

УДК 67.02

DOI: 10.30987/article_5bf3cb4dbfae69.76028868

Р.С. Нахушев, А.О. Шевхужев, Д.М. Атабаева, В.И. Солодилов

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ НАМОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНКА С ЧПУ

Представлен обзор существующих технологий намотки и перечислены достоинства и недостатки каждой из них. Проведен обзор станков с ЧПУ, представленных на рынке. Описан спроектированный станок с характеристиками, позволяю-

щими изготовить изделие согласно разработанной технологии.

Ключевые слова: оптимизация, автоматизированная намотка, станки с ЧПУ, дельта-роботы.

R.S. Nakhushev, A.O. Shevkhuzhev, D.M. Atabaeva, V.I. Solodilov

OPTIMIZATION OF AUTOMATED WINDING TECHNOLOGY USING NC MACHINES

Delta-robots are one of the types of parallel robots the distinguishing feature of which is a triangular platform with three hinged levers. The most significant distinguishing features of a delta-robot are speed, precision and compactness. The highest speed of transfer is ensured due to minimum inertia. Minimum inertia in its turn is achieved due to composite use in a structure. Levers with hinge bearings installed in them are one of the key units of the delta-robot. The aim of the work is technology development for manufacturing

levers of an industrial delta-robot through a winding method with the use of NC machines.

In the paper the review of existing technologies of winding is presented and advantages and drawbacks of each of them are enumerated. The review of NC machines available in the market is carried out. A machine developed is described which has characteristics allowing the production of a product according to the technology developed.

Key words: optimization, automated winding, NC machines, delta-robots.

Уровень роботизации в промышленности растет изо дня в день. С ростом уровня роботизации увеличивается и разнообразие самих роботов. Разработчики придумывают все новые и новые их разновидности - для снижения стоимости владения, увеличения производительности под конкретную задачу и упрощения наладки и запуска робота в работу [1].

Дельта-робот (рис. 1) получил свое название из-за треугольной платформы, так как визуально она похожа на букву

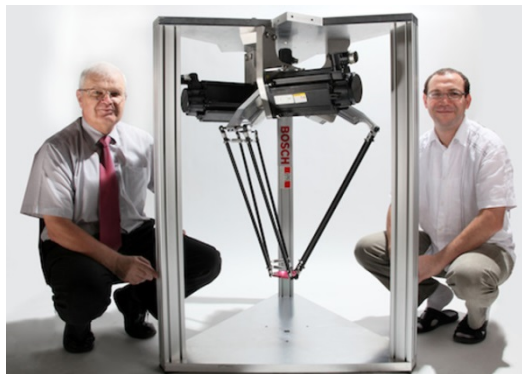


Рис. 1. Дельта-робот

греческого алфавита Δ - «дельта». Особенностью является использование параллелограммов в конструкции манипулятора, что позволяет сохранять пространственную ориентацию исполнительного устройства робота. Самые важные отличительные характеристики дельта-робота - это скорость, компактность и точность. Высочайшая скорость перемещения обеспечивается за счет минимальной инерции [2].

Минимальная инерция, в свою очередь, достигается за счет использования в конструкции композиционных материалов. Одним из ключевых узлов дельта-робота являются рычаги с установленными в них шарнирными подшипниками. Рычаг (рис. 2) представляет собой полую трубу малого диаметра с закладными элементами на концах - для крепления сферических подшипников. К рычагам предъявляются повышенные требования по жесткости при малых массе и габаритах. В связи с высокими динамическими режимами работы робота его узлы также должны обладать

высокими динамическими характеристиками. Исходя из существующих на сегодняшний день методов изготовления данных рычагов из композиционных материалов была выбрана технология намотки [3].

Основной проблемой является совпадение резонансных частот конструкции и системы управления. Поэтому необходимо исследовать влияние параметров намотки на резонансные частоты и их гармоники. Следовательно, научная новизна работы состоит в выявлении закономерностей изменения резонансной частоты композитных труб в зависимости от параметров намотки.

