

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ НАМОТКИ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

А. Ю. КУТЬИН, В. М. МУСАЛИМОВ, А. С. ПОЛЯКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: musvm@ya.ru*

Филаментная намотка является одним из распространенных методов изготовления композитных цилиндрических изделий, она представляет собой процесс укладки в строгом геометрическом порядке на поверхность оправки нитей или ленты. Оправка вращается, раскладчик нити движется горизонтально, а сила натяжения нитей может изменяться. В качестве материала намотки чаще всего используются углеродная нить или стекловолокно, покрытые синтетической смолой. Когда смола затвердеет, оправку удаляют, оставляя готовое изделие. Существенный недостаток технологии — невозможность стабилизации натяжения слоев намотки и ее плотности. С целью устранения этого недостатка предлагается система управления геометрическими параметрами композитной намотки и ее плотностью.

**Ключевые слова:** композиционный материал, намотка, натяжение нити, управление процессом намотки

**Введение.** Филаментная намотка — это технологический процесс изготовления выпуклых деталей методом укладки в строгом геометрическом порядке на поверхность оправки нити или ленты, пропитанной композитной смолой. Оправка вращается, раскладчик нити движется горизонтально, а сила натяжения нити может изменяться. В качестве материала намотки чаще всего используются углеродная нить или стекловолокно. После достижения требуемой толщины намотанного материала заготовку с оправкой помещают в печь для высыхания. Когда смола затвердеет, оправку удаляют, оставляя готовое изделие.

Несмотря на стабилизацию линейной скорости процесса наматывания материала и поддержку заданного натяжения нити (ленты) специальным устройством, стабилизировать натяжение поверхностного слоя намотки и обеспечить для всех воспроизводимых изделий одинаковый режим наматывания и одинаковую плотность намотки не удастся. Это обусловлено тем, что изменение любого фактора, влияющего на процесс наматывания, неизбежно приводит к изменению закона перемещения точки наматывания. Например, могут измениться линейная плотность наматываемого материала [1] или соотношения между упругой, эластической и пластической деформациями материала [2]. Поэтому намотки изделий, воспроизводимые одним способом, существенно различаются значением текущих и конечного радиусов и плотности [3].

Кроме того, в созданном слое наблюдаются различия в радиусе намотки вдоль образующей цилиндрического тела, вследствие чего на цилиндрической поверхности готового изделия наблюдается бугристость, для устранения которой используется дополнительная механическая обработка. Из-за неравномерности по толщине стенки готового изделия возникают дополнительные напряжения в осевом направлении, что приводит к преждевременному износу изделий. Механическая обработка снижает прочностные характеристики изделия.

Таким образом, актуальной является задача стабилизации плотности намотки композиционного изделия за счет управления процессом наматывания. Существующие способы решения указанной задачи [4, 5] недостаточно эффективны из-за отсутствия взаимосвязи

между геометрическими параметрами создаваемой намотки и параметрами ее напряженного состояния.

**Моделирование процесса намотки.** Для формирования намотки и разработки управляющих алгоритмов следует разработать модель наматывания, исходя из представления о том, что в сечении, перпендикулярном оси вращения оправки, движение точки наматывания происходит по спирали. По определению, спираль — это линия, описываемая некоторой точкой при ее движении по лучу и вращении указанного луча вокруг заданного центра. Прямолинейное движение точки по лучу характеризуется скоростью перемещения, а вращение луча характеризуется угловой скоростью:

$$v = \frac{d\rho}{dt}, \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

где  $t$  — текущее время движения точки (в нашем случае точки наматывания, т.е. точки контакта наматываемого материала с телом намотки),  $\rho$  — текущий радиус намотки,  $\theta$  — угол поворота луча или, применительно к объекту моделирования, угол поворота тела вращения — формирующейся намотки.

Отношение  $v$  к  $\omega$  называется параметром спирали или параметрической скоростью перемещения точки наматывания по ее полярному радиусу в полярных координатах:

$$a = v/\omega = \frac{d\rho}{d\theta} = f(\theta). \quad (2)$$

В общем виде модель формируемой цилиндрической намотки можно представить уравнениями параметра спирали  $a$ , текущего радиуса  $\rho$ , длины  $L$  располагающихся по спирали композитных слоев намотки и средней объемной плотности  $\gamma$  намотки:

$$a = f(\theta), \quad \rho(\theta) - \rho_0 = \int_0^\theta a d\theta, \quad L = \int_0^\theta \rho(\theta) d\theta, \quad \gamma = \frac{m_s D(\rho)}{\pi H (\rho^2 - \rho_0^2)}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  — радиус оправки,  $m_s$  — масса единицы длины наматываемого материала,  $H$  — ширина оправки,  $D$  — длина наматываемого материала.

