

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

Красько Александр Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ
СТЕКЛОНИТИ В ПРОЦЕССЕ ВЫРАБОТКИ

Специальность 05.13.07 Автоматическое управление
технологическими процессами

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических
наук

Минск - 1973

Работа выполнена в лаборатории промышленной энергетики Белорусского филиала энергетического института им. Г.М.Крижановского. Экспериментальная часть работы проведена на Полоцком заводе стекловолокна им. Ленинского Комсомола Белоруссии.

Научный руководитель кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Н.И. ТУШКЕВИЧ

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН БССР,
доктор технических наук,
профессор А.Г. ШАНКОВ,
кандидат технических наук,
доцент Г.П. ШЕЙНА

Ведущее предприятие Всесоюзный научно-исследовательский институт стеклопластиков и стекловолокна (ВНИИСПВ)

Автореферат разослан " 10 " *марта* 1973г.

Защита диссертации состоится " 13 " *апреля* 1973г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте в 9³⁰ ауд. 322 2-ой учебный корпус г. Минск, Ленинский проспект, 65.

Отзыв (в 2-х экземплярах), заверенный печатью, просим направлять по адресу: 220027 г. Минск, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт. Ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БИИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат технических наук
Л.Л. ЧЕРВИНСКИЙ

В В Е Д Е Н И Е

Промышленное производство и широкое практическое применение стеклянного волокна и изделий из него получили за последние 20 лет. Этому способствовали высокие физико-технические характеристики стеклянного волокна, такие как стойкость к коррозии, высокая прочность, негорючесть, хорошие электро-, тепло- и звукоизоляционные свойства.

Наиболее широкое применение стеклянное волокно и изделия из него нашли в энергетическом машиностроении и при производстве различного электротехнического оборудования для авиации, надводного и подводного флота, космической техники и других отраслей промышленности.

Одной из главных задач технологического процесса получения непрерывного стеклянного волокна является обеспечение заданной толщины и неровности нити. Решение этого вопроса возможно только на основе создания совершенных схем автоматизации процесса выработки, что в свою очередь, требует разработки надежных методов автоматического контроля толщины нити в процессе производства.

Принятая в настоящее время выборочная методика оценки толщины после окончания цикла намотки не может предотвратить появление брака и не позволяет активно воздействовать на процесс.

Отсутствие средств измерения толщины нити в процессе выработки исключает также возможность дать точную количественную оценку влияния отдельных факторов на качество нити, что весьма необходимо при разработке нового оборудования и новых технологических схем.

Измерение толщины движущейся нити представляет достаточно трудную инженерную задачу. Это объясняется как быстротечностью процесса выработки, так и специфическими свойствами объекта измерения и условиями производства. Поэтому наиболее удовлетворительный метод контроля и его приборная реализация могут быть найдены на основании тщательного изучения технологии процесса выработки и особенностей объекта измерения — стеклонити.

Настоящая работа посвящена поиску и разработке метода и

устройств для непрерывного контроля толщины нити в процессе выработки.

Анализ различных методов измерения подобных объектов показывает, что для данной цели наиболее удовлетворительным является частотный метод, основанный на зависимости частоты собственных колебаний нити от толщины. В работе дано принципиальное и конструктивное решение частотного преобразователя толщины нити и его отдельных элементов.

В теоретическом плане рассмотрены вопросы влияния движения нити на частоту колебаний, а также условия возникновения и устойчивости автоколебаний. Дан анализ погрешностей предлагаемого метода и способы их уменьшения. Теоретические выводы подтверждены результатами производственных испытаний.

Рассмотрены вопросы технико-экономической эффективности применения частотных преобразователей для контроля толщины стеклонити в процессе выработки.

Работа состоит из пяти глав.

I

В первой главе даны краткие сведения о технологии получения непрерывного стеклянного волокна и влияния различных технологических параметров на качество (толщину) нити, а также рассмотрен вопрос состояния автоматизации процессе выработки. Дан анализ погрешностей существующего метода определения средней толщины нити на бобине по единичному замеру веса 100-метрового участка.

На основании экспериментальных исследований установлено, что изменение толщины нити по длине является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения.

Измерения толщины всей вырабатываемой нити в течение длительного времени показали, что 15% бобин имели нить, выходящую за пределы заданного ассортимента.

Для получения качественной нити требуется более достоверная оценка толщины нити по бобине и на основании этого периоди-

ческая коррекция режима печи. Однако при существующих методах контроля, увеличение числа замеров по каждой бобине привело бы к значительному увеличению штата ОТК и поэтому не может считаться приемлемым. Кроме того такой контроль не является оперативным, поскольку измерения производятся после окончания цикла намотки.

Исходя из этого, в работе ставится задача на основании анализа процесса производства и свойств измеряемого объекта (нити) найти удовлетворительный метод автоматического контроля толщины стеклонити в процессе выработки и дать его приборную реализацию.

Такое решение позволило бы не только получить более достоверные результаты о качестве продукции, но и более оперативно изменять технологический режим, а также создать предпосылки для построения схемы автоматической коррекции режима печи по выходному параметру.

II

Вторая глава посвящена анализу различных методов измерения с учетом особенностей нити и условий производства.

Как известно, в настоящее время для исследования неровности различных нитей в лабораторных условиях используются следующие методы:

1. оптический (по ширине светотени);
2. пневматический (по расходу воздуха через сопло, через которое движется нить);
3. емкостной (по емкости конденсатора, между пластинами которого движется нить);
4. частотный (по частоте собственных колебаний) нити.

Чтобы оценить возможности упомянутых методов, необходимо выяснить связь между контролируемым параметром и толщиной, а также влияние условий производства на точность измерения.