Практическая значимость заключается в создании композитных рычагов по данной технологии намотки и использовании их в дальнейшем в дельта-роботах промышленного назначения.

В связи с этим целью работы является разработка технологии изготовления рычагов промышленного дельта-робота методом намотки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы намотки композитных труб.
2. Разработать технологию намотки труб с использованием закладных элементов.
3. Изготовить образец с использованием намоточного станка с ЧПУ.
4. Разработать методику испытания полученного образца.

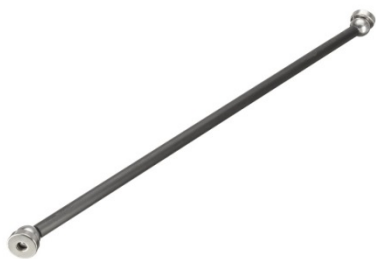


Рис. 2. Рычаг промышленного дельта-робота

Одним из универсальных методов изготовления прочных конструкций, которые имеют форму тел вращения, является намотка. Особенность данного метода заключается в том, что на вращающуюся оснастку, имеющую форму внутренней геометрии изделия, укладывается укрепляющий материал по заранее назначенной траектории. В качестве укрепляющего материала может использоваться любой нескончаемый материал (нить, лента, жгут). Расположение укрепляющего материала, а также угол намотки обеспечиваются отдельными узлами, перемещающимися со скоростью, пропорциональной вращению оснастки. Угол укладки материала может варьироваться от очень малого до большого (около 90° относительно оси оснастки) [4].

При выборе основных компонентов матриц в большинстве случаев отталкиваются от того, из какого материала будут изготавливаться изделия. Например, эпоксидные смолы применяются в случае изготовления деталей из углеродных волокон, в случае намотки изделий из стеклопластиков используются полиэфирные смолы, а для теплостойких объектов - полиамидные смолы. Кроме того, могут использоваться и полимеры сложных виниловых эфиров [5].

Способы намотки условно можно подразделять на несколько категорий в зависимости от разных критериев: по способу совмещения связующего и наполнителя или рисунку укладки материала.

Совмещение связующего и наполнителя можно выполнять двумя способами: твердофазной и жидкофазной намоткой - «сухой» и «мокрой» соответственно. В случае жидкофазной намотки связующее наносится на материал непосредственно в намоточном тракте. На рис. 3 приведена схема «мокрой» намотки [6].

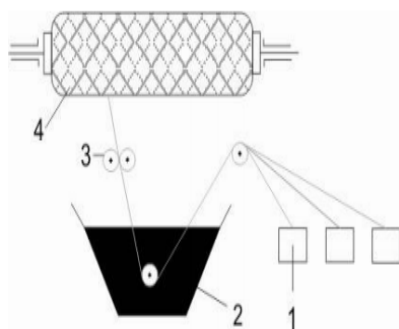


Рис. 3. Схема «мокрой» намотки: 1 - шпулярник; 2 - ванна со связующим; 3 - отжимные ролики; 4 - оправка

Основные узлы комплекса для реализации технологии: узел поставки материала; ванна со связующим, через которую протаскивается и пропитывается основа; секция намотки с валами вращения; органы управления комплексом для намотки. В случае жидкофазной намотки требуется более низкое усилие при натяжении нити, что позволяет снизить требования к оборудованию. Жидкофазная намотка также обеспечивает лучшую формуемость изделий, поэтому преимущественно применяется при изготовлении изделий малого диаметра. Твердофазная намотка основана на использовании препрегов. Препрег - готовый для переработки продукт предварительной пропитки связующим армирующих материалов. Коэффициент трения при твердофазной намотке практически в 2 раза выше. После завершения намотки проводят отверждение связующего. Его осуществляют в термокамерах при соответствующей температуре или под инфракрасными лампами. Конструкции, намотанные по поверхностям вращения, могут быть получены в виде гладких цилиндров, труб или тубингов диаметром от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров.

