

6
А-24
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ПРИБОРОСТРОЕНИЮ,
СРЕДСТВАМ АВТОМАТИЗАЦИИ
И СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
ПРИ ГОСПЛАНЕ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
/ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ/

На правах рукописи

Ю. М. Цодиков

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
В РЕЖИМЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Автореферат диссертации
на соискание ученой сте-
пени кандидата технических
наук

Научный руководитель—
доктор технических наук
Д. И. АГЕЙКИН

Москва, 1965

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ПРИБОРОСТРОЕНИЮ,
СРЕДСТВАМ АВТОМАТИЗАЦИИ
И СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
ПРИ ГОСПЛАНе СССР

АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
/ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ/

На правах рукописи

Ю. М. Цодиков

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
В РЕЖИМЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Автореферат диссертации
на соискание ученой сте-
пени кандидата технических
наук

Научный руководитель -
доктор технических наук
Д. И. АГЕЙКИН

Москва, 1965

В связи с применением цифровых систем автоматического контроля и измерения возрос интерес к датчикам с цифровым, числовым или частотным выходным сигналом. Частотные датчики сочетают высокую точность цифровых измерительных приборов и простоту аналоговых устройств. Это позволяет удовлетворять все возрастающие требования к точности и надежности приборов.

Преимущества частотного выходного сигнала состоят в том, что передача по линиям связи, коммутация сигналов и параллельное включение нескольких вторичных измерительных приборов не вносит никакой дополнительной погрешности. Частота является непрерывной величиной, но ее преобразование в код приводит только к погрешности дискретности, которая может быть сведена к любой требуемой величине.

Помимо преимуществ, определяемых характером выходного сигнала, частотные датчики имеют ряд других метрологических преимуществ. Датчики с электромеханическими колебательными системами обеспечивают малые перемещения упругих чувствительных элементов, в этом отношении они аналогичны приборам с силовой компенсацией. Однако, преобразователи силы в частоту проще и на их основе возможно создание приборов с собственной частотой измерительной системы порядка сотен и тысяч герц, устойчивых к вибрациям и ударам. В частотных датчиках с электромеханическими колебательными системами в отличие от электронных приборов с силовой компенсацией величина измеряемого параметра /давления, силы/ и точность измерения принципиально не связаны с мощностью, потребляемой прибором. Поэтому на основе частотных датчиков могут быть созданы взрывобезопасные /искробезопасные/ приборы.

Эти датчики могут хорошо сочетаться с пневматическими устройствами автоматики. Такие смешанные системы особенно целесообразны при протяженных линиях связи.

Измерение многих параметров: давления, ускорения и др. может быть сведено к измерению силы, поэтому в диссертации рассматриваются преобразователи силы в частоту в виде струн или лент. Наиболее удобно применение стру в режиме автоколебаний, однако этот режим ранее исследовался недостаточно.

В диссертации ставится задача теоретического и экспериментального исследования струнного генератора. Решение этой задачи позволит определить предельные возможности струнного метода измерения и параметры, при которых достигается заданная точность.

В ряде случаев нелинейность характеристики струнного преобразователя является существенным недостатком. Ставится задача исследования точности дифференциальных преобразователей, в которых возможно получение линейной зависимости. Эта задача тесно связана с анализом струнного генератора, так как в дифференциальной схеме предъявляются повышенные требования к стабильности и идентичности двух струнных генераторов.

В первой главе диссертации рассмотрены основные типы датчиков (преобразователей) с электромеханическими колебательными системами. Такие приборы применяются для измерения давления, силы, ускорения, плотности и др. параметров. В настоящее время частотные датчики для автоматических измерений сил и давлений являются, по-видимому, наиболее точными. В этой главе

дан обзор работ по применению и исследованию струнных преобразователей.

Во второй главе теоретически и экспериментально исследована точность преобразования силы и частоту автоколебаний струн или лент. В измерительных приборах применение струн в режиме автоколебаний наиболее удобно.

