

Колесников Валентин Александрович

**АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
НАМОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЗАДАННОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность:  
05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(текстильная и легкая промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

- Научный руководитель: **Рокотов Николай Викторович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры машиноведения
- Официальные оппоненты: **Панин Иван Николаевич**, доктор технических наук, профессор, общество с ограниченной ответственностью «Нефтегазовые технологии МИФИ», г. Дмитровград, генеральный директор.  
**Рымкевич Павел Павлович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования "Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского" Министерства обороны РФ, профессор кафедры физики
- Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва

Защита диссертации состоится 07 июня 2022 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.212.236.06 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. № 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46, <http://www.sutd.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д.212.236.06  
кандидат технических наук

Васильева Елизавета Константиновна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Процесс наматывания нитевидных материалов, известный с давних времен, в настоящее время переживает “второе рождение”. Если раньше процесс наматывания использовался в основном для компактного хранения и удобной транспортировки длинномерного материала преимущественно в текстильной промышленности, то в XX веке появилась и стала активно развиваться тенденция получения намоточных изделий, представляющих из себя законченный продукт или заготовку. Это были, в первую очередь, электротехнические катушки различных форм и назначения и фильтрующие элементы намоточного типа, в которых слой намотанных нитей различной природы от объемных текстурированных нитей до проволоки образовывал фильтрующую перегородку для задержания механических частиц из потока жидкости или газа.

С появлением и широким распространением в различных отраслях промышленности композиционных материалов намоточные изделия стали применяться в качестве основы, которая подвергалась заливке связующим материалом. Применение для этой цели длинномерных материалов с различными свойствами наряду с подбором требуемой структуры тела намотки и характеристик связующего материала позволило получать намоточные композиционные изделия в широком диапазоне свойств. Эта технология применяется, в первую очередь, для изделий, имеющих форму тел вращения (трубы, резервуары, детали ракет и самолетов).

Большое влияние на свойства получаемого намоточного изделия оказывает тип его структуры, которая в зависимости от поставленной задачи, может быть трех видов: моно-, мульти- или полиструктурной. Моноструктурное намоточное изделие образует одна нить, формирующая в процессе наматывания одну единую структуру расположения витков в теле намотки. Этот вид намоточных изделий наиболее хорошо изучен, как и механизмы для его получения. В случае мультиструктурной намотки одна нить образует в теле паковки зоны с различными структурами. В качестве примеров таких намоточных изделий можно привести многослойные намоточные фильтрующие элементы и паковки, полученные методом ступенчатой прецизионной намотки. В процессе получения намоточного изделия методом полиструктурной намотки участвуют две и более нитей, причем каждая из них образует в теле намотки собственную структуру.

Технология и механизмы для реализации мульти- и полиструктурной намотки в настоящее время мало изучены. Исходя из сказанного, разработка методов анализа и синтеза структур намоточных изделий и методов проектирования намоточных механизмов, в первую очередь, для мульти- и полиструктурной намоток является важной и актуальной задачей.

Работа выполнялась в соответствии с грантом РФФИ № 19-38-90295 и была поддержана Фондом содействия инноваций в рамках программы УМНИК по договору 13248ГУ/2018 от 06.06.2018 г.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретические предпосылки в области исследования полиструктурных намоточных изделий изложены в работах Гордеева В.А., Прошкова А.Ф., Панина И.Н., Рокотова Н.В. Термин “полиструктурная” намотка изделий впервые введен в работах профессора Рокотова Н.В. Технологии полиструктурной намотки и соответствующего оборудования позволяют полу-

чать намоточные изделия с новыми свойствами для использования в различных областях техники (например, высокоэффективные фильтры, емкости различного назначения, композитные материалы, конструкционные элементы). Аналогичными исследованиями в области анализа и синтеза намоточных структур и их влияния на свойства изделий занимались в разное время такие авторы и их ученики как Гордеев В.А., Прошков А.Ф., Регельман Е.З., Панин И.Н., Палочкин С.В., Рудовский П.Н.

Методы анализа и синтеза намоточных структур, разработка оборудования для их получения востребованы в таких областях промышленности как фильтрационная техника, композиционные материалы, переработка химических волокон, авиа- и космическая техника и другие. Мульти- и полиструктурные намоточные изделия обладают значительными преимуществами, а их анализ и синтез и разработка механизмов для их производства являются тем направлением, которое получает в настоящее время ускоренное развитие.

**Цель работы** заключается в разработке методики анализа и проектирования механизмов для получения намоточных изделий заданной структуры.

При реализации поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- выполнен анализ механизма раскладки нити с учетом законов движения нитеводителя при заданной структуре намоточного изделия;
- разработаны методика и математическое обеспечение для исследования натяжения нити в процессе намотки с учетом законов движения нитеводителя;
- разработаны методика, математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для определения намоточных соотношений, соответствующих заданной (требуемой) структуре намоточного изделия;
- выполнен анализ влияния на структуру намотки реализуемого механизмом намоточного отношения;
- разработаны методика моделирования и синтеза намоточных структур;
- выполнено экспериментальное исследование процессов формирования намоточного изделия различных структур;
- получены инженерные рекомендации по выбору конструктивных параметров намоточных механизмов для формирования заданных структур намоточных изделий.

**Методы исследований.** При выполнении диссертационной работы использовались методы математического анализа, нелинейной механики, динамики машин, математического и компьютерного моделирования.