С этой целью были изучены изменение формы поперечного се-

чения движущейся нити, флуктуации толщины на коротких участках и возможные пределы изменения натяжения и скорости выработки в условиях производства.

Для определения формы сечения движущейся нити была разработана методика кинофотосъемки нити в двух взаимноперпендикулярных направлениях на один кадр. Обработка результатов кино съемки (порядка 5000 кадров) показала, что движущаяся нить может иметь различную форму поперечного сечения. Коэффициент вариации усредненных размеров ширины светотени достигает 20%, в то время как коэффициент вариации толщины на этих участках был порядка 3%. По этой причине оптический метод нельзя считать удовлетворительным.

Главным недостатком пневматических датчиков следует считать: сложность заправки нити, зависимость точности измерения от загрязнения и пропиливания сошла в процессе работы. Кроме того такие измерительные устройства обладают большой инерционностью (0,5 - 10 сек).

Измерительные схемы, основанные на емкостном принципе не пригодны для данной цели по той причине, что погрешность измерения зависит от влажности окружающей среды. В производственных условиях имеет место значительное колебание влажности между пластинами измерительного конденсатора, т.к. движущаяся нить увлекает за собой пары и брызги замазливателя.

Из всех упомянутых ранее методов наиболее перспективным является частотный. Сущность частотного метода заключается в том, что нить на определенном фиксированном участке L может рассматриваться как натянутая струна, собственная частота колебаний которой f_0 определяется выражением

$$f_0 = \frac{\sqrt{F}}{2L} \rho, \quad (1)$$

где F - натяжение, ρ - линейная масса.

Поскольку линейная масса ρ пропорциональна толщине нити T , то при постоянстве всех остальных параметров, входящих в выражение (1), частота собственных колебаний f_0 определяет

толщину нити T , т.е.

$$\rho = T = \frac{K}{f_0^2} \quad (2)$$

Как показали лабораторные испытания точность определения T по f_0 может быть достигнута порядка $\pm 1\%$.

Для более достоверной оценки возможностей частотного метода в условиях производства необходимо знать величину и пределы колебания натяжения F и скорости выработки V_0 .

Измерение натяжения производилось для нитей 10 – 16 текс на стеклопрядильных агрегатах СПА-6М, оборудованных как обычными нитесборниками, так и валковыми замасливающими устройствами. Результаты опыта показали, что при постоянной скорости выработки изменение толщины в указанных пределах не приводит к резкому изменению натяжения. Для стеклонитей 10–16 текс с обычными нитесборниками при скорости выработки $V_0 = 65,5$ м/сек величина натяжения изменяется в пределах 0,60 – 0,65 н, а при $V_0 = 35$ м/сек соответственно 0,48 – 0,50 н. При валковых замасливающих устройствах и $V_0 = 55,5$ м/сек для этих же ассортиментов натяжение равно 0,7 – 0,73 н.

Во всех опытах максимальное отклонение натяжения от среднего значения за счет различных причин было в пределах $\pm 5,3\%$.

Колебание скорости выработки V_0 за счет изменения напряжения на зажимах приводного двигателя обмотки в пределах $\pm 10\%$ и роста диаметра поковки не наблюдались более чем $\pm 2,5\%$.

Таким образом, полученные данные позволяют предполагать, что в условиях производства частотный метод измерения может дать удовлетворительные результаты. Возбуждение устойчивых колебаний движущейся нити с переменной линейной массой возможно осуществить только по автогенераторной схеме. В данной работе для этой цели предлагается схема частотного преобразователя / I /, представляющего собой автогенератор резонансных колебаний нити, у которого колебательным звеном, задающим частоту, является нить, а функции положительной обратной связи выполняют фотодатчик, усилитель и вибратор. Блок-схема частотного

преобразователя показана на рис. 1.

Принцип работы автогенераторной схемы состоит в следующем. Незначительные резонансные колебания нити на участке $A - B$ (расстояние L между опорами в дальнейшем называется базой прибора) улавливается фотодатчиком 1, преобразуются в электрический сигнал, усиливаются усилителем 2 и с помощью вибратора 3, на мембране которого установлена опора B , передаются нити. Если соблюдены присущие всякой автогенераторной схеме условия баланса фаз и амплитуд, то возникают устойчивые резонансные колебания нити в виде стоячей волны.

Резонансная частота нити определяется по частоте тока вибратора с помощью стрелочного или цифрового частотомера. Цифровые частотомеры предпочтительнее как с точки зрения точности, так и в том случае, когда необходимо усреднять частоту за какой-то определенный период времени, т.е. определять толщину на определенной длине.

III

Третья глава работы посвящена некоторым теоретическим вопросам частотного метода. В ней рассмотрено: влияние движения и демпфирующего действия среды на частоту собственных колебаний нити, определены выражения для передаточной функции нити в схеме автогенератора, а также рассмотрены вопросы возникновения и устойчивости автоколебаний в автогенераторной схеме с инерционными и дифференцирующими свойствами обратной связи.

Для исследования этих вопросов использован аппарат математической физики и приближенные методы теории нелинейных систем автоматического регулирования (метод гармонического баланса).

