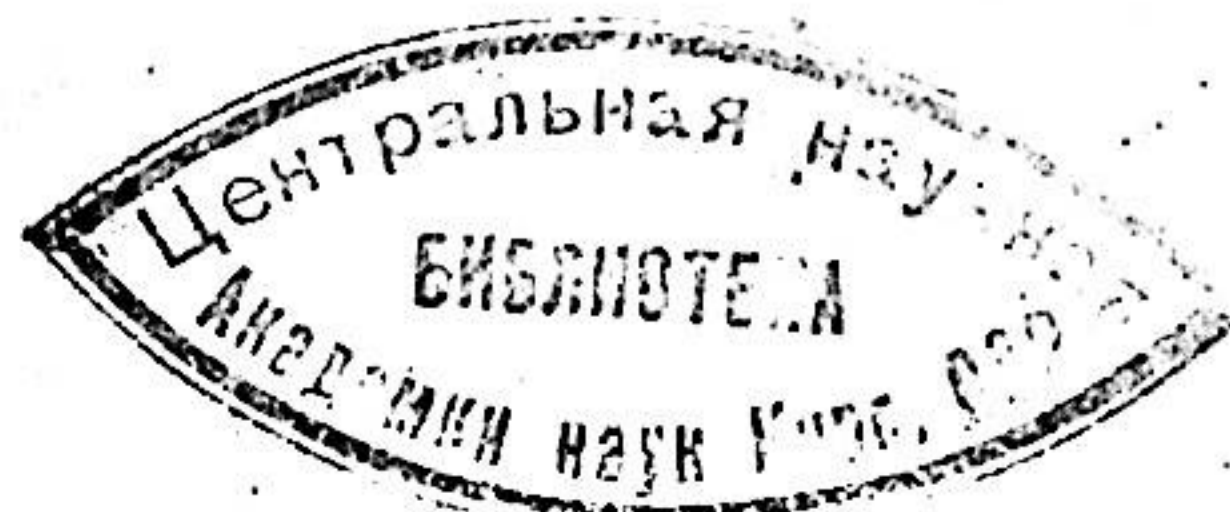
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ  
АВТОГЕНЕРАТОРНОГО КОЛЬЦА ЧАСТОТНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СО СТЕРЖНЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

(05.253 - Приборы и устройства автоматики  
и телемеханики)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 1970

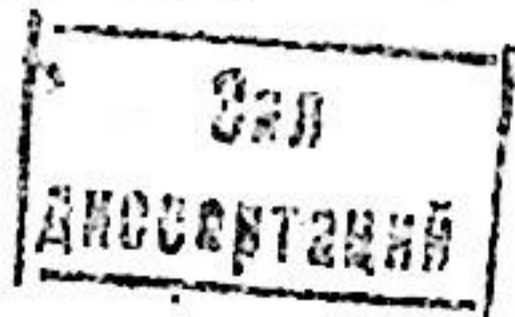


Прогресс науки и техники в значительной степени обусловлен опережающим развитием информационно-измерительных систем и средств автоматизации. Постоянное увеличение сложности таких систем выдвигают проблему создания высокоточных измерительных приборов, максимально быстродействующих и автоматизированных, простых в обращении, долговечных и надёжных в эксплуатации.

На долю измерения неэлектрических величин (сила, вес, тяга, давление; перепад давлений, момент, скорость вращения, ускорение и т.д.) приходится значительная часть всех проводимых в мире измерений.

В последние годы в измерительной технике получил широкое распространение частотный метод измерения. Для этого метода характерно, что носителем информации об измеряемых величинах является частота колебательного процесса. Достоинства этого метода, среди которых в первую очередь необходимо отметить высокую точность, помехоустойчивость при передаче информации по каналам связи и простоту преобразования частоты в цифровой код, позволили создать ряд высокоточных приборов для измерения механических величин. Интерес к частотному методу особенно возрос после создания аппаратуры для измерения частоты (периода) электрических колебаний счётным методом, которая может обеспечить весьма высокую точность. Поэтому к настоящему времени успех реализации высоких потенциальных метрологических возможностей частотного метода почти целиком зависит от того, насколько точным удастся сделать первичные преобразователи измеряемых величин в частоту.

Сейчас предложено множество частотных преобразователей, в которых используются самые различные колебательные системы (резонаторы). Особый интерес вызывают преобразователи, постро-



енные на базе высокодобротных механических резонаторов - струна, стержень, тонкостенный цилиндр и т.д. Наибольшее распространение получили виброчастотные датчики механических величин (силы, давления, момента сил и т.п.). В них используется стержневой резонатор, работающий в режиме автоколебаний и выполненный как единое тело с упругим телом датчика, воспринимающим нагрузку. При растяжении (или сжатии) резонатора, изменится частота его колебаний. Таким образом, виброчастотный преобразователь представляет собой электромеханический автогенератор, частота которого управляется нагрузкой, приложенной к датчику. Точность измерений с помощью виброчастотных датчиков (ВЧД) достигает 0,2-0,5%.

Наибольшую известность получили датчики давлений типа ДД-ДДВ, силоизмерители типа СВ-СВА и СВК, моментомеры ИКМ-ИКМВ в комплексе со вторичной регистрирующей аппаратурой (дискретные периодомеры и частотомеры) серий КН-КЛ.

В настоящее время в НИКИМПе разработаны и внедрены в опытное и серийное производство и эксплуатацию ряд силоизмерителей для измерения силы от 5 кг до 1000 тс с относительной погрешностью 0,5% от измеряемой величины, начиная с 1/10 шкалы прибора; ряд датчиков давления от 5 атм до 1000 атм с основной погрешностью 0,25%; ряд датчиков перепада давления от 0,1 атм и выше на фоне больших статических давлений (до 500 атм).