В качестве примера рассмотрим наматывание семи нитей на оправку с образующей длиной  $H$ . В простейшем случае, когда в процессе наматывания  $a = \text{const}$ , при интегрировании 2-го выражения из (3) с учетом указанного условия получается спираль Архимеда:

$$\rho(\theta) = \rho_0 + a\theta. \quad (4)$$

Согласно 3-му выражению из (3), длина композитного слоя наматываемого материала рассчитывается по упрощенной формуле [6]:

$$L = \frac{a\theta^2}{2} + \rho_0\theta = \frac{\rho^2 - \rho_0^2}{2a}. \quad (5)$$

Длина наматываемого материала  $D$  рассчитывается в соответствии с движением раскладчика. Расстояние  $h$ , пройденное раскладчиком, за время  $t_1$  одного оборота оправки ( $t_1 = 2\pi/\omega$  при  $\omega = \text{const}$ ), рассчитывается по формуле:

$$h = Vt_1 = V \frac{2\pi}{\omega}, \quad (6)$$

где  $\omega$  — угловая скорость оправки,  $V$  — скорость раскладчика нитей.

Следовательно, длина одного витка намотанных нитей определяется выражением:

$$D_b = \sqrt{(2\pi\rho(\theta))^2 + h^2} = \sqrt{(2\pi\rho(\theta))^2 + \left(\frac{2\pi V}{\omega}\right)^2}. \quad (7)$$

С учетом (7) длина намотанных по спирали нитей по всей ширине оправки вычисляется следующим образом:

$$\frac{(H-g)}{h} D_b = \frac{(H-g)\omega}{2\pi V} \sqrt{(2\pi\rho(\theta))^2 + \left(\frac{2\pi V}{\omega}\right)^2}, \quad (8)$$

где  $g$  — ширина группы нитей на выходе из раскладчика;  $(H-g)/h$  — число оборотов, совершаемых оправкой при наматывании по всей ее ширине спирали нитей.

Согласно (8) можно определить длину намотанных на оправку нитей при ее повороте на некоторый угол  $\theta$ :

$$D = \int_0^\theta \left[ \frac{(H-g)}{h} D_b / \frac{2\pi(H-g)}{h} \right] d\theta = \int_0^\theta \sqrt{(\rho(\theta))^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} d\theta. \quad (9)$$

Подставив (4) и последовательно преобразовывая выражение (9), получим:

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{a} \int_0^\theta \sqrt{(\rho(\theta))^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} d(a\theta + \rho_0) = \frac{1}{a} \int_{\rho_0}^\rho \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} d\rho = \\ &= \frac{1}{2a} \left[ \rho \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2 \ln \left( \rho + \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} \right) - C_1 \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$C_1 = \left[ \rho_0 \sqrt{\rho_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2 \ln \left( \rho_0 + \sqrt{\rho_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} \right) \right].$$

С учетом (10) плотность композитной намотки из (3) определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{MTD(\rho)}{\pi H(\rho^2 - \rho_0^2)} = b \frac{D(\theta)}{a\theta(2\rho_0 + a\theta)}, \quad (11)$$

где  $M$  — число нитей в заправке,  $T$  — линейная плотность нитей (отношение массы нити к ее километровому отрезку),  $b = MT/(\pi H)$ .

Анализ выражений (3) показывает, что для формирования намотки необходимо поддерживать фактическую скорость перемещения точки наматывания равной теоретической. При реализации этого условия все остальные технологические показатели (радиус, длина, плотность) будут воспроизводиться по однотипным функциям. Нужно поддерживать фактический радиус формируемой намотки равным теоретическому. Величину отклонения фактического радиуса намотки от теоретического при текущем значении угла поворота следует использовать для построения системы управления процессом формирования намотки. Необходимо воздействовать на намотку с переменным усилием [4, 5], адекватно реагируя на все случайные возмущения и обеспечивая равенство фактического и теоретического радиусов намотки.

**Устройство управления.** Для реализации этого метода разработано устройство управления (рис. 1), включающее в себя датчик оборотов оправки 1, датчик радиуса намотки 2, блок управления формированием намотки 3, цифроаналоговый преобразователь 4, устройство согласования 5, электромагнитную муфту 6, уплотняющий орган 7 и оправку 8. В постоянное запоминающее устройство блока 3 заносятся постоянные величины: радиуса  $\rho_0$  и ширины оправки  $H$ , номинального теоретического приращения радиуса намотки  $r$ . На основе исходных данных рассчитывается коэффициент  $b = MT/(\pi H)$ , значение которого вводится в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) блока 3. Кроме того, блок 3 рассчитывает конечное число оборотов оправки  $n_k$  и количество оборотов  $K_2$ , через которые прижимной ролик должен переместиться на величину  $r$ .