Поскольку по своим свойствам нить напоминает струну, то колебания неподвижной нити в консервативной среде можно описать известным уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (3)$$

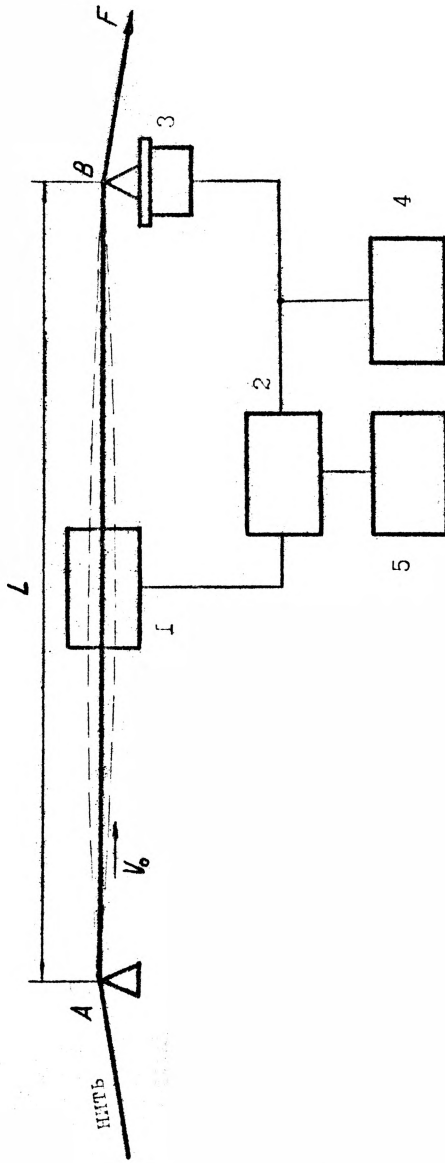


Рис. 1. Блок-схема преобразователя толщины стеклонити:
 1 - фотодатчик; 2 - усилитель; 3 - вибратор;
 4 - частотомер; 5 - блок питания

где u - ордината колеблющейся нити, x - абсцисса, t - время, $a = \sqrt{F/\rho}$ - скорость распространения волны. Из решения уравнения (3) вытекает выражение (I) для частоты собственных колебаний.

Колебания движущейся нити со скоростью v_0 можно представить в подвижной системе координат u_0, x_1 , связанной с неподвижной u, x соотношением

$$x_1 = x + v_0 t. \quad (4)$$

При переходе в подвижную систему координат уравнение колебаний нити может быть представлено:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (a^2 - v_0^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} - 2v_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x_1}. \quad (5)$$

Из решения уравнения (5) вытекает выражение для частоты собственных колебаний $f_{ог}$ движущейся нити вида:

$$f_{ог} = \frac{1}{2La} (a^2 - v_0^2), \quad (6)$$

или

$$f_{ог} = \frac{a}{2L} (1 - m^2), \quad (7)$$

где $m = v_0/a$ - отношение линейной скорости к волновой. Как видно из (6) и (7) движение несколько снижает частоту собственных колебаний нити. Это снижение зависит от отношения линейной и волновой скоростей и определяется выражением

$$\Omega = (1 - m^2), \quad (8)$$

где $\Omega = f_{ог}/f_0$ - относительная частота колебаний движущейся нити.

Как показывают экспериментальные измерения, величина коэффициента m для стеклонитей в процессе выработки может быть в пределах 0,1 - 0,3. Поэтому частота собственных колебаний движущейся нити будет на 1-9% ниже частоты собственных колебаний неподвижной нити.

ний неподвижной нити.

Влияние демпфирующего действия среды на частоту колебаний определялось на основании анализа осциллограмм затухающих колебаний нити. Из результатов опытов установлено, что нить, как колебательное звено, обладает высоким коэффициентом добротности ($Q \approx 100$) и малой степенью успокоения ($\zeta' = 0,003 + 0,006$). В силу этого ее резонансная частота f_p незначительно отличается от частоты собственных колебаний $f_{св}$, рассчитанный по выражению (6) (разница составляет примерно 0,001 %). Из осциллограмм затухающих колебаний была установлена также пропорциональность сопротивления среды скорости поперечных колебаний. Однако, эта пропорциональность наблюдается только при малых амплитудах колебаний, когда амплитуда в точке $x = L/2$ не превышает величину $0,005 L$.

Под передаточной функцией нити в схеме частотного преобразователя (рис. 1) понимается отношение изображения выходного сигнала в месте установки фотодатчика (точка $x = L/2$) к изображению входного сигнала на опоре B при граничных условиях вида:

$$U(0, t) = 0, \quad U(L, t) = U_2 \cdot \sin \omega t, \quad (9)$$

где U_2 — амплитуда колебаний опоры B .

В результате решения уравнений колебания нити с учетом сопротивления среды

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} \quad (10)$$

для неподвижной нити и

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\alpha^2 - v_0^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2v_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} - 2\alpha \frac{\partial u}{\partial t} - 2v_0 \alpha \frac{\partial u}{\partial x} \quad (11)$$

для движущейся нити с помощью преобразователя Лапласа получены соответственно следующие выражения для передаточных функций:

$$W(p) = \frac{1/2}{\operatorname{Ch} \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{T_g^2 p^2 + 2T_g \zeta p} \right]}, \quad (12)$$

$$W(p) = \frac{1/2 \cdot e^{-\frac{\pi}{2} m \zeta'}}{\operatorname{Ch} \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{T_g'^2 p^2 + 2T_g' \zeta' p} \right]} \cdot e^{-\frac{\pi}{2} T_g' m p}, \quad (13)$$

где T_g и T_g' - постоянные времени неподвижной и движущейся нити, ζ и ζ' - соответственно степени успокоения, $m = v_0/a$.