Для специальных измерительных стендов разработаны и ведутся разработки измерителей крутящего момента и осевой силы на вращающихся валах в широком диапазоне нагрузок и температур, в том числе для быстроходных валов (свыше 30.000 об/мин).

Комплекс теоретических и экспериментальных работ, проведенный в НИКИМПе, позволил выявить метрологические возможности, устранить недостатки, отработать технологические вопросы созда-

ния виброчастотных датчиков и регистрирующей аппаратуры различного назначения.

В ходе исследований, в частности, выяснилось, что система возбуждения колебаний резонатора датчика оказывает значительное влияние на его метрологические характеристики вплоть до того, что неквалифицированный выбор её параметров и режима работы может значительно снизить точность прибора.

В этой связи возникла задача детального исследования автогенератора датчика, с учётом особенностей, отличающих его от других автогенераторных датчиков.

- В частности, это то, что
- стержневой резонатор виброчастотного преобразователя является системой с распределёнными параметрами и обладает бесконечным дискретным спектром собственных частот;
  - колебательная система стержневого резонатора неизохронна, т.е. собственная частота зависит от амплитуды колебаний и имеет более низкую добротность, чем у камертонов;
  - в отличие от камертонных генераторов, автогенератор ВЧД работает в значительной полосе рабочих частот (девиация достигает 1-2 кгц, или 25-30% от начальной частоты резонатора), что значительно усложняет требования к системе возбуждения.

Работы, предпринятые Д.В.Раммом, Г.А.Синельниковым-Мурлыковым, Л.Г.Эткиным продвинули вперёд решение указанной выше задачи. В этих исследованиях давались некоторые рекомендации по выбору параметров автогенератора виброчастотного преобразователя. Однако проведённый теоретический анализ носил скорее качественный, чем количественный характер, и исходил из предположений, что датчик работает в идеальных условиях, при полном отсутствии помех. Это справедливо для очень небольшой группы приборов лабораторного типа, предназначенных для прецизионных измерений.

Большинство датчиков, применяемых в промышленности и научных исследованиях (отработка двигателей, насосных агрегатов, ходовые испытания судов, испытания в аэродинамических трубах и т.п.), работают в условиях более или менее интенсивных помех различного спектрального состава (удары, вибрации и т.д.). Это не может не отразиться на точности датчика, и в частности, на работе автогенератора — наиболее чувствительном к воздействию помех элементе прибора.

Учёт влияния помех, как будет видно из дальнейшего, приводит к выявлению дополнительных требований к системе возбуждения, которые в некоторых случаях находятся в противоречии с рекомендациями, вытекающими из анализа работы прибора в спокойных условиях эксплуатации. Исследованию поведения автоколебательных систем в условиях помех в последние годы уделяется большое внимание. Это нашло отражение в работах И.Л.Берштейна, Г.С.Горелика, А.Н.Малахова, Р.Л.Стратоновича и др. Математический аппарат для анализа таких систем развит в работах А.Эйнштейна, А.Н.Колмогорова, Е.Дынкина, К.Ито, Р.Л.Стратоновича, Р.З.Хасьминского. Однако все эти работы носят общий характер и, естественно, что они не могут быть непосредственно использованы для оценки погрешностей виброчастотных датчиков от воздействия помех, а их выводы и рекомендации не позволяют сформулировать требования к автогенератору датчика вообще и к его возбуждающей системе в частности. Они дают лишь общий подход к проблеме, а также методику и аппарат исследования.

Для решения указанных задач необходимо специальное исследование, учитывающее специфику виброчастотных датчиков, а также особенности счётного метода измерения частоты. Восполнить этот пробел в исследовании виброчастотных датчиков и является одной из основных задач настоящей работы. Актуальность этой задачи

определяется всё более широким распространением ВЧД в измерительной технике.

Далее, на основе результатов исследования поведения автогенератора датчика в условиях помех, и учитывая результаты выполненного ранее анализа работы автогенератора ВЧД в отсутствие помех, ставится задача выявить и сформулировать основные требования к системе возбуждения датчика. На основе этих требований должны быть даны рекомендации по рациональному построению возбуждающих систем, способных обеспечить улучшение метрологических характеристик ВЧД. Это вторая задача, которая ставится и решается в настоящем исследовании.

Наконец, в работе ставится и решается задача технической реализации этих рекомендаций. В сочетании с необходимостью обеспечить выполнение ряда общетехнических и эксплуатационно-экономических требований (широкий температурный диапазон, требования взрывобезопасности, дешевизны, простоты и надёжности в конструктивном и технологическом отношении, простоты регулировки и настройки) эта задача оказывается далеко не простой и требует для решения её дополнительных исследований, экспериментальной проверки и проверки опытом эксплуатации. Техническая реализация результатов исследования, являясь его логическим завершением, представляет собой основную часть практического выхода работы.

Диссертация состоит из введения, содержащего обзор и общую постановку задачи, четырёх глав и заключения.

В первой главе дано описание основных конструктивных элементов виброчастотного датчика и принципа его работы, а также особенности счётного метода измерения частоты (периода). Затем кратко изложены результаты исследования автогенератора датчика при отсутствии помех, полученные в более ранних исследованиях. Упомянутые результаты в сочетании с результатами

оригинальных исследований. В дальнейшем использованы при формулировании основных требований к системе возбуждения датчика. Далее приводится методика расчёта автогенератора и даётся дальнейшее развитие этой методики. В частности, вместо некоторых величин, входящих в расчётные формулы, измерение которых сопряжено с определёнными трудностями, вводятся удобные для практики параметры, характеризующие автогенератор и легко поддающиеся непосредственному измерению. Кроме того, приводятся результаты некоторых дополнительных оригинальных исследований, связанных с влиянием параметров и режимов работы автогенератора на точность датчика. Затем даётся методика экспериментального определения некоторых параметров автогенераторного кольца. Для этой цели предлагается использовать специально разработанный афаскоп-радиоизмерительный прибор для наблюдения и исследования амплитудно-фазовых характеристик виброчастотных преобразователей.