Исследуется стационарный режим в струнном генераторе при пространственном движении струны. Пространственные колебания описываются системой из двух квазилинейных уравнений в частных производных. Эти уравнения можно свести к обыкновенным дифференциальным уравнениям в предположении, что распределение индукции магнитного поля вдоль струны и ток через струну синусоидальны. Тогда при мягком возбуждении колебаний уравнения струнного генератора имеют вид:

$$\ddot{u}_1 + 2\beta_0 \dot{u}_1 + \omega_1^2 u_1 + h_1 u_1 v_1^2 + h_2 u_1^3 = S_1 \dot{u}_1 - \frac{1}{3} S_3 u_1^3 \quad (I)$$

$$\ddot{v}_1 + 2\beta_0 \dot{v}_1 + \omega_2^2 v_1 + h_1 v_1 u_1^2 + h_2 v_1^3 = 0$$

Здесь $u_1(t)$ - координата точки струны в плоскости возбуждения, имеющая максимальную амплитуду колебаний, отнесенная к длине струны l_0 , например, при $n=1$ $u_1(t)$ - координата точки $l_0/2$, при $n=2$, $u_1(t)$ - координата точки $l_0/4$; $v_1(t)$ - координата в перпендикулярной плоскости той же точки струны; S_1 и S_3 - параметры усилителя обратной связи, β_0 - затухание струны.

Равенство собственных частот струн по двум взаимно перпендикулярным осям $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \omega_0$ не может быть выполнено точно даже для струн круглого сечения из-за несимметрии, возникающей

при креплении и предварительной деформации струн.

Собственная частота струны ω_0 равна: $\omega_0 = \frac{\pi n}{l_0} \sqrt{\frac{F}{\rho}}$,
для тензометра $h_1 = \frac{\pi^4 n^4 E S}{4 \rho l^2}$, где F - сила
натяжения, ρ - линейная плотность материала струны, E - мо-
дуль упругости, S - сечение струны и n - номер гармоники ко-
лебаний.

Асимптотическим методом получено решение уравнений /1/

в виде:

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ v_1 &= B_1 \cos(\omega_1 t + \psi_1), \end{aligned} \quad /2/$$

где $A_1, B_1, \varphi_1, \psi_1$, - медленно меняющиеся функции.

Проанализирована устойчивость стационарного решения. Для струны
круглого сечения однозначная зависимость частоты от силы натя-
жения будет при

$$A_1^2 \leq \frac{32 \beta_0 \omega_0 \rho l_0^2}{\pi^2 n^4 E S} \quad /3/$$

Невыполнение условия /3/ приводит к двужначной зависимости ча-
стоты автоколебаний от силы натяжения во всем или в большей ча-
сти диапазона измерения. Разность между двумя возможными зна-
чениями частот не превышает $A_1^2 h_1 / 4 \omega_0$ и зависит от ве-
личины $\omega_1 - \omega_0$, т.е. от предварительной деформации каж-
дой струны.

Вариации и нестабильность частоты порядка 1% + 0,2%, кото-
рые наблюдаются в разрабатываемых приборах со струнными преобра-
зователями, зачастую объясняются невыполнением условия /3/.

Экспериментально установлено, что уменьшение амплитуды колеба-
ний устраняет двужначную зависимость частоты от силы натяжения.

При выполнении условия /3/ частота зависит от амплитуды
колебаний $\omega = \omega_0 + 3h_1 A_1^2 / 8 \omega_0$ и погрешность от нестабильно-
сти A_1 может быть уменьшена до требуемой величины. По амплиту-
де колебаний определяют допустимую величину первой гармоники то-
ка J_m , пропускаемого по струне, $J_m = 2 \beta_0 \rho \omega l_0 A_1 / B_m$
где B_m - амплитуда первой гармоники индукции в зазоре маг-
нита.

Анализ струнного генератора первоначально проведен при
условии того, что измерительная система, включающая чувстви-
тельный элемент, например, мембрану или сильфон и элементы передачи
силы, не имеет собственных частот, совпадающих или кратных частоте
струнного генератора. Затем показано, что если это требование
не выполняется, то в генераторе возможны следующие явления:

- 1/ срыв автоколебаний или резкое уменьшение амплитуды колебаний;
 - 2/ немонотонная зависимость частоты генератора от силы натяжения.
- Последнее может приводить к автоколебаниям при включении датчика
в систему регулирования. Ограничения, накладываемые на частотные
свойства измерительной системы, очень существенны при разработ-
ке приборов, так как частота генератора может изменяться в широ-
ких пределах.