**Соответствие диссертационной работы Паспорту научной специальности.** Диссертационная работа выполнена в рамках Паспорта научной специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) ВАК Министерства науки и высшего образования РФ и соответствует следующим его пунктам:

1. Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности.
2. Исследование технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается, прежде всего, в

– разработке динамической и математической модели для исследования натяжения нити в зоне транспортирования при наматывании с учетом упругости нити, натяжения нити на входе в зону наматывания, изменения скоростей подачи и намотки, а также закона движения нитеводителя;

– разработке математической модели для исследования влияния параметров намоточного механизма на структуру формируемого намоточного изделия;

– анализе чувствительности формируемых намоточных структур к изменению намоточного отношения;

– разработке метода синтеза намоточных структур, имеющих заданные параметры: шаг намотки, размеры ромба (для сотовой намотки), расстояние между соседними нитями (для сомкнутой намотки) при учете конструктивных параметров намоточного механизма.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что:

– разработаны методы проектирования намоточных механизмов, позволяющие получать намоточные изделия заданной структуры, в том числе мультиструктурные и полиструктурные намоточные изделия;

– выполнены исследования кинематических и динамических характеристик механизма раскладки нити и формирования намоточной структуры;

– выполненные исследования доведены до практической реализации в виде инженерных рекомендаций по выбору кинематической схемы требуемого намоточного механизма и его узлов, обоснование намоточного отношения исходя из требований к структуре намоточного изделия.

Теоретическая и практическая значимость подтверждена результатами натурального эксперимента на разработанных экспериментальных стендах. Практическая значимость также подтверждена патентом, полученным автором.

Материалы диссертации, разработанное алгоритмическое и программное обеспечение используется в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна на кафедре машиноведения при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 15.03.02 и 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование», а также, при подготовке аспирантов, обучающихся по направлению 15.06.01 – «Машиностроение» (образовательная программа «Машины, агрегаты и процессы (текстильная и легкая промышленность)»).

**Апробация работы.** Основные результаты работы прошли положительную апробацию на Всероссийских и международных научно-технических конференциях: ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, РАН, МИКМУС-2014, (Москва, 2014 г.), ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, РАН, МИКМУС-2015, (Москва, 2015 г.), ФГБОУ «ИВГПУ», (Иваново, 2018 г.), Витебский государственный технологический университет, (Витебск, Республика Беларусь, 2018 г.), ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, РАН, МИКМУС-2019, (Москва, 2019 г.), ФГБОУ ВО СПбГУПТД (Санкт-Петербург, 2021 г.). Практическая значимость подтверждена актом апробации АО «ПНК «Красная Нить».

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 13 научных статей, в том числе 5 статей в изданиях из «Перечня ...» ВАК РФ и SCOPUS. Также по теме диссертационного исследования получен 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (52 наименования) и приложения. Основное содержание работы изложено на 121 страницах, включает 55 рисунков и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** выполнен обзор областей применения намоточных технологий. Намоточная технология первоначально применялась в текстильной промышленности и имела цель компактное размещение и удобную транспортировку длинномерного материала (нити, пряжи). Отсюда основными требованиями к намоточным изделиям были увеличение плотности намотки, что способствовало увеличению длины нити в тех же габаритах паковки, а также прочности паковки, необходимую для транспортирования паковки иногда на значительные расстояния. Еще одним важным требованием, предъявляемых к паковкам в текстильной промышленности является легкость разматывания без обрывов и слетов нити.

Выполнен обзор исследований процесса наматывания нити и механизмов для его осуществления. Изучению проблем, связанных с процессом наматывания нитевидных материалов, посвящены работы многих отечественных ученых. В первую очередь надо выделить следующих: Гордеев В.А., Прошков А.Ф., Ефремов Е.Д., Регельман Е.З., Панин И.Н., Рудовский П.Н. и их многочисленных учеников и последователей. Формирование паковки крестовой намотки из нитевидного материала возможно несколькими способами:

1. Наматывание с постоянным углом наматывания. Этот способ реализуется при наматывании на фрикционных намоточных устройствах, что обеспечивает постоянство окружной скорости паковки при росте ее диаметра. Нитераскладочный механизм в этом случае имеет собственный привод, частота движения которого не зависит от частоты вращения паковки и изменяется только для предотвращения жгутообразования.

2. Наматывание с постоянным шагом витка нити. При этом способе шпиндель бобинодержателя кинематически связан с приводом нитераскладочного механизма, что обеспечивает постоянный шаг наматывания нити. Кинематическая связь между бобинодержателем и нитераскладчиком может быть выполнена в виде зубчатой, ременной или цепной передачи, которые обеспечивают заданное передаточное отношение или путем установки индивидуальных высокоточных приводов с компьютерным управлением, которое обеспечивает поддержание заданного передаточного отношения. Точность поддержания этого передаточного отношения имеет решающее значение для получения требуемой структуры.

Каждый из описанных способов намотки имеет свои достоинства и недостатки, основные из которых представлены в табл. 1.

В случае наматывания с постоянным углом основным недостатком является возникновение на некоторых диаметрах при росте диаметра паковки так называемой ленточной и жгутовой намоток. Это снижает качество получаемых паковок и требует использования специальных механизмов для их устранения.

В случае наматывания с постоянным шагом витка нити при увеличении диаметра паковки угол наматывания уменьшается, достигая минимально возможной величины, что ограничивает максимальный диаметр получаемых паковок.

С целью устранения этих недостатков была разработана и затем усовершенствована так называемая ступенчатая прецизионная намотка, которая сочетает в себе положительные качества обоих способов наматывания. Этот способ стал широко применяться благодаря появлению высокоточных приводов, которые могут управляться компьютером.