Для амплитудно- и фазочастотных характеристик соответственно получены следующие выражения:

$$W(\Omega) = \frac{1/2}{\sin \frac{\pi}{2} \Omega \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi}{2} \zeta \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{2} \Omega} \cdot \operatorname{cth} \frac{\pi}{2} \zeta}, \quad (14)$$

$$\varphi_1 = -\operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \Omega \cdot \operatorname{th} \frac{\pi}{2} \zeta \right] \quad (15)$$

для неподвижной нити и

$$W(\Omega) = \frac{1/2 \cdot e^{-\frac{\pi}{2} m \zeta'}}{\sin \frac{\pi}{2} \Omega \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi}{2} \zeta' \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{2} \Omega} \cdot \operatorname{cth} \frac{\pi}{2} \zeta'}, \quad (16)$$

$$\varphi_{1g} = -\operatorname{arctg} [\varphi_1 + \psi] \quad (17)$$

для движущейся нити,

где φ_1 - фаза сигнала в точке $x = L/2$ при $v_0 = 0$, φ_{1g} - фаза сигнала в точке $x = L/2$ при $v_0 \neq 0$, $\psi = -j\frac{\pi}{2} m \Omega$ - фазовое запаздывание при $v_0 \neq 0$.

Максимальные значения амплитуды колебания нити в точке $x = L/2$ будут при резонансной частоте ($\Omega = 1$) и определяются соответственно выражениями:

$$U_{1(\Omega=1)} = \frac{1}{\pi \zeta} \quad (18)$$

для неподвижной нити и

$$U_{1(\Omega=1)} = \frac{1}{\pi \zeta'} \cdot e^{-\frac{\pi}{2} m \zeta'} \quad (19)$$

для движущейся нити, а значения фазы соответственно

$$\varphi_1 = -\frac{\pi}{2} \quad (20)$$

и

$$\varphi_{1g} = -\arctg\left[\frac{\pi}{2} + \psi\right], \quad (21)$$

где $\psi = -\frac{\pi}{2} m$.

Результаты расчета АФЧХ для стержней толщиной 10-18 мм показывают, что для частот близких к резонансной ($\Omega = 0,98 + j0,02$), годограф АФЧХ нити в комплексной плоскости представляет окружность, уравнение которой можно записать

$$\left[Im(w) + \frac{K}{\pi \zeta}\right]^2 + [Re(w)]^2 = \left[\frac{K}{\pi \zeta}\right]^2 \quad (22)$$

при $v_0 = 0$ и

$$[Im(w) + \frac{K}{\pi \zeta'} \cos \psi]^2 + [Re(w) + \frac{K}{\pi \zeta'} \sin \psi]^2 = \left[\frac{K}{\pi \zeta'} \right]^2 \quad (23)$$

при $V_0 \neq 0$,

где K - коэффициент передачи нити.

Вид АФЧХ движущейся нити в диапазоне частот $\Omega = (0,99 \div 1,01)$ при $m = (0,1 \div 0,3)$ и $\zeta' = 0,004$ показан на рис. 2. Из анализа АФЧХ нитей вытекает, что для практических расчетов колеблющаяся нить можно рассматривать как классическое колебательное звено при $V_0 = 0$, или как последовательное соединение колебательного звена и звена запаздывания при $V_0 \neq 0$.

Выражение (13) для движущейся нити получено при направлении движения от опоры A к B . Если изменить направление движения на обратное (от B к A), то передаточная функция нити будет представлять комбинацию колебательного звена и звена запаздывания с положительным аргументом, т.е. передаточная функция будет

$$W(p) = \frac{1/2 \cdot e^{-\frac{\pi}{2} m \zeta' p}}{\operatorname{Ch} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{T_0'^2 p^2 + 2 T_0' \zeta' p} \right]} \cdot e^{\frac{\pi}{2} T_0' m p} \quad (24)$$

Устойчивые автоколебания в схеме частотного преобразователя могут быть обеспечены, если соблюдаются условия баланса амплитуд и фаз, которые запишутся следующим образом:

$$K_1(\omega) \cdot K_{oc}(\omega, \omega) = 1, \quad (25)$$

$$\varphi_{1g} + \varphi_{oc} \stackrel{\pm}{=} 2\pi n, \quad (26)$$

где $K_1(\omega)$ - комплексный коэффициент передачи нити при резонансе,
 $K_{oc}(\omega, \omega)$ - комплексный коэффициент передачи обратной связи,

φ_{oc} - фаза сигнала на выходе обратной связи.