По рисунку укладки арматуры существует несколько способов намотки.

При поперечной (кольцевой) намотке армирующий материал в виде лент укладывается в плоскости, перпендикулярной оси вращения.

Продольная (осевая) намотка предполагает укладку арматуры вдоль оси из-

деля. При этом раскладчик движется по направляющей от полюса к полюсу и при смене направления движения оправки проворачивается на угол $180^{\circ} + \Delta$, где Δ - шаг намотки.

Продольно-поперечная намотка является комбинацией поперечной и осевой (рис. 4). Вертлюг 2, на котором по периметру установлены шпули 3 с ленточной арматурой, вращаясь синхронно с оправкой 1, перемещается вдоль оси оправки, укладывая продольные ленты 4. Одновременно поперечные раскладчики 5, перемещаясь вдоль оси оправки, укладывают ленточную арматуру 6, фиксирующую ленты продольной укладки.

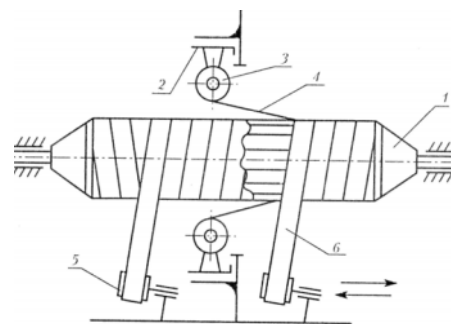


Рис. 4. Схема продольно-поперечной намотки: 1 - оправка; 2 - вертлюг; 3 - шпули; 4 - ленты укладки; 5 - поперечные раскладчики; 6 - ленты намотки

При спиральной намотке укрепляющая нить, пропитанная полимерным связующим, укладывается на поверхность вращающейся оправки по винтовой линии. Скорости перемещения раскладчика и вращения оправки задаются такими, чтобы обеспечить требуемый угол намотки. Главной вариацией спиральной намотки является геодезическая намотка, при которой укрепляющий материал кладется на тело оснастки по геодезическим линиям [7]. Геодезическая линия - кривая определенного типа. Из всех возможных линий, лежащих на поверхности оснастки, геодезическая та, которая кратчайшим образом соединяет произвольные точки, относящиеся к этой поверхности. Именно при таком расположении нитей намотки при эксплуатации имеет место нагружение вдоль волокна, что обеспечивает максимальную прочность изделия.

Рассмотрев основные технологии намотки композиционных материалов, можно сделать вывод, что для изготовления требуемого изделия наиболее предпочтительным является жидкофазный тип намотки, так как он:

- наименее энергозатратен, поскольку требует низкого натяжения волокна;
- обеспечивает максимально эффективную формуемость изделия;
- не предусматривает дополнительной подготовки препрегов, что позволяет значительно экономить время.

Преимуществом выбранного типа намотки также является возможность использования закладных элементов, устанавливаемых в конструкции для бетонирования и соединения сборных конструкций между собой, что позволяет повысить точность и надежность скрепления.

В связи с этим была разработана технология автоматизированной намотки с использованием закладных элементов. На рис. 5 показана оправка с закладным элементом. Для повышения прочностных характеристик штанги 2 используется закладной элемент 1, который позволяет осуществлять продольно-поперечный или спиральный тип намотки, что обеспечивает максимальную жесткость конечного продукта. Посадочный (D_1), внутренний (D_2) и внешний (D_3) диаметры закладного элемента рассчитываются заранее, так как диаметр конечной детали должен быть равен диаметру D_3 . Изначальный диаметр штанги равен диаметру D_1 . Происходит продольная намотка до диаметра D_2 , а затем продольно-поперечная или спиральная