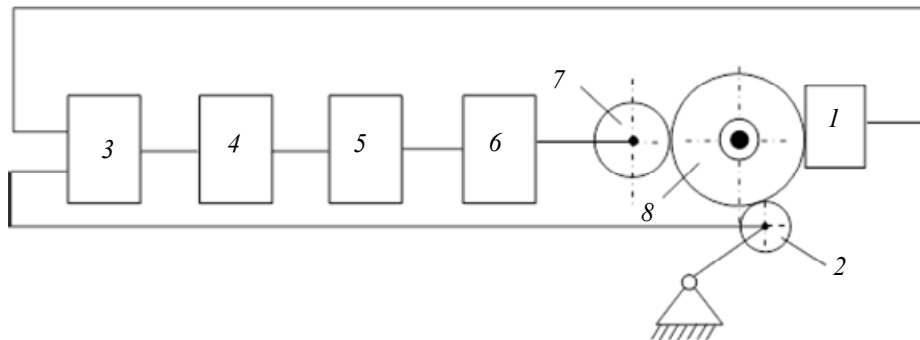


Рис. 1

В качестве блока управления 3 могут использоваться любые ПК-совместимые промышленные контроллеры, например, серии ADAM-5000, выпускаемые фирмой Advantech, или аналогичные других производителей. Во время наматывания измеряется фактический радиус намотки, величина которого записывается в ячейку памяти вычислительного устройства. Через заданное число оборотов  $K_2$  оправки производится расчет теоретического радиуса намотки в соответствии с математической моделью. Когда вычислительное устройство подсчитывает заданное число оборотов оправки, уплотняющий орган находится в фиксированном положении, т.е. не отводится, что позволяет быстро добиться цилиндричности намотки. Значение теоретического радиуса намотки сравнивается с фактическим, которое измеряется через каждые восемь оборотов оправки. Для их подсчета в ОЗУ организован счетчик числа оборотов  $n_e$ . Информация, полученная в результате сравнения, позволяет вычислительному устройству определить величину отвода уплотняющего органа наматывающей машины и выдать сигнал исполнительному механизму для принудительного отвода с тем, чтобы обеспечить равенство между указанными радиусами. Когда количество оборотов оправки  $n$  достигнет конечного заданного значения  $n_k$ , процесс наматывания завершается. Алгоритм формирования намотки показан на рис. 2.

Для моделирования процесса управления плотностью композитной намотки использовался пакет прикладных программ MatLab, позволяющий анализировать производительность устройства и данные на каждом его отдельном узле. На рис. 3 показана модель процесса управления, построенного в Simulink. Расчет радиуса намотки и ее плотности осуществлялся по формулам (4), (11) с учетом взаимосвязи между углом поворота оправки  $\theta$ , ее угловой скоростью  $\omega$  и временем намотки  $\text{time}$  ( $\theta = \omega \cdot \text{time}$ ). На рис. 4 показано изменение фактической плотности намотки в процессе намотки.

Таким образом, предложено эффективное решение для управления процессом изменения плотности композитной намотки по заданной функции (11) за счет изменения радиально-го приращения слоев намотки и предотвращения действия случайных факторов с целью стабилизации напряженно-деформированного состояния цилиндрических композитных изделий.