Во второй главе проводится систематическое изучение влияния внешних случайных возмущений на электромеханический автогенератор виброчастотного преобразователя: ударов, тряски, вибраций, акустического шума, электростатических и электромагнитных помех и наводок.

В отличие от классической постановки задачи, принятой в теории связи и радиолокации, где проблема состоит в разделении полезного сигнала и помехи одной и той же физической природы, задача исследования влияния помех на точность датчика должна быть поставлена шире. Здесь речь идёт не только о засорении измерительной информации помехой той же природы, что и носитель информации. Наряду с этим явлением имеет место нарушение нормальной работы прибора под действием помех. Чаще всего это механическая помеха (акустический шум, вибрации, удары и т.п.). Если для борьбы с засорением измерительной информации помехой существуют

хорошо разработанные и проверенные общие методы, то меры борьбы с нарушением работы прибора под действием помех не столь универсальны и зависят от принципа работы прибора и его конструктивного исполнения. Они могут быть разработаны лишь в результате тщательного изучения работы измерительного прибора как при отсутствии, так и при наличии помех.

В практике измерений механических величин с помощью виброчастотной аппаратуры приходится сталкиваться с помехами самого различного спектрального состава, интенсивности и характера (механическими и электрическими, случайными и регулярными и т.п.). Причём характеристики помех в каждом конкретном случае как правило заранее не известны. Поэтому целесообразно решить эту задачу, опираясь на разумную идеализацию реальной помехи, тем более, что особенности виброчастотных датчиков и, в частности, их резонансные свойства, позволяют не накладывать слишком жестких ограничений на такую идеализованную помеху. В результате последняя будет иметь достаточно общий характер и сможет отразить основные черты широкого класса реальных помех, наиболее часто встречающихся на практике.

Опасно и трудно устранить влияние тех помех на датчик, которые так или иначе воздействуют на стержневой резонатор. Поскольку последний является высокочастотным селективным элементом, то в пределах его полосы пропускания спектральная плотность почти любого встречающегося на практике шума с непрерывным спектром практически остаётся постоянной. С другой стороны, даже значительное изменение спектральной плотности помехи за пределами полосы пропускания несущественно.

Эти качественные соображения приводят к тому, что аппроксимация воздействующей на резонатор датчика помехи стационарным белым шумом оказывается вполне приемлемой.

Как показывает эксперимент и практика эксплуатация вибро-частотных датчиков, воздействие широкополосной механической помехи типа "белый шум" на стержневой резонатор приводит к нарушению квазигармонического характера автоколебаний. Эти нарушения состоят в том, что их амплитуда и фаза медленно флуктуируют. Скорость нарастания и спадания тем меньше, чем больше постоянная времени резонатора. Иными словами, автоколебания принимают характер узкополосного случайного процесса. Кроме того, на автоколебания накладываются колебания резонатора на высших формах, также имеющие характер узкополосного случайного процесса. Эти явления вызывают следующие нарушения работы датчика:

- уход частоты автоколебаний по сравнению со случаем отсутствия помех;
- некоторый разброс частоты около этого смещенного значения;
- срыв колебаний на некоторое время и последующим их восстановлением;
- появление ложных импульсов на входе регистрирующего прибора.

Стержневой резонатор является колебательной системой с бесконечно большим числом степеней свободы, и его собственные частоты не составляют натурального гармонического ряда, а находятся в иррациональном отношении друг к другу. Под воздействием помех возбуждаются теоретически все степени свободы резонатора. Однако на практике при анализе в первом приближении достаточно учесть колебания лишь на нескольких наиболее низких частотах, следующих сразу же за основной частотой, соответствующей первой моде колебаний стержня.

Анализ многочастотных режимов в автогенераторе датчика представляет собой сложную задачу. Поэтому исследование начато с рассмотрения более простой одночастотной модели автогенератора датчика. Влияние же колебаний на высших модах в дальнейшем учте-

но упрощенным методом, не прибегая к составлению и анализу общих уравнений, описывающих движения в автогенераторе датчика при многочастотном режиме.

Одночастотный режим автогенератора датчика, находящегося под воздействием флуктуационного возмущения типа "белый шум" можно описать системой стандартных уравнений, полученных асимптотическим методом Боголюбова-Митропольского для амплитуды и фазы автоколебаний:

$$\dot{A}_1 = -\frac{1}{2\omega_1} \left( \frac{\omega_1^2}{Q} A_1 - a_{01} I_0 \cos \varphi_0 \right) - \frac{a_2}{\omega} \eta(t) \sin \psi$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{2\omega_1} \left( \frac{3}{4} C_0 A_1^2 + a_{01} \frac{I}{A_1} \sin \varphi_0 \right) - \frac{a_2}{A_1 \omega_1} \eta(t) \cos \psi \quad (1)$$

Здесь:  $\omega_1 = 2\pi f_1$  - первая собственная частота стержневого резонатора;

$A$  - безразмерная амплитуда колебаний, равная отношению смещения стержня к его толщине, обычно  $A = 10^{-1} + 10^{-3}$ ;

$Q$  - добротность резонатора с учётом влияния возбуждающей системы;

$a_{01}$  - коэффициент электромеханической связи системы возбуждения с резонатором;

$C_0$  - коэффициент неизохронности резонатора;

$I_0$  - амплитуда первой гармоники возбуждающего тока, нелинейно зависит от амплитуды колебаний резонатора;

$\varphi_0$  - суммарный фазовый сдвиг в разомкнутой (без резонатора) петле обратной связи автогенератора;

$a_2$  - размерный коэффициент;

$\psi = \omega_1 t + \varphi_n$ , где  $\varphi_n$  - некоторая начальная фаза автоколебаний, которая считается случайной ве-

личной, равномерно распределённой на интервале от 0 до  $2\pi$  и фактически не зависящей от возмущения  $\eta(t)$ .