При изменении линейной массы движущейся нити, чтобы обеспе-

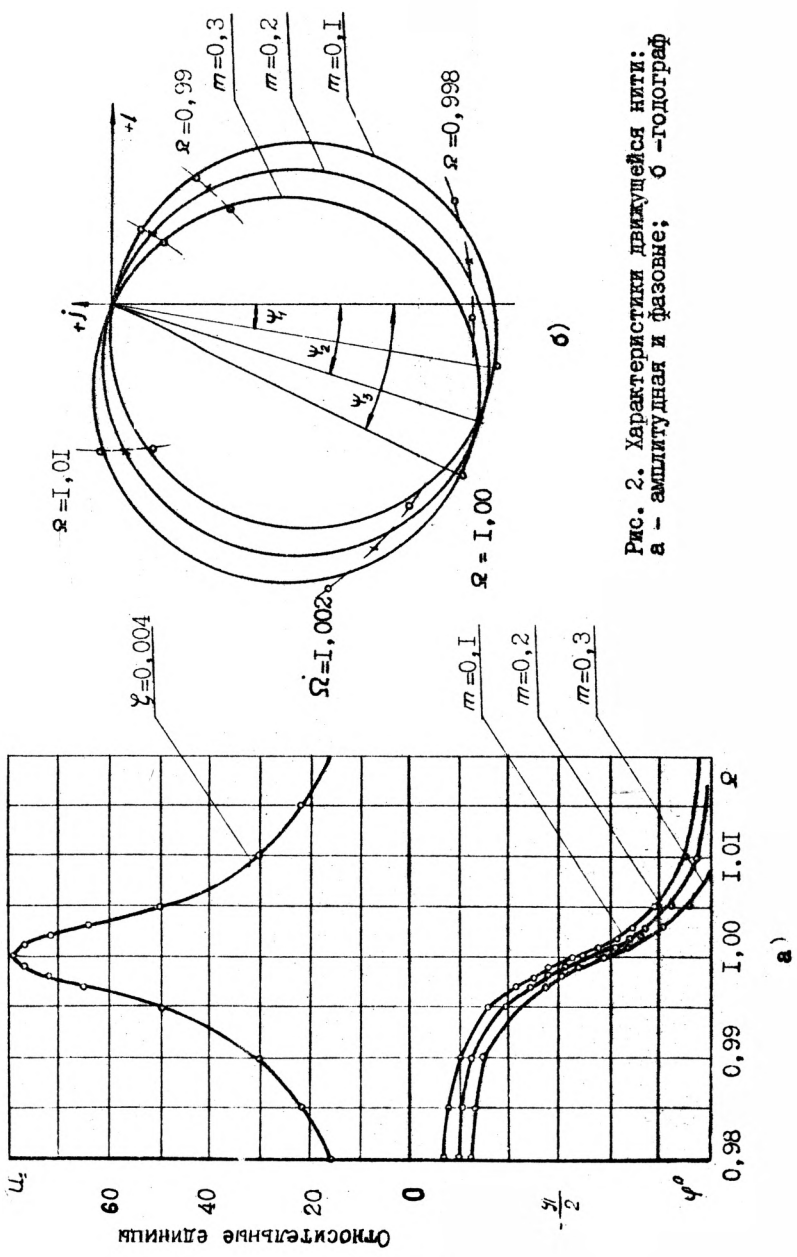


Рис. 2. Характеристики движущейся нити:
 а - амплитудная и фазовые; б - годограф

чить колебания с постоянной амплитудой, как видно из (25), коэффициент передачи обратной связи должен зависеть от частоты и амплитуды. В действительности в целях упрощения схемы усилителя нет необходимости в стабилизации амплитуды.

Задача в этом случае сводится к тому, чтобы при изменении толщины нити от верхнего до нижнего пределов не нарушалась устойчивость автоколебаний, т.е. должно соблюдаться условие

$$K_{oc_{2p}}(U) > 1/K_B(\omega) > 1/K_{in}(\omega), \quad (27)$$

где $K_{oc_{2p}}(U)$ — граничное значение коэффициента передачи обратной связи, $K_B(\omega)$ и $K_{in}(\omega)$ — коэффициенты передачи нити при резонансе соответственно для верхнего и нижнего значений толщины.

Несоблюдение условия баланса фаз приводит к отклонению частоты от резонансной, величина которого может быть определена по известному выражению

$$\Delta\Omega = \pm \frac{\Delta\varphi}{2Q}, \quad (28)$$

где $\Delta\varphi$ — небаланс фаз, Q — добротность колебательного звена (нити).

В работе дан анализ автогенераторных схем с неподвижной и движущейся нитью толщиной 10–18 текс при $m = 0, 1+0,3$ для случаев, когда обобщенная обратная связь обладает свойствами инерционного звена и реального дифференцирующего звена.

Результаты расчета показывают, что благодаря хорошим колебательным свойствам нити частота автоколебаний в рассмотренных схемах не значительно отличается от резонансной частоты нити. Даже при постоянной времени обратной связи T_{oc} , соизмеримой с постоянной времени нити T_p , частота периодического режима в замкнутой схеме отличается от резонансной примерно на 1%.

В четвертой главе рассмотрены вопросы конструктивного выполнения звеньев обратной связи и компоновки частотного преобразователя в целом.

В данной главе эти вопросы рассмотрены для прибора, предназначенного для измерения стеклонитей толщиной 10 - 16 текс. Это, однако, не исключает возможности использования принятых решений и методики расчета для других пределов толщины. Отличие будет заключаться только в исходных данных, определяемых нитью.

Отправными данными для расчета следует считать базу прибора L и параметры нити, такие как волновая α и линейная v_0 скорости.

Выбор базы определяет полосу рабочих (резонансных) частот и амплитуду колебаний нити в месте установки фотодатчика. Исходя из наличия свободного пространства по тракту движения нити на СПА, величина L для предварительных расчетов принята в пределах 250-350 мм. Окончательное значение L следует уточнить после изготовления вибратора, фотодатчика и усилителя и снятия АФЧХ всей обратной связи. Это позволяет выбрать такой диапазон рабочих частот на фазочастотной характеристике, где соблюдаются условия баланса фаз, и тем самым отказаться от фазовой коррекции схемы.

Для указанных ассортиментов нити 10-16 текс и значении

$L = 300$ мм исходные расчетные данные следующие:

$$F = 0,60 + 0,65н, \quad m = 0,2 + 0,27, \quad f_{0g} = 300 + 370 \text{ гц}, \\ \zeta' = 0,003 + 0,004, \quad \omega_1 = 0,5 + 1,5 \text{ мм.}$$

При $\zeta' = 0,003 + 0,004$ коэффициент передачи нити при резонансных колебаниях будет $|K_1| = 90 + 70$. Поэтому, чтобы обеспечить амплитуду колебаний нити $\omega_1 = 0,5 + 1,5$ мм, вибратор должен обеспечить амплитуду колебания опоры $\omega_2 = 5 + 20$ мкм.