Точность струнного метода измерения ограничивается неупру-
гими деформациями струн и элементов крепления. Эксперименталь-
но определена зависимость упругого последействия от длины струн
и показано, что величина последействия определяется неупругими
деформациями струн в месте крепления. Уменьшение последействия
возможно при увеличении l/d или изготовлении струн совместно
с элементами крепления. Экспериментально получена величина после-

действия в режиме измерения силы $3 \cdot 10^{-5}$ относительно девиации частоты.

Для расчета генератора необходимо определить добротность струн. Точный расчет добротности с учетом потерь в материале и на трение о воздух представляет известные трудности, поэтому добротность определена экспериментально для широкого диапазона параметров. При $l/d > 500$ значение добротности можно оценить по следующей формуле:

$$Q = \gamma_c d f, \quad (4)$$

где γ_c - плотность материала струны в г/см³,
 d - диаметр в мм, f - частота струны.

Линейную зависимость между измеряемым параметром и выходной частотой можно получить различными методами: используя малую девиацию частоты, в дифференциальной схеме включения двух струнных генераторов, комбинируя нелинейную зависимость струны и квадратичную зависимость первичного преобразователя измеряемого параметра в силу.

В третьей главе теоретически и экспериментально исследуются дифференциальные преобразователи с постоянной силой начального натяжения. Такой преобразователь состоит из двух струнных генераторов, частоты которых дифференциально изменяются под действием измеряемой силы. Дифференциальная схема позволяет получить линейную зависимость разности частот двух струн $\Delta f = f_2 - f_1$ от измеряемой силы $\Delta F = \Delta F_n / 2l\sqrt{F_0 \rho}$, где F_0 - сила начального натяжения струны, $2\Delta F$ - измеряемая сила. Максимальная погрешность нелинейности при аппроксимации хордой составляет

$$\delta_m = \frac{1}{12\sqrt{3}} \left(\frac{\Delta F_m}{F_0} \right)^2, \quad (5)$$

где ΔF_m - максимальное значение изменения силы натяжения.

В диссертации предложено два типа преобразователей, которые обеспечивают высокую стабильность характеристик и малую температурную погрешность. Начальное натяжение струн определяется пружиной с малой жесткостью и не зависит от температурных деформаций.

В зависимости от требований к выходному сигналу, т.е. от соотношения начального и максимального значения частоты, возможно несколько режимов работы:

- 1/ выходная частота изменяется от нуля до Δf_m и может изменить знак в соответствии с изменением знака ΔF . Такие требования возникают в измерительных системах с интегрированием выхода. Действительная зона нечувствительности прибора определяется взаимной синхронизацией генераторов.
- 2/ При фиксированной полосе работы вторичных цифровых устройств задано минимальное Δf_0 и максимальное Δf_m значения частот.
- 3/ Задана максимальная частота Δf_m , а начальная может отличаться от нуля, но выбирается произвольно относительно Δf_m . Тогда можно выбрать параметры струн или лент так, что нелинейность $\delta_m = (\Delta F_m / F_0)^2 / 32$, т.е. меньше 1/5.

Разработан и экспериментально исследован преобразователь малых сил и деформаций с немагнитными струнами и преобразователь силы 0-5 кг с колеблющимися ферромагнитными лентами. Преобразователь малых сил и деформаций состоит из двух вольфрамовых струн, расположенных параллельно или под малым углом и натянутых пружиной с малой жесткостью. Погрешность нелинейности преобразователя

не превосходит $\pm 0,2\%$, а неустойчивость характеристики - $0,05\%$, возможна плавная регулировка чувствительности. Этот преобразователь допускает работу в тензометрическом режиме, когда приведенная жесткость упругого чувствительного элемента велика, но в этом случае неустойчивость характеристики возрастает до $0,2\%$.

При значительных измеряемых силах и, следовательно, сечениях струны или ленты, целесообразно возбуждать электромагнитно, поэтому преобразователь силы $0,5$ кг в частоту выполнен на ферромагнитных лентах. Ленты размещены под углом 90° друг к другу и предварительно натянуты пружиной с малой жесткостью. Плавная регулировка чувствительности осуществляется изменением натяжения пружины. Преобразователь предназначен для измерения давления и других параметров, предварительно преобразованных в силу $0,5$ кг и может обеспечить высокую собственную частоту измерительной системы, а следовательно, принципиальную вибро- и ударопрочность.