При выводе этих уравнений предполагалось, что возбуждение резонатора осуществляется усилителем-ограничителем, амплитудная характеристика которого по первой гармонике имеет горизонтальный участок ( $I(U_{ex}) = I_0 - const$ ).

Последние слагаемые в правой части этих уравнений учитывают влияние случайного возмущения.

Для случая слабых помех, когда отклик датчика-флюктуации амплитуды автоколебаний много меньше величины самой амплитуды автоколебаний в установившемся режиме, методом линеаризации стохастических уравнений (1) получено выражение для количественной оценки флюктуационного набега фазы. Его дисперсия оказывается пропорциональной времени измерения  $\theta$  частоты (или периода) автоколебаний:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{a_{\eta}^2}{4\omega_1^2 A_0^2} \chi(\omega_1) \theta = \frac{b}{A_0^2} \theta, \quad (2)$$

где  $\frac{1}{2} \chi(\omega_1)$  - спектральная плотность помехи на частоте  $\omega_1$ .

При исследовании случая интенсивных помех (флюктуации амплитуды порядка величины самой амплитуды) на возмущение  $\eta(t)$  пришлось наложить дополнительное ограничение, положив его марковским процессом. Влияние интенсивных помех рассмотрено методом диффузионного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) с использованием тонкого различия между стохастическими процессами К.Ито и Р.Л.Стратоновича для нахождения интеграла уравнения ФПК. Вследствие характера реально действующих помех и свойств автогенератора виброчастотного преобразователя хорошо выполняется условие: время корреляции шума много меньше времени релаксации амплитуды-флюктуационное возмущение может быть аппроксимировано гауссовым

дельтакоррелированным процессом. Эволюцию амплитуды можно рассматривать как процесс без последствия. Записав для системы (1) уравнение ФПК в диффузионном приближении, и исключив вибрационные члены из флюктуационной части, получили упрощенное уравнение ФПК. Этому уравнению соответствует система "полностью упрощенных" уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 &= -\frac{1}{2\omega_1} \left( \frac{\omega_1^2}{Q} A_1 - a_{01} I_0 \cos \varphi_0 \right) + \frac{b}{A_1} + \frac{a_{\eta}}{\omega_1} \eta_1(t) \\ \dot{\varphi} &= \frac{1}{2\omega_1} \left( \frac{3}{4} C_0 A_1^2 + a_{01} \frac{I_0}{A_1} \sin \varphi_0 \right) - \frac{a_{\eta}}{\omega_1 A_1} \eta_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

которая стохастически эквивалентна системе (1). В системе уравнений (3)  $\eta_1(t)$  и  $\eta_2(t)$  - два одинаковых взаимно независимых дельта-коррелированных нормальных белых шума. Отыскивая стационарное распределение вероятностей, удалось показать, что распределение плотности вероятности для амплитуды автоколебаний является распределением Рэлея:

$$W(A_1) = C \cdot A_1 e^{-\frac{A_0}{2bT}} e^{-\frac{(A_0 - A_1)^2}{2bT}}$$

где  $A_0$  - равновесная амплитуда колебаний в отсутствие шумов;

$C = \frac{2Q}{\omega_1}$  - постоянная времени резонатора;

$C$  - коэффициент, определяемый из условия нормировки.

С его помощью были получены приближенные выражения для оценки относительных погрешностей датчика, возникающих в результате, во-первых, флюктуационного набега фазы:

$$\delta \varphi_1 = \gamma \left( \xi \right) \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{Qn}} \cdot \xi \quad (4)$$

и, во-вторых, срывов автоколебаний:

$$\delta \varphi_2 = \frac{1 + \sqrt{2\pi} \frac{1}{\xi} \left\{ \mathcal{F}\left(\frac{1}{\xi}\right) - \mathcal{F}\left[\frac{1}{\xi}(1-\mu)\right] \right\} e^{\frac{1}{2\xi^2}} - e^{-\frac{2\mu-\mu^2}{2\xi^2}}}{1 + \sqrt{2\pi} \frac{1}{\xi} \mathcal{F}\left(\frac{1}{\xi}\right) e^{\frac{1}{2\xi^2}}} \quad (5)$$



В этих формулах:

$$\xi = \frac{\sqrt{bt}}{A_0} = \frac{1}{a_{01} \cos \varphi_0} \sqrt{\frac{\omega_1}{2Q}} x(\omega_1)$$

относительный отклик датчика на помеху, учитывающий не только

отношение  $\frac{\text{помеха}}{\text{сигнал}}$ , но и зависящий от основных параметров автогенератора;

$n$  - число периодов автоколебаний, составляющих время измерения  $\theta$ ;  $\gamma$  - безразмерный коэффициент;  $\int \left( \frac{1}{\xi} \right)$  - интеграл вероятности;  $\mu$  - относительный порог срабатывания частотомера, приведённый к резонатору и измеренный в долях амплитуды автоколебаний  $A_0$ .

Из этих формул следует, что погрешность датчика от флюктуационного набега фазы монотонно возрастает с увеличением интенсивности помехи. При сравнительно слабых помехах ( $\xi \leq 0,5$ ) эта зависимость близка к линейной. Величина погрешности сравнима с основной погрешностью датчика (0,5%) при  $\xi = 0,4-0,5$ .

Погрешность, возникающая в результате срывов колебаний, носит экстремальный характер с максимумом при  $\xi = 1$ . При помехах очень большой интенсивности ( $\xi > 1$ ) она уменьшается. Величина погрешности от срывов весьма сильно зависит от относительного порога срабатывания  $\mu$ . Для того, чтобы она не превысила 0,5% даже при интенсивных помехах ( $\xi = 1$ ), необходимо обеспечить величину порога срабатывания порядка  $\mu = 0,001+0,01$ , что накладывает определённые требования на величину коэффициента усиления усилительно-формирующего тракта виброчастотного преобразователя.