Создание специальных вибраторов - достаточно трудная задача, и поэтому, как показано в работе, для этой цели с некоторой переделкой могут быть использованы головные телефоны ТА-56М. Снятие АФЧХ вибратора ТА-56М показывают, что в полосе частот 0 - 500 гц его можно рассматривать как безынерционное звено с

коэффициентом передачи $K_g = 1,3$ мкм/ма. В работе дается методика снятия АФЧХ вибраторов с малыми амплитудами (порядка 10 мкм) колебаний мембраны.

При разработке фотодатчика колебаний нити тип и конструкция фотоприемника и оптическая схема были выбраны для следующих условий работы: температура окружающей среды от +30 до +50°C, влажность до 80%, наличие загрязняющих факторов и сильных магнитных полей переменного тока. Кроме того, конструкция фотодатчика должна быть компактной и обеспечивать быструю установку и наладку (фокусировку и юстировку тени нити относительно фотоприемника) на работающей печи.

Анализ различных типов фотоприемников показал, что наиболее удовлетворительными характеристиками для этой цели обладают сернисто-кадмиевые фоторезисторы типа ФСК-П. Для увеличения помехозащищенности схемы и обеспечения простоты настройки разработана дифференциальная конструкция фотоприемника со светочувствительными поверхностями в виде сопряженных треугольников / 2 / или трапецией.

Оптическая система фотодатчика разработана на основе объектива типа ОМ-12 и имеет простую конструкцию, надежную защиту линз объектива и осветителя от загрязнения с помощью специальных насадок.

Снятые АФЧХ при модуляции светового потока колеблющейся нитью с амплитудой $U_f = 0,5+1,0$ мм показывают, что в диапазоне частот 100–600гц фотодатчик можно рассматривать как аперiodическое звено первого порядка с коэффициентом передачи $K_{\omega} = 4$ мкм/мм и постоянной времени $T_{\varphi} = 0,0006$ сек.

Усилитель преобразователя является связующим звеном между фотодатчиком и вибратором. Поэтому его схема и необходимые данные для расчета определяются параметрами фотодатчика и вибратора.

Как показали результаты расчета для обеспечения стационарной амплитуды колебаний нити $U_f = 0,5+1,5$ мм для нитей 10–16текс коэффициент передачи усилителя по току должен быть 3000–4000. Чтобы обеспечить коэффициент запаса автоколебаний по амплитуде порядка 8–10 крат, критическое значение коэффициента передачи усилителя должно быть соответственно 18000–23000. Эти данные, а также параметры вибратора и фотоприемника определили выбор двух-

тактной, двухкаскадной схемы транзисторного усилителя, что позволило получить достаточно мощный сигнал на выходе и исключить влияние четных гармоник.

Применение трансформаторных связей для согласования входа и выхода усилителя с фотоприемником и вибратором, а также первого каскада со вторым позволили повысить чувствительность схемы и мощность выходного сигнала при незначительной глубине модуляции светового потока.

Фазовые и амплитудные характеристики автогенераторной схемы представлены на рис. 3 и 4. Анализ фазовых характеристик обратной связи и нити показывает, что наиболее благоприятные условия баланса фаз в замкнутой схеме будут иметь место при частотах 320–400 гц.

Поэтому окончательное значение L было принято 290 мм. Для стеклонитей I0–I6 текс это определило полосу рабочих частот 319–394 гц. Для данной полосы рабочих частот незначительный небаланс фаз (см. рис. 3) имеет место только для крайних значений толщины нити I0 текс и I6 текс (+0,33 и - 0,42 радиан). В результате чего автоколебания в замкнутой схеме для этих значений толщины стеклонити совершаются с частотой, отличной от резонансной, соответственно на +0,16% и - 0,21%, что можно считать вполне допустимым.

Как видно из рис. 4, амплитуда колебания нити в месте установки фотодатчика при изменении толщины от I0 до I6 текс будет в пределах $U_1 = 1,0 \pm 1,1$ мм.

Снятые осциллограммы переходных процессов частотного преобразователя показали, что переход с одной частоты на другую при изменении натяжения или толщины стеклонити скачком практически осуществляется за один период колебания. Это свидетельствует о высоком быстродействии схемы и возможности ее применения для контроля изменения толщины быстродвижущихся нитей.

Конструктивное оформление прибора выполнено в виде двух блоков: блока фотодатчика и вибратора и блока усиления и измерения. Такое решение позволило вынести из зоны высоких температур электронную часть схемы и тем самым облегчить условие ее работы.

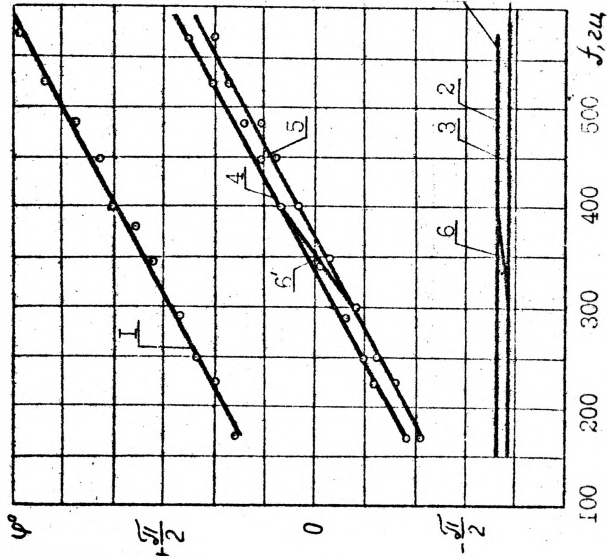


Рис. 3. Фазовые характеристики: 1-обратной связи; 2, 3 - стеклонити; толщиной 10 и 16текс; 6' - разомкнутую схему автогенератора при изменении толщины стеклонити в пределах 10-16текс