Если выходная частота дифференциального преобразователя $\Delta f = f_2 - f_1$ изменяется от нуля, то вблизи нулевого значения измеряемого параметра возникает зона нечувствительности, которая вызвана взаимной синхронизацией двух струнных генераторов. Ограничение чувствительности существенно для приборов с интегрированием выходного сигнала, например, для струнных акселерометров. Взаимная синхронизация двух струнных генераторов определяется механической и электрической связью. Механическая связь вызвана тем, что колебания одной струны изменяют натяжение другой /параметрическая связь/. Электрическая связь возни-

кает за счет общего сопротивления заземления и связь через источники питания. На основе анализа уравнений связанных генераторов найдены условия, при которых зона нечувствительности может быть существенно уменьшена.

Уравнения, описывающие поведение двух струнных генераторов с механической связью при выполнении условия /3/ и мягком возбуждении могут быть сведены к системе из двух уравнений

$$\begin{aligned} \ddot{u}_1 + 2\beta(\dot{u}_1) + \omega_1^2 n_1^2 u_1 + h_1 u_1^3 + h_{12} u_1 u_2^2 &= 0 \\ \ddot{u}_2 + 2\beta(\dot{u}_2) + \omega_2^2 n_2^2 u_2 + h_2 u_2^3 + h_{12} u_1^2 u_2 &= 0, \quad /6/ \end{aligned}$$

где $\beta(\dot{u}_i) = \frac{1}{2} S_i - \beta_0 - \frac{1}{6} S_3 \dot{u}_i^3$
 u_1, u_2 - координаты и ω_1, ω_2 - собственные частоты каждой струны, h_1, h_{12} - постоянные коэффициенты.

В акселерометре величина h_{12} зависит от инерционной массы. Решение уравнений /6/ асимптотическим методом позволяет определить зону взаимной синхронизации, которая зависит от амплитуды колебаний в каждом генераторе и симметрии колебательной системы.

Вблизи зоны синхронизации выходная частота будет периодической функцией времени. В этом случае получено решение уравнений /6/ при слабой связи двух автоколебательных систем

$$h_1 u_1^2 / \omega \ll \beta \quad . \quad \text{Определена величина погрешности преобразователя вне зоны синхронизации.}$$

Влияние электрической связи можно уменьшить, вводя искусственную связь между генераторами другого знака. Из уравнений, учитывающих электрическую и механическую связь, следует, что введение двух регулировок: амплитуды колебаний одного генератора

и величины искусственной связи позволяет уменьшить зону нечувствительности при $n_1 = n_2$. Это хорошо подтверждается экспериментально. Другой эффективный способ уменьшения зоны нечувствительности состоит в возбуждении струн на гармониках $n_1 \neq n_2$.

Высокая точность и быстроедействие частотных датчиков делают в ряде случаев целесообразным применение их в системах регулирования. Для аналоговых систем регулирования и связи с приборами унифицированных систем ГСП предложен преобразователь частоты в постоянный ток с релейной обратной связью. Это позволяет получить высокую линейность и мощность, достаточную для целей регулирования.

В четвертой главе исследован дифференциальный преобразователь со стабилизацией суммы частот двух струн. Стабилизация осуществляется введением обратной связи, регулирующей начальное натяжение струн по частоте эталонного генератора. Тогда выходная частота Δf равна:

$$\Delta f = \frac{\Delta F \cdot n}{2 \rho l^2 (f_1 + f_2)} \quad /7/$$

Стабилизация суммы частот не только повышает линейность, но и исключает зависимость чувствительности от силы начального натяжения. Точность преобразования определяется стабильностью параметров струн l, ρ и работой системы стабилизации частоты $f_1 + f_2$.

Методические погрешности преобразователя вызваны собственной жесткостью струн, упругим удлинением и неидентичностью параметров двух струн. Максимальное значение погрешности нелинейности при учете собственной жесткости и упругого удлинения составляет:

$$\delta_m = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[\frac{n^2 \Delta \sigma_m^2}{l^6 \gamma^2 (f_1 + f_2)^5} \sqrt{\frac{E J}{\rho}} + \frac{n^2 \Delta \sigma_m^2}{4 E l^2 \gamma (f_1 + f_2)^2} - \frac{\Delta \sigma_m^2}{E^2} \right] /8/$$

где $\Delta \sigma_m = \Delta F_m / S$
 J - момент инерции сечения струн.

