

Д. А. Бантос^{1✉}, И. О. Михайлов¹

Особенности использования и изготовления оптоволоконных катушек для беспилотных авиационных систем

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: bantos.d.17@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены особенности применения оптоволоконных катушек (ОВК) в беспилотных авиационных системах в качестве элемента волоконно-оптической линии связи. Представлена классификация ОВК по двум основаниям: по способу размотки и по форме намотки. Проведен сравнительный анализ каждого типа катушек, по результатам которого сделан вывод о предпочтительности бескаркасных катушек с ракетной или конической формой намотки. Рассмотрены основные дефекты, возникающие при намотке ОВК: постоянные и переменные. Описаны технологические аспекты производства ОВК: применение сервопривода для синхронизации механизмов намотки и раскладки, использование машинного зрения для контроля качества намотки, а также способы нанесения клеящего вещества при изготовлении бескаркасных катушек. Предложена схема намоточного станка с блоком нанесения клеящего вещества, обеспечивающего контроль процесса намотки. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем связи беспилотных авиационных систем на основе волоконно-оптических линий.

Ключевые слова: оптоволоконная катушка, беспилотные авиационные системы, намотка оптического волокна

D. A. Bantos^{1✉}, I. O. Mikhailov¹

Features of Using and Manufacturing of Fiber Optic Coils for Unmanned Aerial Vehicles

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: bantos.d.17@gmail.com

Abstract. This article examines the application of fiber optic coils (FOC) in unmanned aerial vehicles as a fiber optic communication link element. FOC is classified based on two criteria: unwinding method and winding shape. A comparative analysis of each reel type is conducted, leading to the conclusion that frameless reels with a rocket-shaped or conical winding shape are preferable. The main defects that arise during FOC winding are considered: constant and variable. The article describes technological aspects of FOC production, including the use of a servo drive to synchronize the winding and unwinding mechanisms, the use of machine vision for winding quality control, and adhesive application methods in the manufacture of frameless reels. A diagram of a winding machine with an adhesive application unit, which ensures winding process control, is proposed. The results of this work can be used in the design of unmanned aerial vehicles communication systems based on fiber optic lines.

Keywords: optical fiber coil, unmanned aerial systems, optical fiber winding

Введение

Беспилотные авиационные системы (БАС) находят все более широкое применение в военной, гражданской и научной сферах. Одной из ключевых задач при их эксплуатации является обеспечение надежного канала передачи данных между БАС и оператором. Традиционные радиоканалы имеют ряд существенных ограничений: подверженность радиопомехам и средствам радиоэлектронной борьбы, ограниченная пропускная способность, возможность перехвата сигнала. В качестве альтернативы все активнее рассматривается применение волоконно-оптических линий связи [1].

Оптоволокно обеспечивает защищенный высокоскоростной канал передачи данных, невосприимчивый к электромагнитным помехам. Однако его применение на БАС требует решения ряда инженерных задач: волокно должно разматываться с катушки в процессе полета без чрезмерного натяжения, без образования перегибов и петель, при этом масса катушки должна быть минимальной, чтобы не снижать летные характеристики. Таким образом, оптоволоконная катушка (ОВК) является ключевым элементом системы связи БАС на основе волоконно-оптических линий связи, а ее конструкция и качество намотки во многом определяют надежность всей системы.

В данной работе рассмотрены существующие типы ОВК, проанализированы дефекты, возникающие в процессе их изготовления, а также предложена схема намоточного станка для производства бескаркасных ОВК.

Существующие типы оптоволоконных катушек

ОВК для БАС можно классифицировать по двум основаниям: по способу размотки и по форме намотки.

По способу размотки выделяют внешнюю и внутреннюю размотку.

Катушки с внешней размоткой наматываются на шпулю, и размотка происходит от внешнего диаметра к внутреннему. Основным преимуществом данного вида катушек является простота процесса намотки. Однако недостатки более существенны, а именно:

наличие шпули увеличивает массу ОВК, что уменьшает дальность полета БАС и массу поднимаемого груза;

в процессе разматывания волокно перегибается через фланцы шпули, что сильно уменьшает радиус изгиба вследствие чего повышаются риски обрыва волокна, ухудшается качество передаваемого сигнала [2, 3].

Альтернативой катушек с внешней размоткой служат катушки с внутренней размоткой (бескаркасные катушки). Процесс намотки данного типа катушек происходит на разборную шпулю, которая удаляется по завершению процесса намотки. Для того чтобы волокно не слетало используется клеящее вещество, наносимое в процессе намотки. Размотка же происходит от внутреннего радиуса к внешнему. Преимуществами данного типа катушек являются:

меньшая масса ОВК, что позволяет увеличить дальность полета, путем наматывания большей длины оптоволоконной линии при сохранении массы;

отсутствие перегибов через фланец минимизирует риски обрыва оптоволокна и исключает место сильного перегиба;

при размотке в первую очередь выпускаются внутренние ряды с большим внутренним напряжением.