Таблица 1 – Способы крестовой намотки нити

Способ	Название	Привод паковки	Привод нитераскладчика
С постоянным углом намотки	Застилистая Случайная Дикая (wild)	Фрикционный	Независимый
С постоянным шагом намотки	Прецизионная	Осовой или комбинированный	От привода паковки
Со ступенчато увеличивающимся шагом намотки	Ступенчатая прецизионная	Осовой или комбинированный с компьютерным управлением	Собственный привод с компьютерным управлением

**Во второй главе** разработаны методы анализа и синтеза узла раскладки нити. Одной из основных проблем, возникающих при проектировании высокоскоростных нитераскладочных механизмов кулачкового типа является увеличенные динамические нагрузки, действующие на нитеводитель в моменты смены им направления движения, что может приводить к поломке узла, повышенному износу деталей и увеличению уровня шума. Решающее влияние на величину этих нагрузок оказывает масса подвижных деталей, а сами нагрузки пропорциональны их массе и величине ускорений. В процессе проектирования узла раскладки нити необходимо обеспечить минимально возможные ускорения, возникающие при смене направления движения нитеводителя. Динамические нагрузки, действующие на нитеводитель во время изменения направления движения, зависят от различных факторов, основными из которых являются: вид закона сопряжения винтовых канавок барабанчика; угол реверса, при котором происходит смена направления движения нитеводителя; угловая скорость  $\omega$  барабанчика; конструкция нитеводителя; масса  $m$  нитеводителя и податливость отдельных деталей узла раскладки; размер люфтов и зазоров в кинематической цепи нитераскладчика; точность исполнения заданного сопряжения (допуски и отклонения при производстве).

Выполнен анализ динамики нитераскладчика без учета податливости нитеводителя, для чего была разработана динамическая модель, которую можно применять для исследования тихоходных нитераскладочных механизмов с относительно жесткими звеньями. Для данной модели динамические нагрузки, действующие на нитеводитель, определяются выражением  $F_d = m\Pi''(\varphi)\omega^2$ , где:  $F_d$  - сила инерции, действующая вдоль линии движения нитеводителя;  $\Pi''(\varphi) = \partial^2\Pi/\partial\varphi^2$  - вторая передаточная функция координаты  $z = \Pi(\varphi)$  нитеводителя по обобщенной координате  $\varphi$ .

Инерционные нагрузки в механизме прямо пропорциональны величине  $P''(\varphi)$ , максимальное значение которого обусловлено выбранным конструктором законом сопряжения  $P(\varphi)$  паза винтового барабанчика на участках реверса. Выполнен сравнительный анализ различных законов сопряжения паза винтового барабанчика. В результате проведенного исследования установлено, что, как и следовало ожидать, наилучшим законом сопряжения пазов винтового барабанчика является закон, т.н. “модифицированной трапеции”.