Для струн круглого сечения можно учесть только разброс длин двух струн $l_2 = l_1 + \Delta l$, что определяет нелинейность:

$$\delta_m = \frac{\Delta F_m \cdot \Delta l}{16 F_0 l_1} \quad /9/$$

Анализ методических погрешностей показывает, что стабилизация суммы частот позволяет получить высокую точность /порядка 10^{-4} /, которая необходима в ряде прецизионных устройств.

Система стабилизации суммы частот обеспечивает высокую точность и может работать при значительных отклонениях стабилизируемой частоты. Таким требованиям удовлетворяют системы с нулевым частотным детектором. Работа системы регулирования с нулевым частотным детектором рассмотрена при малых отклонениях стабилизируемой частоты. В этом случае система регулирования сводится к линейной системе с импульсным элементом, осуществляющим интегральную частотно-импульсную модуляцию. Модуляция делает всю систему существенно нелинейной. Определена частота ω автоколебаний в такой системе

$$\sum_0^{\infty} (-1)^k \{h(\frac{\pi}{\omega} k) - h[\frac{\pi}{\omega} (k+1)]\} = 1 \quad /10/$$

и условие существования периодического режима

$$\sum_0^{\infty} (-1)^k h'[\frac{\pi}{\omega} (k+1)] \leq \lambda \quad /11/$$

где $h(t)$ - переходная функция линейной части системы,
 λ - зона нечувствительности по частоте.

Отличие периодического режима в системе с интегральным частотно-импульсным модулятором от периодического режима в релейной системе состоит в том, что частота автоколебаний не зависит от зоны нечувствительности. Возможно подавление автоколебаний путем смещения характеристики.

Вибрации по оси чувствительности дифференциального преобразователя приводят к дополнительной погрешности.

Рассмотрено влияние гармонических вибраций с частотой

$\Omega_v \ll 2\pi f$, где f - частота струнного генератора. Эти вибрации приводят к амплитудной и частотной модуляции. АМ не может быть отделена по частоте от выходной частоты Δf , поэтому необходимо вводить ограничение на выходе генератора безынерционной нелинейностью, что устраняет АМ.

Погрешность от действия вибраций по оси чувствительности для преобразователя с постоянной силой начального натяжения равна:

$$\delta = \frac{\varepsilon^2 (3 - \varepsilon^2)}{16 (1 - \varepsilon^2)^2} \left(\frac{\Delta F_v}{\Delta F} \right)^2, \quad /12/$$

где $2\Delta F_v$ - сила от действия вибраций, $\varepsilon = \Delta F / F_0$

В преобразователе со стабилизацией суммы частот погрешность от действия вибраций практически не отличается от /12/.

Экспериментальное исследование преобразователя со стабилизацией суммы частот показало высокую линейность $1/7 \cdot 10^{-4}$ и стабильность характеристики. Температурная погрешность без термокомпенсации составляет 0,03% на 10°C .

Дифференциальные преобразователи могут применяться в системах измерения и интегрирования ускорений. При измерении малых ускорений существенные погрешности вносит подвес инерционной

массы. Предложен метод измерения малых ускорений струнным или любым другим частотным датчиком с модуляцией частоты датчика частотой вращения преобразователя с инерционной массой. Модуляция устраняет погрешность, вносимую упругим подвесом массы и позволяет получить линейность при интегрировании выходного сигнала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

I. При теоретическом и экспериментальном исследовании струнного генератора получены следующие результаты:

а) Показано, что пространственное движение струны вызывает двузначную зависимость частоты от силы натяжения. Найдены условия однозначной зависимости частоты генератора от измеряемой силы и определена зависимость частоты от амплитуды колебаний. Разработаны схемы генераторов, обеспечивающие высокую стабильность частоты.

б) Экспериментально установлено, что последствие уменьшается при увеличении длины струны величина последействия снижена до $3 \cdot 10^{-5}$.

в) В широком диапазоне параметров струн и лент экспериментально определено значение добротности, необходимое для расчета генераторов.