Недостатком данного типа намотки является сложность производства. Поскольку ввиду отсутствия шпули необходимо использовать клеящее вещество для сохранения формы ОВК.

Выделяют 3 формы намотки катушек: цилиндрическая, коническая, ракетная (рис 1).

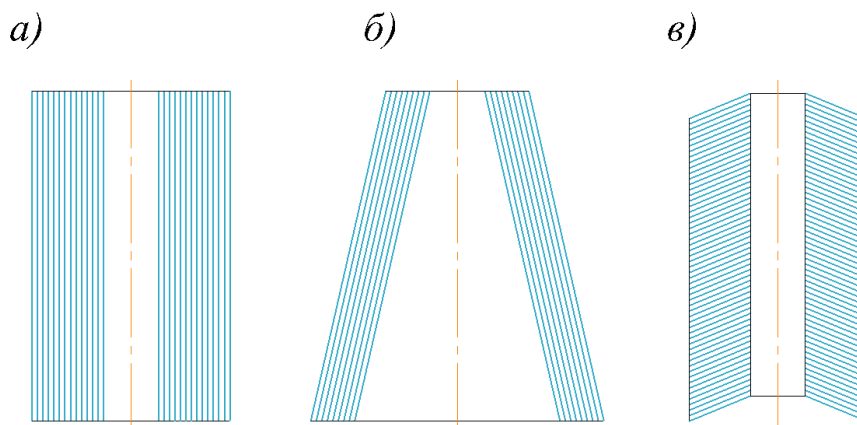


Рис. 1. Формы намотки: цилиндрическая (а); коническая (б); ракетная (в)

Цилиндрическая намотка является самой простой и производится на шпулю с фланцами на всю высоту намотки [4]. Скорость разматывания данной катушки не высока, так как в процессе схода волокно трется о нижележащие слои.

Коническая намотка распространена в текстильной промышленности. Данная форма намотки позволяет предотвратить слет витков, так как сходя от большего торца к меньшему волокно не задевает витки, находящиеся ближе к меньшему торцу [5].

Ракетная намотка также изначально разработана для текстильной промышленности. Намотка данной формы отличается от остальных тем, что слои наращиваются не горизонтально, а вертикально и под углом. Размотка происходит от меньшего диаметра к большему, а волокно отрывается от тела катушки по нормали к ее поверхности [6]. Однако данный способ намотки является самым сложным в реализации из-за жесткости самого волокна приводящего к сползанию волокна и как следствие полной потере работоспособности ОВК.

В эксперименте проведенным Паниным А. И. [7], направленным на замер натяжения нити при смотке с бобин различных форм (рис. 2).

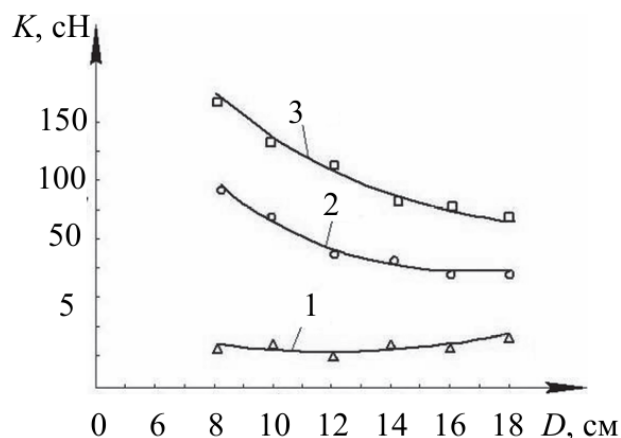


Рис. 2. Зависимость натяжения нити (K , сН) от диаметра (D , см) при различных формах намотки: при работе с бобиной ракетной формы (1); при работе с конической намоткой (2); при работе с цилиндрической намоткой (3)

На основании полученных данных можно сделать вывод, что оптимальной ОВК является бескаркасная катушка с ракетной или конической формой намотки, представляющая компромисс между относительной простотой намотки и натяжением нити.

Проблемы и дефекты при намотке

Выбор оптимальной конструкции катушки не гарантирует качество готового изделия. Ключевым фактором, определяющим работоспособность ОВК, является точность процесса намотки, поскольку возникающие при формировании катушки погрешности намотки приводят к увеличению сил отрыва волокна и потере сигнала [2, 3].