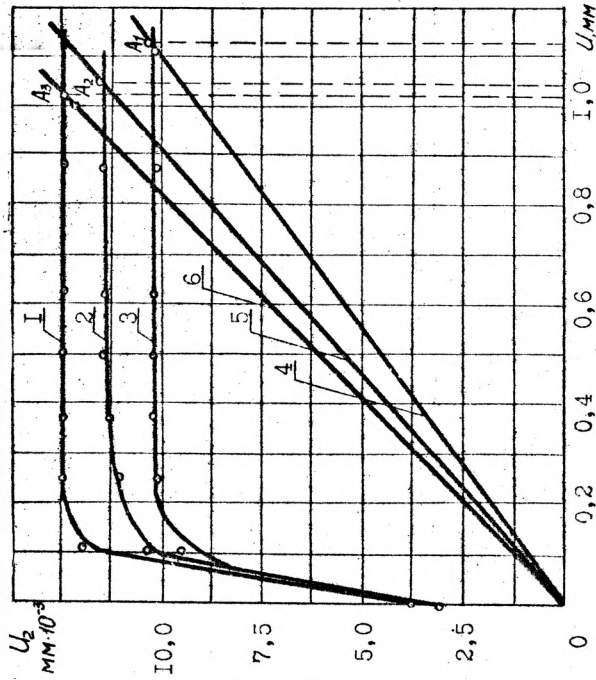


Рис. 4. Амплитудные характеристики автогенераторной схемы при толщине стеклонити 10, 13 и 16текс; 1-3 - обратная связь; 4-6 - стеклонити

В пятой главе диссертации рассмотрены вопросы погрешностей определения линейной массы стеклонити по частоте резонансных колебаний.

Поскольку частота резонансных колебаний нити зависит не только от ρ , но и от F , V_0 и L , то рассмотрено влияние нестабильности указанных параметров на точность определения линейной массы.

В работе показано, что относительная ошибка определения линейной массы при нестабильности параметров может быть определена по следующему выражению:

$$\delta_{\rho} = \left\{ \frac{\Delta F^2}{F^2} + \frac{16}{(4L^2 f_{0g}^2 + V_0^2)^2} [4L^2 f_{0g}^4 \Delta L^2 + 4L^4 f_{0g}^2 \Delta f_{0g}^2 + V_0^2 \Delta V_0^2] \right\}^{1/2}. \quad (29)$$

Поскольку в процессе измерения значения таких параметров, как V_0 и L , постоянны, а резонансная частота может быть измерена с высокой точностью, то основным источником погрешности, как показано, является нестабильность натяжения. Численно это выражается в том, что изменение натяжения на 1% приводит к ошибке в определении линейной массы в 1%.

Выполненные расчеты с учетом предельных отклонений всех параметров показывают, что максимальная погрешность при измерениях в условиях производства может быть порядка 5,6%, а с учетом только колебания натяжения - 5,3%.

Проведенные длительные производственные испытания частотно-го преобразователя толщины стеклонити в заводских условиях показали, что максимальная погрешность измерения не превышает величину 6%. Основной причиной погрешности является нестабильность натяжения за счет трения в замазливающей лотке. При более тщательной настройке замазливающего устройства погрешность измерения может быть снижена до 2%.

Конструктивное оформление частотного преобразователя отвечает поставленным требованиям с учетом условий производства.

Для уменьшения погрешностей измерения предложена схема

определения линейной массы с учетом изменения натяжения / 9 /.
 Для измерения натяжения предложена схема с частотным выходом на базе струнного преобразователя типа ПС, в которой натяжение нити определяется по частоте резонансных колебаний струны и связано соотношением

$$F = K f_c^2, \quad (30)$$

где F - натяжение нити, f_c - резонансная частота струны, K - коэффициент передачи схемы.

При использовании частотного преобразователя толщины стеклонити, описанного ранее, и датчика натяжения нити с частотным выходом линейная масса движущейся нити может быть определена по выражению

$$\rho = \frac{f_c^2}{D f_{og}^2 + C}, \quad (31)$$

где f_{og} - резонансная частота нити, f_c - резонансная частота струны, D и C - постоянные величины, определяемые параметрами схемы и технологического процесса.

Как показано в работе, при скоростях движения нити $V_0 = (0,1 \div 0,3) \text{ м}$ для определения линейной массы можно использовать выражение

$$\rho = \frac{1}{D} \left[\frac{f_c}{f_{og}} \right]^2. \quad (32)$$

Систематическая ошибка определения линейной массы в этом случае не превышает 1%.

Для измерения отношения частот можно использовать цифровые частотомеры или простейшие измерительные схемы на базе частотных сумматоров. Лабораторные испытания преобразователя с учетом измерения натяжения показали, что погрешность определения линейной массы по отношению частот при колебаниях натяжения в пределах $\pm 20\%$ может быть обеспечена $\pm 2\%$.

В работе показано, что годовой экономический эффект от вне-

дрения частотных преобразователей для контроля толщины стеклонити в процессе производства на заводе с производительностью 5000 т стекловолкна в год составляет порядка 35000 руб.

В работе также даны результаты производственных испытаний разработанных частотных датчиков толщины стеклонити в схеме автоматического регулирования режима печи по толщине.