Под воздействием помех в резонаторе могут возникнуть колебания на высших формах. Однако электромагнитный адаптер, расположенный посередине стержня резонатора, не реагирует на колебания всех чётных форм, поскольку все они имеют здесь узел стоячей волны. Поэтому на практике наибольшую опасность представляют ко-

лебания на третьей форме, частота которых примерно в пять раз выше основной. Колебания на следующей нечётной форме - пятой, частота которых примерно в 14 раз выше основной ( $f_5 \approx 14 f_1$ ) практически никогда не возникают вследствие ограниченности спектра помехи. Наложение паразитных колебаний на основные приводят к искажениям выходного сигнала с датчика, обычно имеющего форму прямоугольных импульсов, период которых равен периоду автоколебаний. Эти искажения состоят в смещении импульсов и расчленении их на части - в пределе на пять частей, когда отклик на помеху на третьей форме сравним с откликом на первой форме, что приводит к ложным срабатываниям регистрирующего прибора.

Качественный анализ двухчастотного режима в автогенераторе позволил вывести формулы для оценки максимальных погрешностей от неустойчивости фронтов выходных импульсов

$$\delta \varphi_{3max} \leq \frac{1}{2q^n}$$

- ложных срабатываний регистрирующего прибора:

$$\delta \varphi_{4max} \leq 1 - \frac{1}{q}$$

здесь  $q$  - отношение частот паразитных и основных колебаний; для третьей формы  $q \approx 5$ ;

$n$  - число периодов автоколебаний за время одного измерения частоты (периода).

Одним из практически важных выводов, которые вытекают из проведённого исследования, является вывод о целесообразности разграничения условий работы виброчастотных датчиков с точки зрения интенсивности возмущающих воздействий. Выделено четыре режима измерений датчиками, различающиеся между собой характером нарушений его нормальной работы под влиянием внешних возмущений и величиной возникающих при этом погрешностей.

В основу количественного критерия оценки условий измерения

положен относительный уровень и спектральный состав отклика датчика на возмущение помехой.

Практика эксплуатации виброчастотных датчиков показала, что целесообразно различать режимы измерения:

- режим прецизионных измерений, соответствующий случаю практически полного отсутствия помех;
- режимы стандартных (массовых) измерений, соответствующий случаю помехи средней интенсивности и ширине её спектра до 15-25 кгц (сравнительно узкополосная помеха). Этот режим наиболее часто встречается в практике измерений;
- режим измерений в условиях интенсивных узкополосных помех, которые так же довольно типичны для существующей практики измерений;
- режим измерений в условиях интенсивной широкополосной помехи.

В работе даны количественные критерии измерительных режимов и предложена методика их разграничения при наблюдении фазового портрета автогенератора.

Проведённое исследование позволило дать научно-обоснованные рекомендации по выбору полосы пропускания и коэффициента передачи усилительно-формирующего тракта, указать на меры по повышению помехоустойчивости датчика и регистрирующей аппаратуры, а также определить границы применимости виброчастотных датчиков при воздействии случайных возмущений для заданной точности измерений.

В третьей главе формулируются основные требования к системе возбуждения датчиков и даются рекомендации по обеспечению наилучших метрологических характеристик последних в различных режимах их работы. Здесь изложены результаты решения задачи о технической реализации полученных результатов. Описаны некоторые конкретные схемы усилителей возбуждения для всех ос-

новных измерительных режимов. Большинство разработок внедрены в производство и налажен их серийный выпуск.

Сопоставление требований к амплитудному режиму автогенератора при работе датчика в условиях воздействия интенсивных помех и при измерениях в спокойных условиях - обнаруживает их противоречивый характер. В первом случае при повышении помехоустойчивости датчика желательно форсирование амплитуды колебаний с тем, чтобы при заданном уровне возмущений уменьшить отношение отклика датчика (на это возмущение) к равновесной амплитуде колебаний  $A_0$ . Во втором случае для повышения стабильности частоты автоколебаний необходимо обеспечить режим малых амплитуд, т.е. отношение амплитуды колебаний к толщине резонатора  $\sim 10^{-2} + 10^{-3}$ . Поэтому для датчиков общего назначения, условия работы которых в отношении уровня помех могут изменяться в довольно широких пределах, при проектировании и наладке системы возбуждения приходится принимать компромиссные решения, исходя из ожидаемого уровня помех, усреднённого по наиболее часто встречающимся в практике измерений случаям. С другой стороны, не оправдано применение универсальной системы возбуждения для двух крайних случаев, когда уровень помех весьма мал (при применении образцовых динамометров и измерителей давления) или, наоборот, весьма значителен (измерение тяги двигателей и т.п.). В этих случаях целесообразно применение специализированных систем возбуждения, построенных с учётом специфики требований, определяемой условиями применения виброчастотных преобразователей.

При проектировании виброчастотного преобразователя одной из важных задач является такое построение возбуждающей системы, при котором была бы обеспечена реализация высоких потенциальных возможностей прибора в метрологическом отношении. Поскольку указанные возможности не одинаковы для различных условий эксплуата-

ции датчиков, то и требованиям к возбуждающей системе и, в частности, удельный вес обязанных ей погрешностей оказываются различными. В режиме прецизионных измерений имеется возможность так построить систему возбуждения, что вносимые ею погрешности будут пренебрежимо малы по сравнению с остальными погрешностями датчика. При измерениях в условиях интенсивных (особенно широкополосных) помех удельный вес автогенераторных погрешностей возрастает. Практически удаётся добиться лишь такого положения, при котором погрешности автогенератора оказываются сравнимыми или даже несколько превышают основную погрешность датчика в отсутствие помех. Исходя из этого, для датчиков общего назначения (работающих при помехах средней интенсивности со спектром, лежащим ниже высших собственных частот резонатора) разумно так выбрать параметры и режим системы возбуждения, чтобы её погрешность по крайней мере не превышала основную статическую погрешность прибора.