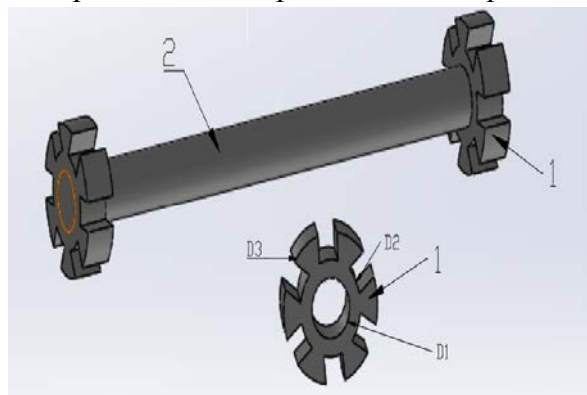


Рис. 5. Оправка с закладным элементом: 1 - закладной элемент; 2 - штанга

намотка до внешнего диаметра. Разница

между посадочным и внешним диаметрами - это заранее посчитанная толщина слоя намотки на оправку. Закладной элемент имеет внутреннюю резьбу, на которой крепятся наконечники, с помощью которых осуществляется дальнейшая сборка.

Для намотки применяются машины различных типов - от разновидностей токарных станков и машин с цепным приводом до более сложных автоматизированных агрегатов. В намоточных станках, выполненных по токарной схеме, оправка непрерывно вращается, в то время как раскладчик, подающий арматуру, перемещается возвратно-поступательно по направляющей. При реализации шлифовальной схемы картина обратная: вращающаяся оправка совершает возвратно-поступательные движения, а раскладчик неподвижен. Выбор схемы определяется соотношением размеров наматываемого изделия и толщины его стенок. Так, при больших габаритах (схема простой спиральной намотки) целесообразнее токарная схема, а для намотки толстостенного баллона небольшого размера - шлифовальная. В последнее время разрабатывается оборудование, в котором вместо механических средств управления схемой ориентации волокон используются компьютерные системы. Это позволяет получать трубчатые изделия, имеющие изгибы и неправильную форму, а также изделия со сложной геометрией. Разрабатывается оборудование для намотки с применением гибкой технологии, когда армирующие волокнистые материалы можно укладывать на оправке в любом направлении.

В конструкциях, изготовленных методом намотки, направление действующих напряжений может быть разнообразным. Это позволяет проектировать такие конструкции, в которых материал использован с большой степенью эффективности.

Основной процесс намотки поддается высокой степени механизации и автоматизации, что экономически выгодно в производстве. Во время намотки формируются радиально-перекрестные слои, при взаимодействии которых образуется прочная структура. Высокая точность расположения волокон на оправке достигается путем использования оборудования с совре-

менными системами числового программного управления (ЧПУ).

Рассмотрев существующие виды станков для намотки, приходим к выводу, что для получения нужного изделия необходим станок с ЧПУ, выполненный по токарной схеме, так как она более проста в реализации, что дает преимущество перед шлифовальным станком. ЧПУ необходимо для обеспечения точности изготовления изделий с закладными элементами.

Проведем краткий обзор современных намоточных станков с ЧПУ токарного типа, существующих на рынке.

Станок с ЧПУ радиально-перекрестной намотки РПН-600Ф3 (рис. 6) предназначен для изготовления стеклопластиковых и металлокомпозитных баллонов.

Основные характеристики станка:



Рис. 6. Станок с ЧПУ радиально-перекрестной намотки РПН-600Ф3

- Габариты - 4500×2000×2200 мм.
- Диаметр намотки - 100...1500 мм.
- Масса - 3000 кг.
- Угол намотки - 70...90°.
- Скорость намотки - 70 мм/мин.