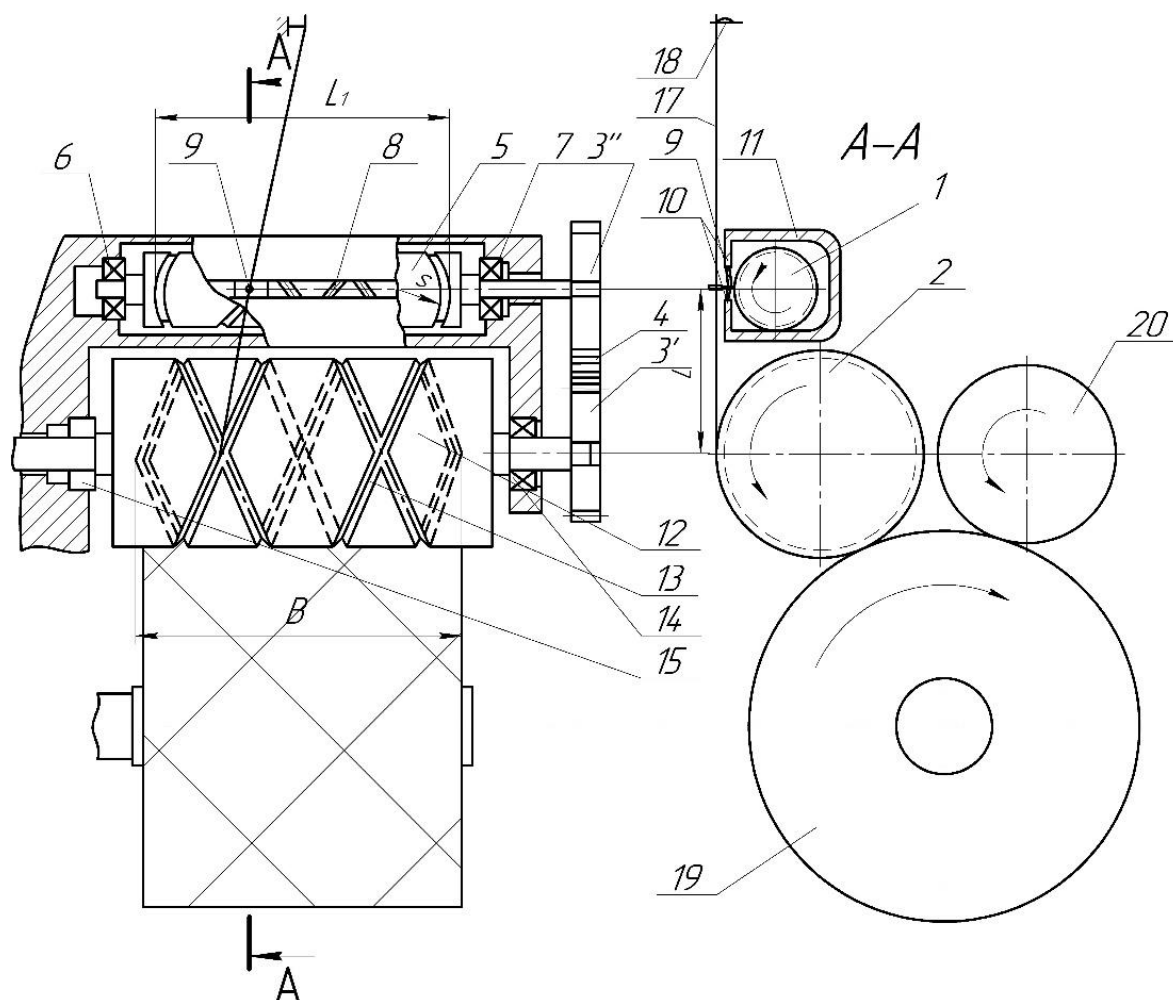


Рисунок 1 – Схема комбинированного нитераскладчика

Дальнейшим развитием кулачкового нитераскладочного механизма является конструкция комбинированного нитераскладочного механизма, представленная на рисунке 1, в котором переходный участок винтового барабанчика является более плавным, за счет того, что паз пазового барабана выполнен переменной глубины прогрессивно увеличивающимся к краю паковки так, чтобы длина нити в зоне наматывания оставалась по возможности постоянной. Такая конструкция, кроме уменьшения инерционных нагрузок позволяет также снизить колебания натяжения нити при наматывании, вызванных возвратно-поступательным движением нитеводителя, и связанную с этим изменение длины зоны намотки. Разработана методика проектирования комбинированного нитераскладочного механизма.

Механизм имеет два нитераскладчика 1 (рисунок 1), связанные между собой посредством пары зубчатых колес 3' и 3'' и зубчатого ремня 4. Верхний нитерасклад-



чик 1 состоит из барабанчика 5, в котором нарезан замкнутый винтовой паз 8, в который входит нитеводитель 9. Нитеводитель 9 расположен в прорези 10 корпуса нитераскладчика 11. Второй нитераскладчик 2 состоит из пазового барабана 12, с нарезанным на его поверхности замкнутым винтовым пазом 13. Пазовый барабанчик установлен в подшипниках 14 и 15. В результате проведенного исследования определена форма и глубина паза пазового барабана 12 и паза винтового барабанчика 8, которые позволяют не только значительно снизить инерционные нагрузки, и, как следствие, шум при работе механизма, повысить его надежность но и снизить колебания натяжения нити при наматывании, что является еще одной проблемой, вызывающей снижение качества получаемой нити и паковки.

Разработана математическая модель натяжения нити в зоне намотки. В процессе наматывания нить раскладывается нитераскладчиком вдоль формируемой паковки, при этом, из-за возвратно-поступательного движения нитеводителя, происходит периодическое изменение длины нити в зоне раскладки, что приводит к колебаниям натяжения наматываемой нити. Изменение натяжения нити при наматывании оказывает влияние на структуру и свойства паковки, а при наматывании свежесформованной нити изменение натяжения в зоне раскладки может приводить к изменению толщины нити, что недопустимо.

Для исследования колебаний силы натяжения движущейся в зоне раскладки нити предложена приведенная схема процесса наматывания (рисунок 2). Участок  $ab$  соответствует приведенной длине нити в зоне транспортирования от точки схода нити с прядильного диска до нитеводителя и далее до точки на поверхности вращающейся паковки. Кинематическое внешнее воздействие на нить со стороны нитераскладчика (“треугольник раскладки”) заменено изменением расстояния  $l(t) = l_0 + \xi(t)$ , где  $l_0$  – длина нити на участке  $ab$  при  $t = 0$  в ненагруженном состоянии,  $\xi(t)$  – периодическая функция, определяемая законом движения нитеводителя.

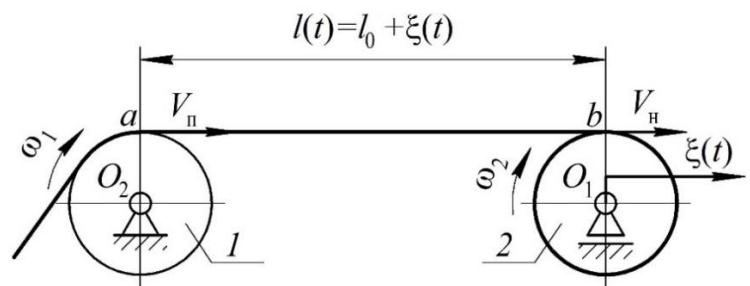


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса наматывания

При разработке математической модели натяжения нити принято, что перемещение нити относительно поверхности дисков 1 и 2 отсутствует, а поперечные колебания нити, вызываемые возвратно-поступательным перемещением нитеводителя в “треугольнике раскладки”, малы и не учитываются, скорость распространения упругой деформации в нити в первом приближении является бесконечно большой. Натяжение нити до входа на участок  $ab$  считаем заданным, равным  $T_1$ . Нить на участке транспортирования считаем абсолютно упругой. В работе [1] показано, что натяжение нити  $T$  в зоне намотки можно описать уравнением:

$$\dot{T} + p(t)T = p(t) \frac{k}{V_H} \left( \dot{\xi}(t) + (V_H - V_{II}) + \frac{1}{k} T_1 V_{II} \right),$$

где  $\dot{T} = dT/dt$ ;  $p(t) = V_H / (l_0 + \xi(t))$ ;  $\dot{\xi}(t) = dl/dt$ ;  $V_H$ ,  $V_H$  – скорость подачи нити в зону транспортирования и наматывания нити на паковку соответственно;  $k$  – удельная жесткость нити.