Включение резонатора в автогенераторное кольцо приводит к падению добротности  $Q$  и смещению частоты автоколебаний от собственной частоты резонатора  $\omega_0$  из-за влияния параметров системы возбуждения и ненулевого фазового сдвига. Влияние параметров усилителя и их нестабильности на относительную погрешность частоты автогенератора может быть оценена из уравнений:

$$\delta\omega_I = 0,54 \left( \frac{\omega_0}{\omega_I} \right) A_0^2 \delta I$$

$$\delta\omega_Y = \frac{\delta Y}{2Q} \left[ \varphi_{yc} + \arctg \left( \frac{Z_a}{R_{вх}} + \frac{Z_b}{R_{вых}} - \frac{\epsilon_{mp}}{U_a} \right) \right]$$

$$\delta\omega_Q = \frac{tg \varphi_0}{2Q} \delta Q$$

Здесь  $\delta\omega_I$ ,  $\delta\omega_Y$ ,  $\delta\omega_Q$  - относительные погрешности по частоте, обусловленные нестабильностью амплитудного режима (тока возбуждения  $\delta I$ ), импедансами адаптера и возбудителя  $Z_a$  и  $Z_b$ , входным и выходным сопротивлениями усилителя  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ , фазовыми сдвигами в усилителе  $\varphi_{yc}$ , трансформаторной "наводкой"  $\epsilon_{mp}$  из цепи возбудителя в цепь адаптера и сигналом на входе в усилитель  $U_a$ . Задавшись допустимой долей погрешности автогенератора в общей погрешности датчика (обычно  $\frac{1}{4} + \frac{1}{10}$ ), можно определить требования к входным и выходным цепям усилителя, уровню и стабильности возбуждающего тока, схеме амплитудной и температурной стабилизации параметров усилителя, типам триодов.

Для исключения фазоподстраивающих цепей, усилитель должен быть безинерционным в полосе рабочих частот (1-9 кгц) виброчастотных преобразователей.

Анализ переходных процессов по амплитуде  $A$  и частоте показал, что их длительность сильно зависит от амплитуды смещения стержня, добротности  $Q$ , зазоров и электромагнитной системы датчика и тока возбуждения  $I_b$ .

Чем меньше амплитуда колебаний резонатора, тем точнее частота автоколебаний отслеживает изменения нагрузки, поэтому при изменении быстроменяющихся нагрузок желательно уменьшить рабочий ток  $I_p \leq \frac{I_{кр}}{3-5}$ , где  $I_{кр}$  - критический ток, при котором на амплитудно-частотной характеристике резонансной частоты наблюдается явление "скачка" амплитуды, обусловленное неизохронностью стержневого резонатора.

Чтобы время установления автоколебаний определялось только постоянной времени резонатора, необходимо соответственно выбрать начальную крутизну  $S_H$  амплитудной характеристики усилителя

$$S_H = \frac{4 \lg K + 1}{Z_{кр} \cos \varphi} \geq 0,1 \div 0,2 \left[ \frac{a}{b} \right]$$

где  $K$  - отношение амплитуд конца участка нарастания к начальной флюктуационной амплитуде;

$Z_{np}[\text{ом}]$  - сопротивление передачи резонансной системы вибро-частотного датчика на резонансной частоте.

Для повышения помехоустойчивости автоколебаний, запас по регенерации (устойчивость предельного цикла) должен быть

$$\gamma = \frac{S_n}{S_p} = S_n \cdot Z_{np} \geq 5+10, \text{ здесь } S_p - \text{ крутизна в стационарном режиме автоколебаний.}$$

Для создания нелинейной характеристики, в усилителях применяется амплитудное ограничение, что упрощает структуру усилителя. Для большинства преобразователей, как показали исследования, импульсная форма возбуждающего тока не ухудшает метрологических характеристик. Для борьбы с резонансными явлениями в виброчастотных преобразователях применяется фильтрация возбуждающего тока, вырезающая или срезающая "опасную" полосу частот.

Относительный порог срабатывания регистрирующего прибора

$$\mu = \frac{U_n'}{U_a} = \frac{U_{пор.р}}{K_y \cdot U_a} \text{ зависит от коэффициента усиления } K_y$$

всего усилительно-формирующего тракта.

Здесь  $U_n'$  - приведённое ко входу усилителя возбуждения напряжение срабатывания регистратора;

$U_{пор.р}$  - пороговое напряжение срабатывания регистратора.

Для снижения  $\mu$  до величины, меньших  $0,05+0,01$ , когда вероятность срыва будет пренебрежимо мала, коэффициент усиления должен быть в пределах  $K_y = 700+1000$ .

Проведённый в диссертационной работе анализ показал, что в различных измерительных режимах требования к параметрам и элементам системы возбуждения и усилительно-формирующего тракта противоречивы, а разработка универсальной системы возбуждения нецелесообразна.

Поэтому был сконструирован унифицированный ряд усилителей возбуждения, практически удовлетворяющий всем требованиям, предъявляемым к системам возбуждения виброчастотных преобразователей. Исследования показали, что влияние на усилители дестабилизирующих факторов с длительной корреляцией колебаний температуры, напряжения питания и атмосферного давления вызывает погрешность, составляющую незначительную величину от общей погрешности датчика.

В четвёртой главе диссертации изложены методика и результаты экспериментальных исследований, подтверждающих основные выводы, вытекающие из теоретического анализа работы в условиях помех. Далее помещены результаты испытаний разработанных усилителей возбуждения, проведённых с целью выяснения влияния на их работу различных дестабилизирующих факторов: изменение температуры, напряжения питания и т.п.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги выполненной работы, можно отметить следующие её основные результаты.