Основными сложностями при намотке ОВК всех типов являются постоянные и переменные дефекты. Постоянные дефекты появляются из-за чередования направления намотки, различного угла между наматываемым оптоволоконном и фланцем катушки. Можно выделить три основных вида постоянных дефектов: перескок, пристеночный (прифланцевый) и дефект «выходящего волокна». Перескок характеризуется регулярным смещением витка относительно нижнего слоя из-за разного направления намотки. Прифланцевый и дефект «выходящего волокна» образуются в крайних точках катушки. Прифланцевый характеризуется провалом витка к фланцу возникающий из-за разных углов укладки волокна и фланца. Дефект «выходящего волокна» возникает, когда виток переходит на новый слой, тем самым оказывая большее давление на нижележащий виток [8].

Переменные дефекты образуются вследствие неточности в работе намоточного станка. К ним относятся смещение витка через n -й ряд в пределах одного слоя (рис. 3, а) и наложение волокна поверх n -го предшествующего витка (рис. 3, б) [9]. Смещение витка через n -й ряд в пределах одного слоя возникает при неточности в работе механизма раскладки, выраженная в неправильном смещении при заданном натяжении и скорости намотки. Данный дефект приводит к

микроизгибам при наматывании следующего слоя (локальных повышениях сдвигания волокна и как следствие изменению его геометрических параметров). Дефект наложение волокна поверх n -го предшествующего витка вызван неточностью в работе датчиков натяжения волокна в процессе намотки ввиду чего волокно из-за своей жесткости не переходит на следующий ряд, а наслаивается на прошлые, что также приводит к микроизгибам и одновременному сходу нескольких витков в процессе разматывания катушки.

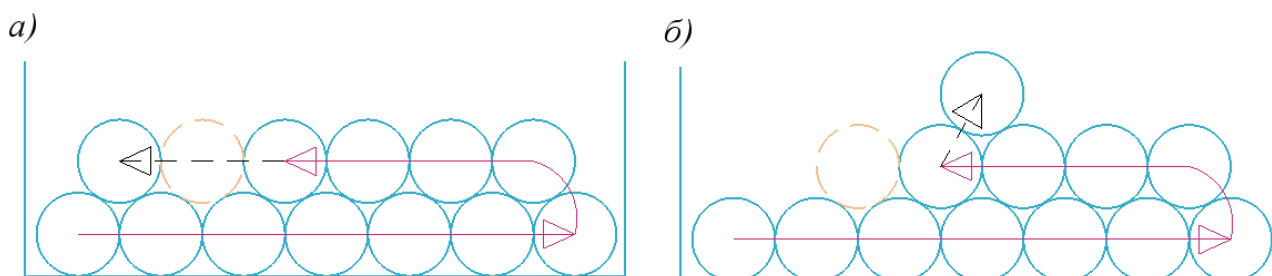


Рис. 3. Переменные дефекты

Технология производства оптоволоконных катушек

Для минимизации описанных выше дефектов и обеспечения стабильного качества ОВК намотка производится на специализированных станках с высокоточными системами управления. Конструкция станков должна обеспечивать три ключевых условия: точную синхронизацию механизмов намотки и раскладки, непрерывный контроль качества укладки волокна, а также нанесение клеящего вещества при изготовлении бескаркасных ОВК. Рассмотрим каждое из этих условий подробнее.

В соответствии с рис. 4 сигнал с датчиков натяжения поступает в блок управления механизма намотки, управляющий скоростью вращения катушки. Сигнал с блока управления намотки поступает в блок управления механизмом раскладки, управляющий смещением направляющей каретки. Эта связь необходима для синхронизации процессов намотки и раскладки, для минимизации переменных дефектов. Чтобы обеспечить большую точность и компенсировать люфт в приводе при синхронизации механизмов раскладки и намотки предлагается использовать сервопривод [10]. Механизм контроля укладки может производиться контактными (инструментальными) и бесконтактными методами. Применение контактных методов для оптоволокна недопустимо ввиду возможности механических повреждений. Применение бесконтактных методов возможно с использованием машинного зрения, основанного на глубоком обучении. Скорость проверки данным методом выше фактической скорости намотки и позволяет определять дефекты с точностью выше 94,67 % [11]. Однако данный метод сталкивается с проблемой невозможности исправить обнаруженные дефекты.