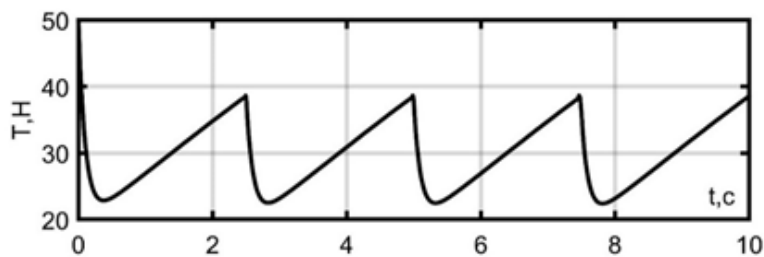


Рисунок 3 – Зависимость  $T(t)$

С помощью, разработанной в среде MATLAB программы выполнен анализ влияния параметров намоточного механизма на натяжение наматываемой нити. В качестве примера на рисунке 3 представлена зависимость  $T(t)$ , по-

лученная в результате численного моделирования при движении нитеводителя в треугольнике раскладки с заданной скоростью. Как следует из графика, зависимость  $T(t)$  носит “пилообразный” характер, причем максимальные значения величины силы натяжения соответствуют моментам реверса, а минимум  $T(t)$  сдвинут влево относительно минимума зависимости  $L(t) = l_0 + \xi(t)$ .

**Третья глава** посвящена разработке методов анализа и синтеза намоточных структур. Существенное влияние на структуру намоточного изделия оказывает передаточное отношение между шпинделем с наматываемым изделием и нитераскладчиком. Для описания структуры намоточного изделия в работе используются шаги намотки  $H$  и шаги  $H_1, \dots, H_j$  соответствующих порядков. Шаг намотки  $H$  равен шагу винтовой линии, образованной витками нити на поверхности намоточного изделия. Шаг первого порядка  $H_1$  равен величине сдвига винтовой линии, образованной витками нити при втором проходе нитеводителя. Шаг  $j$ -го порядка  $H_j$  равен величине сдвига винтовой линии, образованной витками нити при  $j+1$  проходе нитеводителя. Параметры намоточного механизма связаны с шагом намотки следующими зависимостями:  $H = uh$ ,  $\alpha = \arctg(H/\pi D)$ ,  $B = 0,5kh$ , где  $u = \omega_H/\omega_6$  – передаточное отношение между приводными валами нитераскладчика и бобинодержателя;  $\omega_H$ ,  $\omega_6$  – угловая скорость приводных валов нитераскладчика и бобинодержателя, соответственно;  $h$  – шаг винтовой линии образующей нити;  $\alpha$  – угол подъема витков;  $D$  – текущий диаметр паковки;  $B$  – длина хода нитеводителя;  $k$  – число заходов цилиндрического кулачка нитераскладчика. Зависимости, выражающие шаги порядков  $H_1, H_2, \dots, H_j$  порядка  $j$  от параметров наматывания:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \min \left\{ 2B - H \cdot E \left( \frac{2B}{H} \right); H \cdot \left[ E \left( \frac{2B}{H} \right) + 1 \right] - 2B \right\}, \\
 H_2 &= \min \left\{ H - H_1 \cdot E \left( \frac{H}{H_1} \right); H_1 \left[ E \left( \frac{H}{H_1} \right) + 1 \right] - H \right\}, \\
 H_j &= \min \left\{ H_{j-2} - H_{j-1} \cdot E \left( \frac{H_{j-2}}{H_{j-1}} \right); H_{j-1} \left[ E \left( \frac{H_{j-2}}{H_{j-1}} \right) + 1 \right] - H_{j-2} \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $E(x)$  – целая часть аргумента  $x$ .

С использованием равенств (1) выполнен анализ зависимости структуры намотки от передаточного отношения  $u$ . Для этого сначала были определены значения передаточного отношения  $u$ , соответствующие равенству нулю шагов  $H_1$  первого и  $H_2$  второго порядков. Показано, что  $H_1 = 0$  при  $u = k/m$ , где  $m = \overline{1, n}$  – целое число, а  $H_2 = 0$  при  $u = pk/(1 + pm_1)$ , где  $m_1$  – число шагов  $H_1$  в шаге  $H$ ;  $p$  – число шагов  $H_2$  в шаге  $H_1$ , причем

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \left( \frac{pk}{1 + pm_1} \right) = \frac{k}{m_1}.$$

Далее в главе выполнен анализ влияния передаточного отношения  $u$  на максимальные значения шагов  $H_1$ ,  $H_2$ . Получены аналитические зависимости для определения параметра  $u$  при которых шаги  $H_1$ ,  $H_2$  достигают максимальных и нулевых значений. Полученные зависимости были использованы для анализа характера изменения шагов и подходов к графоаналитическому синтезу намоточных структур.