Данный станок не обеспечивает минимальный диаметр 5 мм и угол намотки 0°, что необходимо для изготовления нужной детали. Угол намотки определяет осе-

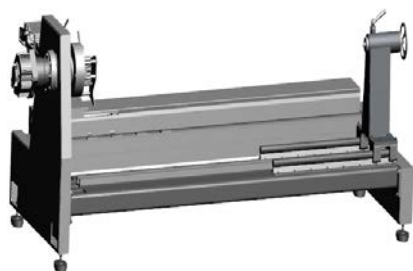


Рис. 7. Станок с ЧПУ радиально-перекрестной намотки РПН-400ЛФ3

вую и радиальную прочность изделия.

Станок с ЧПУ радиально-перекрестной намотки РПН-400ЛФ3 (рис. 7) используется для намотки стеклопластиковых, металлокомпозитных баллонов. Намотка возможна на толстостенную металлическую или полимерную оснастку.

Основные характеристики станка:

- Габариты - 6000×1900×2200 мм.
 - Диаметр намотки - 100...400 мм.
 - Масса - 3200 кг.
 - Температура связующего в ванне - 35...70 °С.
 - Скорость намотки - 70 мм/мин.
- Данный станок также не обеспечива-

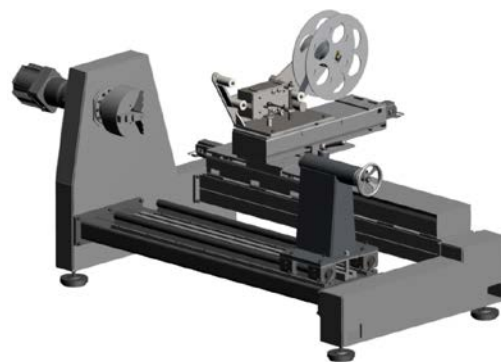


Рис. 8. Станок с ЧПУ радиально-перекрестной намотки РПН-800ТФ3

ет нужный диаметр намотки изделия.

Станок с ЧПУ радиально-перекрестной намотки РПН-800ТФ3 (рис. 8) предназначен для радиально-перекрестной намотки стеклопластиковых труб.

Основные характеристики станка:

- Габариты - 5100×1800×2000 мм.
- Диаметр намотки - 20...800 мм.
- Масса - 2200 кг.
- Угол намотки - 70...90°.

Данный станок не обеспечивает минимальный диаметр 5 мм и угол намотки 0°, что необходимо для изготовления нужной детали.

Обзор существующих на рынке станков привел к выводу, что нет ни одного, который в полной мере удовлетворял бы нашим требованиям:

- Габариты - 1200×250×360 мм.
- Угол намотки - 0...90°.
- Диаметр намотки - 5...250 мм.
- Температура связующего вещества в ванне - 35...110 °С.

В связи с этим стоит задача спроектировать станок, соответствующий выше-

перечисленным характеристикам, которые позволят нам изготавливать изделия по выбранным ранее технологиям.

Модель станка приведена на рис. 9.

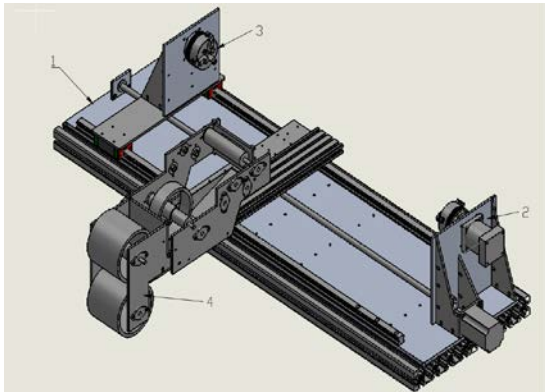


Рис. 9. Модель станка с ЧПУ

Основными узлами разрабатываемого станка являются станина 1, передняя бабка 2, задняя бабка 3 и раскладчик 4. Рассмотрим подробно каждый узел в отдельности [8]. На рис. 10 изображена станина, которая обеспечивает максимальную жесткость конструкции.