I. Проведено исследование работы виброчастотного датчика в условиях воздействия на него случайных помех, главным образом механических, поскольку защита датчика от них крайне затруднительна, а в ряде случаев вообще невозможна.

I.1. Воздействие механических помех на датчик приводит к:  
- нарушениям работы автогенератора, проявляющимся в появлении флюктуаций амплитуды и фазы автоколебаний;  
- возникновению многочастотных режимов в датчике.

I.2. Флюктуации фаз непосредственно приводят к погрешности, проявляющейся в разбросе показаний регистратора (флюктуационный

забег фазы).

1.3. Флюктуации амплитуды могут привести к срыву автоколебаний и к погрешностям, проявляющимся в уходе показаний регистратора вследствие:

- прекращения поступления информации в регистратор при уменьшении амплитуды колебаний ниже порога срабатывания регистратора;
- прекращения возбуждения резонатора из-за заклинивания усилителя возбуждения при резком увеличении амплитуды колебаний резонатора. В этих случаях уход показаний регистратора может достигать весьма больших величин (промахи в измерении) и сопровождается разбросом показаний, не превышающим по величине указанных уход показаний. В работе даны формулы и графики для количественной оценки указанных погрешностей.

1.4. Многочастотные режимы в датчике возникают вследствие возбуждения помехой колебаний резонатора на высших формах. Наиболее опасны паразитные колебания на 3-ей форме, частота которой примерно в 5 раз выше основной.

1.5. Возникновение паразитных колебаний на высших формах, нарушает условие формирования выходного сигнала с датчика, в результате чего имеет место:

- смещение фронтов выходных прямоугольных импульсов с датчика;
- расчленение выходных импульсов, приводящие к ложным срабатываниям регистратора.

Указанные нарушения нормальной работы датчика приводит к дополнительным погрешностям. В работе проанализирован характер погрешностей и дана их верхняя (по максимуму) количественная оценка.

1.6. Выяснено, что отклик резонатора на одно и то же возмущение не остаётся одинаковым во всем рабочем диапазоне датчика: при возникновении в нём резонансных явлений (синхронизация частоты

резонатора и упругого тела) отклик может возрасти в несколько раз.

2. Опираясь на результаты исследования работы ВЧД в условиях помех, а также на результаты ранее выполненных работ по исследованию работы автогенератора (в отсутствие помех), развитые и дополненные в настоящей диссертации, сформулированы требования к системам возбуждения ВЧД, исходя из задачи получения наилучших возможных метрологических характеристик прибора.

2.1. Основные из этих требований таковы:

- обеспечение минимальной величины затухания, вносимого в резонансную систему датчика системой возбуждения;
- обеспечение минимального фазового сдвига в разомкнутой петле обратной связи автогенератора;
- обеспечение работы резонатора в режиме малых амплитуд.

Выполнение этих требований необходимо для того, чтобы погрешность, вносимая системой возбуждения, составляла малую долю общей погрешности датчика при его работе в отсутствие помех.

Наличие помех выдвигает ряд дополнительных требований к системе возбуждения.

2.2. При сравнительно узкополосной помехе, когда верхняя граничная частота её спектра меньше собственной частоты резонатора при колебаниях его на 3-ей форме, необходимо:

- форсирование амплитудного режима резонатора, поскольку погрешности от помех пропорциональны отношению отклика резонатора на помеху к равновесной амплитуде автоколебаний;
- снижение относительного порога срабатывания аппаратуры  $M$ , приведённого ко входу усилителя возбуждения;
- обеспечение неперерегружаемости усилителя возбуждения (УВ) при скачках амплитуды входного сигнала.

Выполнение последних двух требований необходимо для сниже-

ния вероятности срывов автоколебаний.

При выполнении всех трёх требований оказывается возможным снизить автогенераторную погрешность до уровня  $I/I_0 - I/4$  от основной погрешности датчика.

2.3. При широкополосной помехе необходимо применять меры, направленные на:

- предотвращение или подавление колебаний резонатора на высших формах;
- фильтрацию паразитных колебаний, проникающих в электрический тракт датчика;
- снижение чувствительности регистрирующего прибора к искажениям выходного сигнала с датчика (главным образом к расчленению выходных импульсов с датчика). Выполнение этих требований даёт возможность обеспечить, чтобы величина погрешностей от помех была того же порядка, что и основная погрешность датчика.

3. Анализ указанных требований позволил сделать вывод о целесообразности создания универсальной системы возбуждения, пригодной для любых условий работы датчика. Такая система, удовлетворяя условиям, в которых производится большинство измерений, в ряде важных для практики случаях (отсутствие помех или, напротив, наличие интенсивной широкополосной помехи) не позволит в полной мере использовать потенциальные метрологические возможности ВЧД.

3.1. Поэтому предложено разграничить условия работы датчиков на четыре категории (четыре измерительных режима работы датчика):

- прецизионных статических измерений;
- стандартных (массовых) измерений;
- измерения в условиях интенсивных помех;
- измерения в условиях широкополосных помех, когда может возникнуть двухчастотный режим колебаний.

3.2. Соответственно этим режимам были дифференцированы требования к системам возбуждения и разработаны рекомендации. Рекомендации касаются в первую очередь выбора основных параметров автогенератора и режимов его работы:

- амплитудного режима работы резонатора, выбираемого исходя из уровня (и спектра) помех. Этот режим определяется формой и величиной тока возбуждения и воздушных зазоров в магнитной системе;
- величина входного и выходного сопротивления УВ, обеспечивающих высокую добротность системы и малые фазовые сдвиги в разомкнутой петле обратной связи автогенератора;
- величины крутизны начального участка амплитудной характеристики УВ, обеспечивающей достаточный запас по регенерации и достаточно малое время установления автоколебаний;
- величины сквозного коэффициента усиления всего усилительно-формирующего тракта УВ, который определяет относительный порог срабатывания регистрирующего прибора;
- величины ослабления усилителем сигнала на частотах, соответствующих высшим формам колебаний резонатора, которая определяет частотную характеристику усилителя и, в частности, его фильтрующие свойства:
  - структуры УВ (т.е. его автогенераторной части и формирователя), обеспечивающей неперегружаемость усилителя и его нагрузочную способность на линию связи.