ВЫВОДЫ

1. На основании длительного измерения толщины стеклонити в условиях производства и анализа результатов установлено:

а) толщина стеклонити является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения;

б) выборочная методика контроля, применяемая в настоящее время на заводах стекловолкна, не может исключать появление брака и не дает достоверную оценку толщины и неровности нити.

2. В результате изучения технологического процесса и нити как объекта измерения, а также анализа различных методов измерения показано, что для контроля толщины стеклонити в процессе производства может быть использован частотный метод. Предложенная схема контроля толщины по частоте резонансных колебаний представляет принципиально новое решение.

3. В результате теоретических исследований установлено:

а) Для практических скоростей выработки снижение частоты собственных колебаний может быть порядка 1-9%.

б) При $V_0 = 0$ нить в схеме частотного преобразователя можно рассматривать как колебательное звено с высоким коэффициентом добротности, а при $V_0 \neq 0$ - как последовательное соединение колебательного звена и звена запаздывания. Причем величина фазового запаздывания зависит от отношения линейной и волновой скоростей, а знак фазового запаздывания - от направления движения нити.

4. Разработан и испытан в производственных условиях частотный преобразователь для измерения нитей толщиной 10-16 текс в процессе выработки. Результаты испытаний подтвердили, что приборная реализация метода обеспечивает:

- а) надежную и длительную работу в условиях производства;
- б) простоту установки и настройки;
- в) устойчивые автоколебания нити с максимальным отклонением частоты от резонансной на крайних пределах толщины $\pm 0,2\%$.

5. Дан анализ погрешностей частотного метода, на основании которого установлено, что:

а) основным источником погрешности частотного метода при измерениях в процессе выработки является нестабильность натяжения нити;

б) теоретические расчеты и результаты производственных испытаний показали, что максимальная погрешность измерения в условиях производства может быть порядка $6,0\%$, а при более стабильном режиме замасливания до 2% .

6. Предложена схема измерения толщины стеклонити с учетом изменения натяжения. Лабораторные испытания предложенной схемы с учетом натяжения показали, что точность определения линейной массы может быть повышена до $1,5-2,5\%$ даже при колебаниях натяжения в пределах $\pm 20\%$.

7. Разработанный частотный датчик толщины стеклонити, как показали производственные испытания, может быть использован как измерительный орган в схемах автоматической коррекции режима печи по толщине нити.

8. Дана оценка экономической эффективности применения частотных преобразователей для контроля толщины стеклонити в производственных условиях.

Основные результаты исследований изложены в следующих работах:

1. КАХАНОВИЧ В.С., ТИШКЕВИЧ Н.И., КРАСЬКО А.С. Способ определения линейного веса движущейся нити. Авт.свид. кл. 42ж, 50, № 244690.
2. КАХАНОВИЧ В.С., ТИШКЕВИЧ Н.И., КРАСЬКО А.С. Фотодатчик для контроля нити в процессе производства. Авт. свид. кл. 42в, I2/09, № 246869.
3. ЧЕШУТКИН А.А., КАХАНОВИЧ В.С., ТИШКЕВИЧ Н.И., КРАСЬКО А.С. Способ непрерывного контроля толщины стеклонити в процессе производства. Тезисы докладов научно-технической кон-

ференции молодых ученых Белоруссии (технических и сельскохозяйственных наук). Минск, БТИ им. С.М. Кирова, 1969.

4. КРАСЬКО А.С., ТЫШКЕВИЧ Н.И., КАХАНОВИЧ В.С., ЧЕПУРКИН А.А. Частотный датчик для непрерывного контроля толщины стеклонити в процессе производства. "Стекло и керамика", №9, 1970.
5. ТЫШКЕВИЧ Н.И., КРАСЬКО А.С., ЧЕПУРКИН А.А., ШИМАН О.П., КОЗЕЛЛО Т.О., АНАНИЧ Н.А. Изучение неровноты толщины стеклонити статистическими методами. "Стекло и керамика", №2, 1970.
6. КРАСЬКО А.С., ТЫШКЕВИЧ Н.И. Передаточная функция струны. "Измерительная техника", №10, 1972.
7. КРАСЬКО А.С. Некоторые вопросы применения частотного метода для контроля толщины стеклонити в процессе производства. Тезисы докладов научно-технической конференции "Метрология и техника точных измерений", Минск, 1972.
8. ЧЕПУРКИН А.А., ТЫШКЕВИЧ Н.И., КАХАНОВИЧ В.С., КРАСЬКО А.С., БАКАНОВ Н.Г., ШИМАН О.П., ШЕВЧЕНКО Н.И., АНАНИЧ Н.А. Регулятор стабилизации технологических параметров процесса вытягивания стеклонити из печи. Авт.свид.кл.42а, 37/02, № 331039.
9. ЧЕПУРКИН А.А., КРАСЬКО А.С., ТЫШКЕВИЧ Н.И. Устройство для измерения линейной массы движущейся стеклонити. (Авт.свид. Решение Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР от 14.08.72 по заявке №1708368/29-33).
10. ЧЕПУРКИН А.А., ТЫШКЕВИЧ Н.И., КРАСЬКО А.С. Устройство для автоматического регулирования толщины стеклонити. (Авт.свид. Решение Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР от 7.02.72 по заявке №1497628/29-33).

Результаты работы автором доложены:

- I. На научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности в г. Минске, 1969.

2. На научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии в г. Минске, 1969.
3. На сессии Ученого Совета Всесоюзного научно-исследовательского института стеклопластиков и стекловолокна в г. Москве, 1969.
4. На республиканской научно-технической конференции "Метрология и техника точных измерений", в г. Минске, 1972.