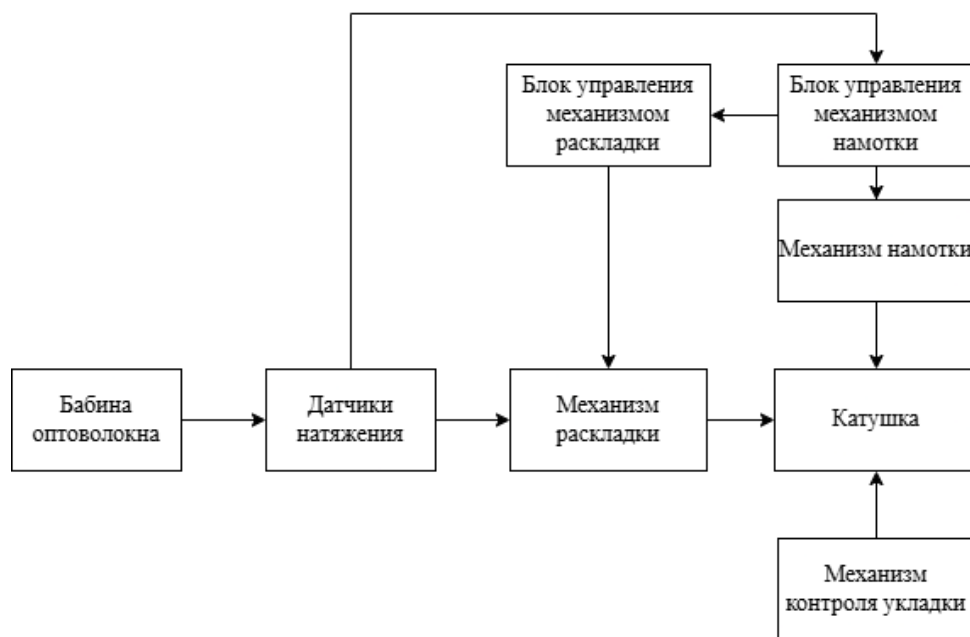


Рис. 4. Блок схема станка

При создании бескаркасных катушек необходимо использование клеящего вещества, нанесение которого может происходить двумя способами: в процессе намотки и после намотки. Нанесение клеящего вещества в процессе намотки производится под давлением путем пропускания оптоволокна через специальное устройство. Нанесение клея вторым способом происходит с использованием вакуумной пропитки. ОВК помещается в камеру, где под воздействием вакуума клеящее вещество полностью проникает в ОВК не оставляя пустот.

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ типов ОВК и выявлены основные дефекты намотки. Предложена схема намоточного станка для производства бескаркасных катушек с контролем качества укладки волокна. Блок нанесения клеящего вещества на схеме не указан в связи с возможностью использования вакуумной камеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полковников В. П. Оптоволоконные технологии в противовес средствам радиоэлектронной борьбы противника. – СПб. : ФЛАГМАН НАУКИ, 2024. Т.3. С. 405-411.
2. Шрамко О.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Аксарин С.М. Метод исследования зависимости h -параметра анизотропного световода от радиуса изгиба. – М. : Научно технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. С. 26–31.
3. Аксарин С.М., Архипов С.В., Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Исследование зависимости параметров анизотропных одномодовых волоконных световодов от диаметра намотки. – М. : Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т.4. С. 22–26.

4. Лопарев В. А., Киселев С. С., Шилин М. М. Выбор способа намотки для технической реализации волоконно оптической линии связи с высокоскоростным объектом. – М : Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т2. С. 612—619.
5. Лопарев В. А., Киселев С. С., Шилин М. М. Особенности станочного оборудования для намотки оптического волокна. – М : Известия вузов приборостроение. 2019. С. 78-85.
6. Патент RU191207U1 Россия, G02B 6/44. Катушка для волоконно-оптического кабеля линии связи с высокоскоростным объектом; № 2018140819; заявл. 19.11.2018; опубл. 29.07.2019/ Мешковский И.К., Киселев С.С. – 6 с.
7. Панин А. И. Построение модели зависимости удельной плотности намотки от угла сдвига витков и толщины наматываемого слоя пряжи : статья – Димитровград. : Вестник ДИТУД, 2001. Т.1. С. 12-17
8. Мешковский И. К, Унтилов А. А., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л. Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа. – М : Известия вузов приборостроение. 2011. С. 76-80.
9. Мешковский И. К, Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра. – М : Приборостроение. 2010. С. 47-51.
10. Авдеюк Ю. А., Рыжкова Е. А., Тимохин А. Н. Применение сервопривода в процессе намотки-раскладки оптических волокон. – М : Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. 2015. Т.4. С. 72-74.
11. Liu Yu, Wei Xi-lai, Wang Shuai, Dai Li. Machine vision automatic inspection technology of optical fiber winding based on deep learning. – Shenyang : Journal of Northeastern University. 2020. С 68-74.

© Д. А. Бантос, И. О. Михайлов, 2026