3.3. Кроме того, ряд рекомендаций предусматривает специальные меры по борьбе с влиянием помех на точность датчика. Они связаны прежде всего с решением задачи по предотвращению возникновения в датчике многочастотных режимов, и подавлению уже возникших колебаний, а также с задачей снижения чувствительности прибора к этим колебаниям. Среди них можно отметить следующие:

- повышение рабочих частот датчиков до 6-8 кгц, что гарантирует от возникновения погрешностей из-за многочастотных режимов колебаний при ширине спектра помех до 30-40 кгц;
- применение частотнозависимых цепей для создания сильной отрицательной обратной связи в автогенераторе на частотах, соответствующих высшим формам колебаний вплоть до создания параллельного канала "отрицательного" возбуждения на 3-ей форме колебаний.

4. Сумма всех этих рекомендаций составляет основную часть практического выхода работы. Другая его часть представляет собой, результат решения задачи по технической реализации указанных рекомендаций, состоящих в том, что были разработаны, испытаны и внедрены в серийное производство несколько конкретных возбуждающих систем для виброчастотных датчиков. Следует заметить, что все указанные типы возбуждающих систем выполнены на базе одной унифицированной схемы УВ. Возбуждающая система, предназначенная для работы в режиме массовых измерений, в настоящее время выпускается крупными сериями (3000-3500 шт. в год) на Краснодарском заводе "Тензоприбор" и Опытным заводом НИКИМПа.

5. Наконец, в настоящей работе предложена методика и разработана аппаратура для экспериментального определения основных параметров резонансной системы ВЧД, которые служат исходными данными для проектирования систем возбуждения.

Таковы основные результаты настоящей работы. Основные результаты этих исследований, выполненных для виброчастотных датчиков, могут быть распространены на частотные датчики с резонаторами иного типа (тонкостенные цилиндры, мембраны, трубы, устройства типа камертонов и т.д.) для измерения механических и термодинамических величин (например, датчики расхода жидкостей и газа, плотнометры, датчики температуры и т.д.). Кроме того, результаты ис-

следований позволят реализовать потенциальные метрологические возможности виброчастотных датчиков практически во всех, встречающихся в практике измерений случаях.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Беллев М.Ф., Гославский А.В., Лилишенцева Т.П., Разумихин В.М., Синельников-Мурылёв Г.А. Параметры автоколебательной системы вибрационно-частотных датчиков. Сб. "Регистрирующая аппаратура для вибрационно-частотных датчиков", ч.1, ОНТИПРИБОР, М., 1967.
2. Махат В.Г., Плискин Ю.С., Разумихин В.М. Измеритель частоты ТЧ-3. (См. Л.1, ч.П).
3. Разумихин В.М. Автогенераторные усилители виброчастотных преобразователей. Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по вопросам тензометрии, виброметрии и динамометрии, Краснодар, 1969.
4. Разумихин В.М., Рамм Д.В., Афзскоп - прибор для наблюдения и исследования амплитудно-фазовых характеристик виброчастотных преобразователей. Сб. "Вибрационно-частотные преобразователи", ч.1, "Энергия", М., 1970.
5. Разумихин В.М., Синельников-Мурылёв Г.А. Основные принципы проектирования усилителей возбуждения для виброчастотных преобразователей. (См. Л.4).
6. Разумихин В.М., Синельников-Мурылёв Г.А. Стабилизация параметров усилителей возбуждения виброчастотных датчиков. (См. Л.4.).
7. Кулаков Р.Г., Плискин Ю.С., Разумихин В.М. Метод съёма информации с вибрационно-частотных датчиков при помощи токосъёмников индуктивного типа с выносным усилителем автогенератора. (См. Л.4., ч.2).
8. Разумихин В.М., Синельников-Мурылёв Г.А. Влияние случайных возмущений на электромеханический автогенератор виброчастотного датчика. (См. Л.4., ч.2).
9. Айсин Ш.М., Плискин Ю.С., Разумихин В.М., Рамм Д.В., Синельников-Мурылёв Г.А. Устройство возбуждения для виброчастотных датчиков, Арт. свидетельство № 226224, Б.И., № 28, 1968.

10. Разумихин В.М. Исследование и разработка усилителей к виброчастотным датчикам. Отчёт по теме № 1049, НИКИМП, 1965.

11. Беляев М.Ф., Милинке Я.Л., Разумихин В.М. Разработка и исследование виброчастотных датчиков разрежения с повышенной стабильностью показаний. Отчёт по теме № 077, НИКИМП, 1965.

12. Разумихин В.М., Синельников-Мурылёв Г.А. Исследование динамических характеристик приборов с виброчастотными преобразователями. Отчёт по теме № 1209, НИКИМП, 1969.

13. Разумихин В.М., Синельников-Мурылёв Г.А. Исследование резонансных явлений в приборах с виброчастотными преобразователями и изыскание методов их устранения. Отчёт по теме № 1204, НИКИМП, 1969.

Результаты отдельных разделов работы докладывались на Всесоюзном совещании по тензометрии, виброметрии и динамометрии в декабре 1967 г., г.Краснодар, на заседании кафедры автоматических информационных устройств МВТУ им. Н.Э.Баумана в июне 1970 г., на научно-технических конференциях НИКИМПа и др. организаций.