г) Предложен дифференциальный преобразователь с постоянной силой натяжения, обеспечивающий линейность и высокую стабильность характеристики. На его основе разработан и исследован преобразователь малых сил и деформаций с вольфрамовыми струнами и преобразователь сил 0-5кг с ферромагнитными лентами, име-

ний высокую собственную частоту измерительной системы.

3. На основании исследования взаимной синхронизации струнных генераторов в дифференциальном преобразователе показано, что можно существенно уменьшить зону нечувствительности даже при возбуждении струн на равных гармониках. Найдены условия получения минимальной зоны нечувствительности.

4. Показано, что стабилизация суммы частот струн дифференциального преобразователя повышает линейность и общую точность. При экспериментальном исследовании преобразователя такого типа получена высокая линейность и стабильность характеристики.

5. Приведен анализ влияния вибраций и даны рекомендации по выбору собственных частот струн и девиации частоты.

6. Для повышения стабильности при измерении малых ускорений предложен метод измерения с низкочастотной модуляцией частоты струнного преобразователя.

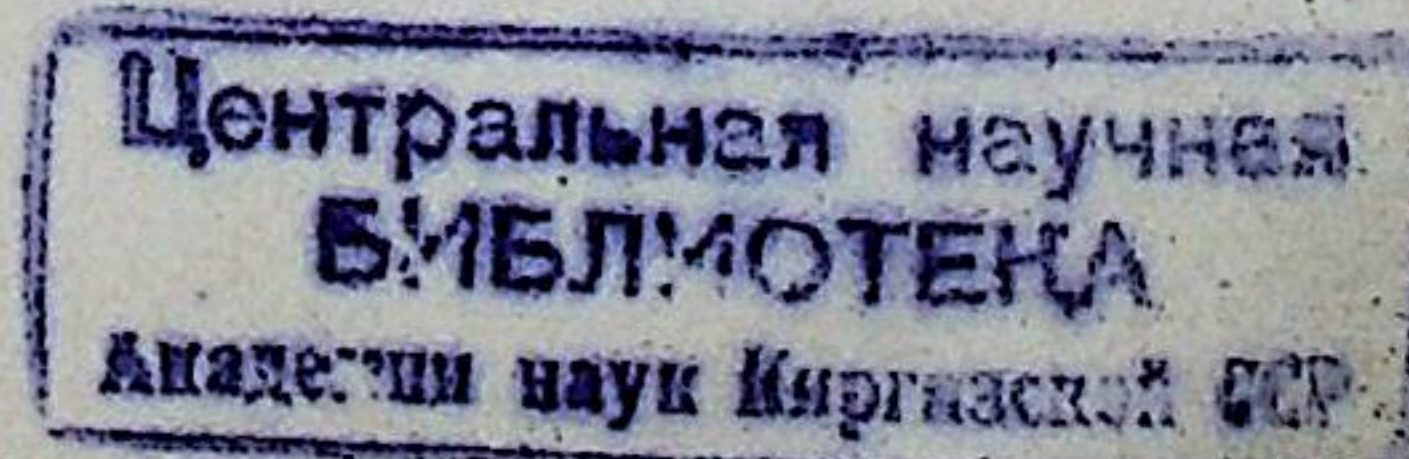
Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Цодиков Ю.М. Исследование струнного автогенератора. Автоматика и телемеханика, № 3, 1965.
2. Цодиков Ю.М. Струнные датчики с линейной характеристикой. Сб. "Теория и применение автоматических систем". 1964.
3. Цодиков Ю.М. Преобразователь частоты в постоянный ток. Автоматика и телемеханика, № 4, 1962.
4. Брук Ю.М., Васин Р.М., Цодиков Ю.М. Способ измерения усилий. Авт.свид. № 153392, "Бюллетень изобретений и товарных знаков".
5. Цодиков Ю.М. Дифференциальный датчик усилий и деформаций. Приборостроение, № 10, 1965 /принята к печати/.
6. Цодиков Ю.М. О повышении чувствительности струнного акселерометра. Известия высших учебных заведений "Приборостроение" /принята к печати/. № 5, 1965.

от 18/III - 65г ✓ Т-08981

Зак 303 тир 100

ИАТ (ТК)



308659