Как показывают натурные эксперименты, существенное влияние на структуру намоточного изделия оказывает погрешность реализуемого намоточным механизмом передаточного отношения  $u$ . В работе выполнено аналитическое исследование чувствительности шагов  $H$ ,  $H_1$  и  $H_2$  по отношению к параметру  $u$ , для чего анализировались производные  $dH/du$ ,  $dH_1/du$ ,  $dH_2/du$ , для определения которых получены следующие аналитические зависимости:

$$\frac{dH}{du} = h, \quad \frac{dH_1}{du} = -hs, \quad \frac{dH_2}{du} = h + hsE\left(\frac{uh}{2B - uhs}\right),$$

где  $s = E(2B/uh)$ .

В результате выполненных исследований показано, что чувствительность шагов  $H$ ,  $H_1$  и  $H_2$  по отношению к параметру  $u$  существенно увеличивается с ростом порядка шага. Это было подтверждено натурными экспериментами. В силу этого обстоятельства при синтезе намоточных структур с учетом реальной точности получения передаточного отношения  $u$  в качестве исходных данных следует ограничиться шагами  $H$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ .

В заключении третьей главы выполнено компьютерное моделирование намоточных структур и предложена методика синтеза намоточных структур на основе зависимости основных параметров намоточного изделия (шаги  $H$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ ) от передаточного отношения  $u$ . Компьютерное моделирование намоточных структур выполнено с использованием разработанной в среде MATLAB программы, которая выполняет построение поперечного сечения намоточного изделия плоскостью, проходящей через ось его вращения. При этом нить представляется в виде гибкого нерастяжимого тела, имеющего круглое поперечное сечение, перемещения нити после ее укладки на поверхность намоточного изделия не происходит, поперечное сечение нити не деформируется. Выполнено моделирование структур, соответствующих случайной, прецизионной и ступенчатой прецизионной намотке. Показано влияние на структуру величин шагов намотки и диаметра получаемого изделия.

Для синтеза структур предложен графоаналитический метод, основанный на графике зависимостей  $H(u)$ ,  $H_1(u)$ ,  $H_2(u)$ , полученного в результате вычислений по разработанной в среде MATLAB программы. С помощью графика определяются области значений передаточного отношения  $u$ , соответствующие заданным параметрам структуры с учетом чувствительности шагов  $H$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  к параметру  $u$ .

В четвертой главе рассмотрена задача разработки экспериментальных стендов для формирования намоточных структур. В качестве основы был выбран намоточный стенд прецизионной намотки для получения цилиндрической паковки с шириной раскладки 250 мм. Для получения заданной структуры намоточного изделия необходимо иметь возможность варьирования передаточного отношения (намоточного отношения) между паковкой и нитераскладчиком. Для реализации моноструктурной намотки указанное намоточное отношение должно оставаться постоянным в процессе намотки. Мультиструктурное намоточное изделие может быть получено за счет смены намоточного отношения в процессе намотки в соответствии с задаваемой пользователем структурой паковки в радиальном направлении. Для реализации этого был предложен и изготовлен экспериментальный стенд, содержащий дифференциальную передачу в кинематической цепи между паковкой и валом нитераскладчика [12]. Для привода паковки и нитераскладчика в стенде были использованы асинхронный и шаговый электродвигатели соответственно. В результате натурального эксперимента установлено, что реализация заданной структуры намотки в указанном стенде

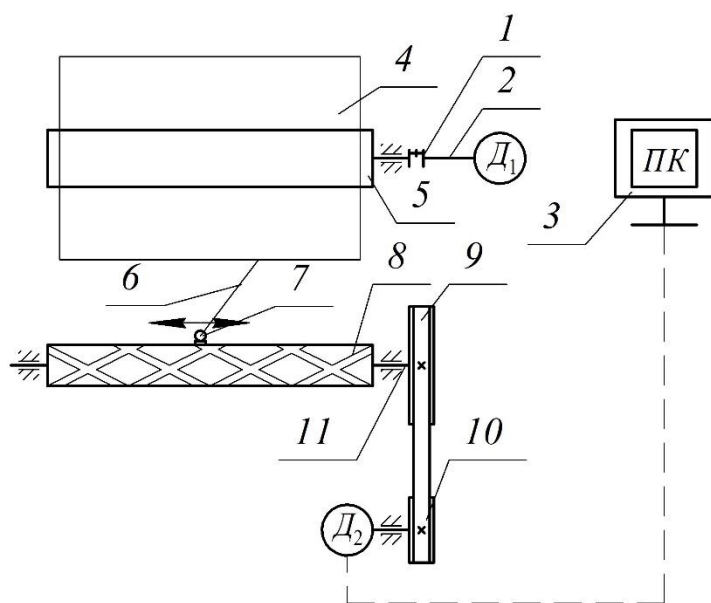


Рисунок 4 – Кинематическая схема прецизионного намоточного стенда

существенно затруднена из-за трудности поддержания высокой точности требуемого намоточного отношения. Для устранения отмеченного недостатка был изготовлен экспериментальный намоточный стенд (рисунок 4), в котором привод паковки и нитераскладчика осуществляется от собственных шаговых электродвигателей с компьютерным управлением, причем для повышения точности дифференциальный редуктор из кинематической схемы исключен. Это позволяет реализовать намоточное отношение с требуемой точностью при варьировании намоточного отношения в широких пределах.

Для реализации полиструктурной намотки был спроектирован и изготовлен намоточный стенд с двумя независимыми нитераскладчиками (рисунок 5), каждый из которых приводится в движение от собственного шагового электродвигателя.