Она выполнена из листа дюралюминия, прикрепленного к алюминиевому квадратному профилю, чтобы избежать скручивания, так как при протягивании армирующего материала предполагаются большие нагрузки. Линейные перемещения выполняет раскладчик с помощью шарико-винтовой передачи (ШВП). В данном примере ШВП обладает рядом преимуществ перед ременной передачей и зубча-

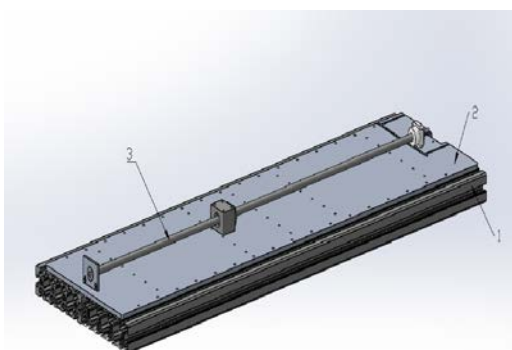


Рис. 10. Станина: 1 – алюминиевый профиль; 2 – крепежная площадка; 3 – ШВП

той рейкой: высокой степенью жесткости, износостойкостью, незначительным проскальзыванием и люфтом, а также более высокой редуцией.

В передней бабке (рис. 11) находится шпиндель 1, который движется при помощи шагового двигателя 3, работающего в

паре с редуктором 2. Шаговый двигатель - электродвигатель с дискретным угловым перемещением ротора, осуществляемым за счет импульсов сигнала управления [9]. Так как для натягивания армирующего материала требуется приложить большее усилие, чем может дать шаговый двигатель, то нам необходимо использовать редуктор 2. Использование шагового двигателя в данной конструкции дает возможность обеспечивать углы $0...90^{\circ}$, а также жестко фиксировать шпиндель в нужном положении во время намоточного процесса, благодаря чему становятся возможными поперечно-продольный и спиральный типы намотки.

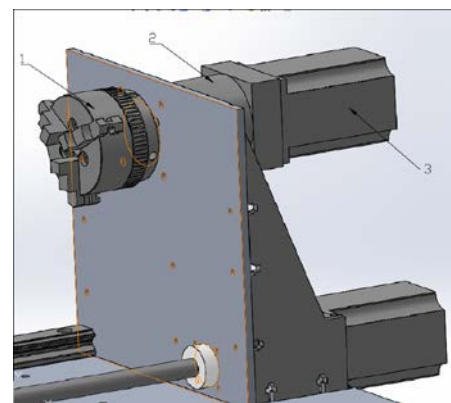


Рис. 11. Передняя бабка: 1 - шпиндель; 2 - редуктор; 3 - шаговый двигатель

Конструкция станка также подразумевает выполнение режимов, требующих подогрева и поддержания определенной температуры намоточного тракта.

Благодаря подогреву пропиточного барабана и ванны со связующим веществом поддерживается заданная температура тракта, которая во время процесса может меняться. Подогрев осуществляется при помощи плоских подогревателей, которые выполнены из нержавеющей стали, обладающей малой адгезией [10].

При решении задач, поставленных в работе, были использованы методы теории механизмов и машин применительно к станкам, методы моделирования механических систем, 3D-моделирование узлов и компонентов станка. Проведен анализ различных критериев качества компоновок универсальных многокоординатных станков. Также проведен обзор технологий намотки, выявлена самая перспективная для решения заданной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жолобов, А.А. Технология автоматизированного производства / А.А. Жолобов. - Дизайн ПРО, 2000.
2. Рыбак, Л.А. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры / Л.А. Рыбак, В.В. Ержуков, А.В. Чичварин. - М.: Физматлит, 2011.
3. Dandekar, C.K. Modeling of machining of composite materials: A review / C.K. Dandekar, Y.C. Shin // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2012. - № 57. - P. 102-121.
4. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.
5. Батаева, А.А. Композитные материалы: строение, получение, применение: учебник / А.А. Батаева. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 384 с.
6. Моисеев, Г.К. Влияние конструктивных и кинематических параметров наматывающих механизмов на характер расположения нитей на паковках / Г.К. Моисеев // Химические волокна. - 1973. - № 2.
7. Панин, И.Н. Совершенствование процесса формирования структуры и процесса сматывания мотальных паковок сомкнутой структуры намотки: дис. ... канд. техн. наук / И.Н. Панин. - Л., 1983.
8. Бунаков, П.Ю. Технологическая подготовка производства в САПР / П.Ю. Бунаков. - 2017. - 119 с.
9. Такаши, К. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Кенио Такаши. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
10. Ухов, В.Ф. Электронно-статистическая теория металлов и ионных кристаллов / В.Ф. Ухов, Р.М. Кобелева, Г.В. Дедков, А.И. Темроков. - М.: Наука, 1982. - 160 с.
1. Zholobov, A.A. *Automated Production Technology* / A.A. Zholobov. – Design PRO, 2000.
2. Rybak, L.A. *Efficient Methods for Problem Solution in Kinematics and Dynamics of Machine-Robot of Parallel Structure* / L.A. Rybak, V.V. Erzhukov, A.V. Chichvarin. – M.: Physmathlit, 2011.
3. Dandekar, C.K. Modeling of machining of composite materials: A review / C.K. Dandekar, Y.C. Shin // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2012. - № 57. - P. 102-121.
4. Vasiliev, V.V. *Mechanics of Composite Structures* / V.V. Vasiliev. – M.: Mechanical Engineering, 1988. - pp. 272.
5. Bataeva, A.A. *Composites: Structure, Production, Application: textbook* / A.A. Bataeva. – Novosibirsk: NSRU Publishers, 2002. – pp. 384.
6. Moiseev, G.K. Impact of design and kinematic parameters of winding devices upon nature of thread location on bobbins / G.K. Moiseev // *Chemical Fibers*. – 1973. – No.2.
7. Panin, I.N. Improvement of structure formation process and reel process of reeling bobbins with closed winding structure: *Thesis for Can. Sc. Tech. Degree* / I.N. Panin. – L., 1983.
8. Bunakov, P.Yu. *Work Preparation in CAD* / P.Yu. Bunakov. – 2017. – pp. 119.
9. Takashy, K. *Stepper Motors and Their Microprocessor Systems of Control* / kenio Takashy. – M.: Energoatomizdat, 1987.
10. Ukhov, V.F. *Electronic Statistical Theory of Metals and Ionic Crystals* / V.F. Ukhov, R.M. Kobeleva, G.V. Dedkov, A.I. Temrokov. – Science, 1982. – pp. 160.

Статья поступила в редакцию 04.09.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Кабардино-Балкарского
Государственного университета
Яхтулов М.М.

Статья принята к публикации 10.10.18.

Сведения об авторах:

Нахушев Рахим Суфьянович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: electronics_rn@mail.ru.

Шевхужев Астемир Осмнович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: astemir.shevkhuzh@mail.ru.

Nakhushev, Rakhim Sufyanovich, Post graduate student, Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: electronics_rn@mail.ru.

Shevkuzhev Astemir Osmovich, Post graduate student, Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: astemir.shevkhuzh@mail.ru.

Атабаева Даниза Маратовна, магистр Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, e-mail: daniza.atabaeva@yandex.ru.

Солодилов Виталий Игоревич, к.т.н., ст. науч. сотрудник Института химической физики им. Н.Н. Семенова, Москва e-mail: vitali-yo@yandex.ru.

Atabaeva Daniza Maratovna, Master degree student, Bauman State Technical University of Moscow, e-mail: daniza.atabaeva@yandex.ru.

Solodilov Vitaly Igorevich, Can. Sc. Tech., Senior scientist, Semyonov Institute of Chemical Physics, e-mail: vitali-yo@yandex.ru.