С использованием разработанных экспериментальных намоточных стендов была выполнена серия натуральных экспериментов, в ходе которых сравнивались различные намоточные структуры, получаемые экспериментально, с намоточными структурами, полученными в результате теоретических расчетов по заданным параметрам (намоточное отношение, шаги  $H$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ , угол наматывания  $\alpha$ ). Выполнен

сравнительный анализ следующих структур намотки: крестовая, сомкнутая, сотовая, спиральная (в т.ч. опережающая и отстающая), параллельная. С помощью экспериментального намоточного стенда получен макет изделия (рисунок 6) – фильтр по патенту №2619698, в котором комбинируются две структуры – параллельная и спиральная, причем каждая формируется собственной нитью.

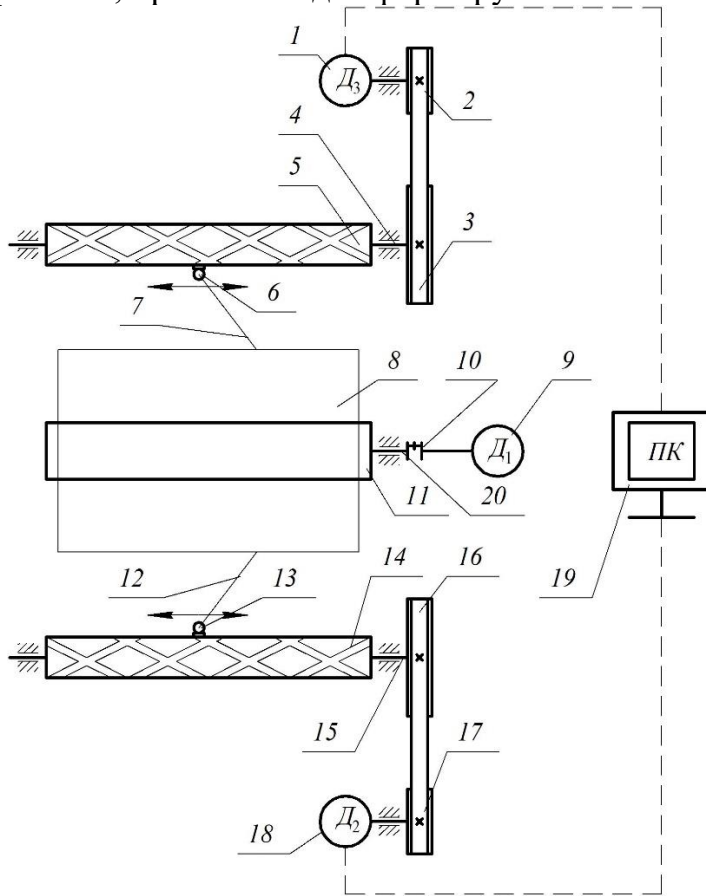


Рисунок 5 – Кинематическая схема полиструктурного намоточного устройства



Рисунок 6 – Макет полиструктурного намоточного изделия

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен динамический анализ механизма раскладки нити с учетом законов движения нитеводителя при заданной структуре раскладки нити. Установлено, что наименьшая величина нагрузок будет при изготовлении переходного участка по закону “модифицированная трапеция”.

2. Разработана методика и математическое обеспечение для исследования натяжения нити в процессе намотки с учетом законов движения нитеводителя. Полученная математическая модель может быть использована в дальнейшем для выбора конструктивных параметров приемно-намоточных механизмов с кинематическим заданием натяжения нити с целью получения заданной и постоянной силы натяжения в процессе намотки. Предложены направления совершенствования конструкции нитераскладчика для снижения колебаний натяжения нити, определены основные параметры комбинированного нитераскладчика.

3. Выполнено аналитическое исследование зависимости максимальных и минимальных значений шага первого  $H_1$  и последующих  $H_2, \dots$  порядков в зависимости

от передаточного отношения  $u$  и определяющих структуру намоточного изделия. Указанные максимальные и минимальные значения шагов  $H_1, H_2, \dots$  используются в методике синтеза параметров намоточного механизма для получения заданной структуры намотки.

4. Разработана методика синтеза параметров намоточного механизма для получения заданной структуры намоточного изделия. Методика основана на выборе из подходящих передаточных отношений таких, которые обеспечивают заданные параметры структуры при наименьшей чувствительности к изменению передаточного отношения  $u$ .

5. Выполнен анализ влияния на структуру намотки реализуемого механизмом намоточного отношения. С помощью разработанного в среде MATLAB программного обеспечения построены зависимости  $H(u), H_1(u), H_2(u)$ . Исследована чувствительность параметров структуры к передаточному отношению  $u$ . Показано, что при реализации некоторых видов структур намотки изменение передаточного отношения более чем на 0,00001 приводит к смене заданной структуры.

6. Предложены кинематические схемы намоточных станков для получения и исследования моно-, мульти- и полиструктурных намоточных изделий. Предложенные схемы реализованы в виде действующих механизмов и позволяют задавать параметры намотки (намоточное отношение, скорость наматывания, натяжение нити) исходя из задаваемой исследователем структуры намотки. Показано, что из-за высокой чувствительности ряда структур намоточных изделий к изменению передаточного отношения  $u$  необходимо предъявлять повышенные требования к точности кинематических цепей привода паковки и нитераскладочного механизма.

7. С помощью разработанной методики и программы выполнен синтез параметров намоточных структур следующих основных видов: крестовая, сомкнутая, сотовая (несколько вариантов), спиральная, спиральная опережающая, спиральная отстающая, параллельная. Построены их компьютерные модели в виде развертки и сечений. Выполнен натурный эксперимент по получению намоточных изделий заданных структур на разработанных намоточных станках, что подтвердило правильность теоретических положений.

8. Выполнено компьютерное моделирование полиструктурного намоточного изделия, состоящего из двух нитей, одна из которых образует в теле намотки параллельную структуру, а вторая – спиральную. С помощью экспериментального намоточного станка получен макет изделия – фильтр по патенту №2619698.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах, входящих в «Перечень ...» ВАК РФ и Scopus

1. Рокотов, Н.В. Математическое моделирование натяжения нити при наматывании / Н.В. Рокотов, А.В. Марковец, **В.А. Колесников**, А.Г. Усов // Химические волокна. – 2021. – №3. – С.8-10. (Версия на англ. языке: Mathematical modeling of yarn winding tension / N. V. Rokotov, A.V. Markovets, **V.A. Kolesnikov**, A.G. Usov // Fibre Chemistry. – 2021. – Vol. 53. – No 3. – P. 155-158. – DOI 10.1007/s10692-021-10257 3).

2. **Колесников, В. А.** Разработка и анализ оборудования для получения полиструктурных намоточных изделий / В. А. Колесников, Н. В. Рокотов // Вестник

Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2021. – № 2. – С. 125-129. – DOI 10.46418/2079-8199\_2021\_2\_21.

3. **Колесников, В. А.** Экспериментальный стенд для полиструктурной прецизионной намотки / В. А. Колесников, Н. В. Рокотов, И. М. Беспалова, А.В. Марковец // Химические волокна. 2018. № 5. С. 100-101. (Версия на англ. языке An Experimental Stand for Polystructural Precision Winding / **V. A. Kolesnikov**, N. V. Rokotov, I. M. Bepalova, A. V. Markovets // Fibre Chemistry. – 2019. – Vol. 50. – No 5. – P. 480-482. – DOI 10.1007/s10692-019-10013-8.)

4. Рокотов, Н. В. Фильтрующий элемент для очистки жидкостей от механических загрязнений / Н. В. Рокотов, И. М. Беспалова, Л. С. Мазин, **В. А. Колесников** // Химические волокна. – 2018. – №2. – С.50-52. (Версия на англ. языке: Filter element for purification of liquids to remove mechanical impurities / N. V. Rokotov, I. M. Bepalova, L. S. Mazin [et al.] // Fibre Chemistry. – 2018. – Vol. 50. – No 2. – P. 118-121. – DOI 10.1007/s10692-018-9945-8.)

5. Рокотов, Н. В. Экспериментальный стенд прецизионной намотки / Н. В. Рокотов, **В. А. Колесников**, А. В. Марковец, К. И. Молчанов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2017. – № 2. – С. 114-116.

#### **Статьи в журналах и научных сборниках**

6. Рокотов, Н. В. Кинематический синтез комбинированного раскладчика нити / Н. В. Рокотов, **В. А. Колесников** // Технологии и качество. – 2019. – № 3(45). – С. 27-34.

#### **Материалы конференций**

7. **Колесников, В. А.** Разработка и анализ оборудования для получения полиструктурных намоточных изделий / В. А. Колесников, Н. В. Рокотов // Наука-Технологии-Производство : Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, посвященной инновационному развитию текстильной и легкой промышленности, Санкт-Петербург, 29–31 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. – С. 21-22.

8. **Колесников, В. А.** Анализ структуры прецизионной намотки с использованием компьютерного моделирования / В. А. Колесников, Н. В. Рокотов // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019) : Сборник трудов конференции, Москва, 04–06 декабря 2019 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2020. – С. 636-639. (Версия на англ. языке: **Kolesnikov, V. A.** Analysis of the structure of a precision winding using computer simulation / V. A. Kolesnikov, N. V. Rokotov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering", ToPME 2019, Moscow, 04–06 декабря 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012115. – DOI 10.1088/1757-899X/747/1/012115, **входит в WoS**)

9. **Колесников, В. А.** Получение различных намоточных структур на экспериментальном стенде / В. А. Колесников, Н. В. Рокотов, В. В. Смелкова // Молодые

ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2018. – № 1. – С. 274-275.

10. **Колесников, В. А.** Разработка намоточных механизмов для формирования паковок с управляемой структурой / В. А. Колесников, Е.С. Бакалов // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности, Витебск, 21–22 ноября 2018 года. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2018. – С. 153-156.

11. **Колесников, В.А.** Экспериментальное исследование процессов получения паковок различной структуры на намоточном стенде. / В.А. Колесников, Н.В. Рокотов и [др.] // XXVII Междунар. инновац. Конф. молодых ученых и студентов (МИКМУС-2015): труды конф. (Москва, 2-4 декабря 2015 г). – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015. – С.419-422.

12. **Колесников, В. А.** Разработка намоточного механизма для формирования паковок с управляемой переменной структурой / В. А. Колесников, Н. В. Рокотов, К. И. Молчанов, А. В. Марковец // XXVI Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2014 : Труды конференции, Москва, 17–19 декабря 2014 года / Российская Академия наук; РФФИ; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2015. – С. 503-506.

#### Патенты

13. Патент № 2619698 С Российская Федерация, МПК В01D 39/16, В01D 27/04. Фильтрующий элемент : № 2015157413 : заявл. 31.12.2015 : опубл. 17.05.2017 / Н. В. Рокотов, И. М. Беспалова, Л. С. Мазин, А.В. Марковец, **В.А. Колесников** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (СПбГУПТД).