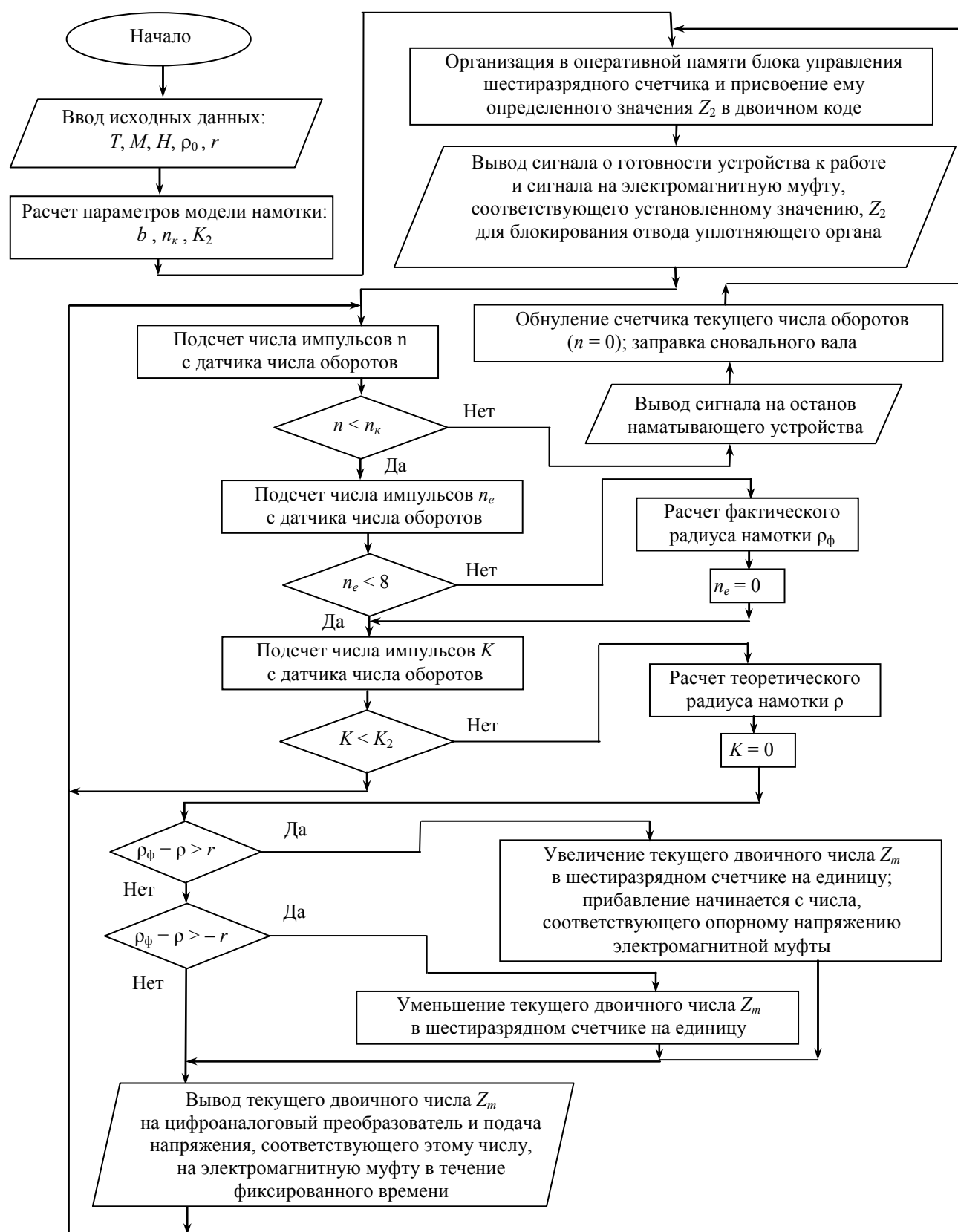


Рис. 2

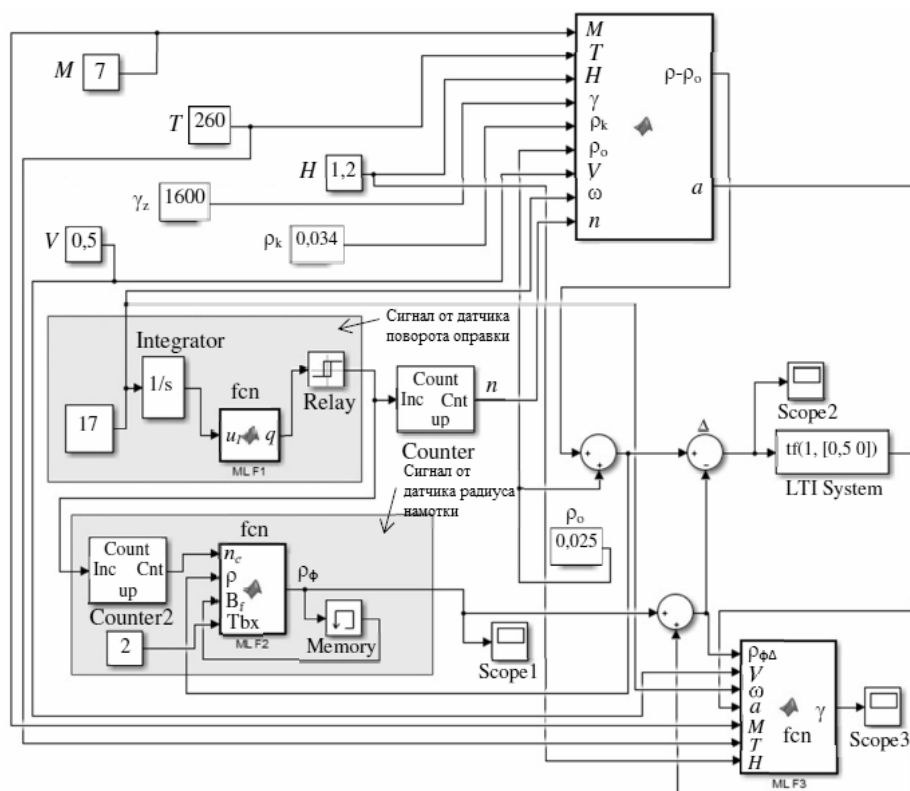


Рис. 3

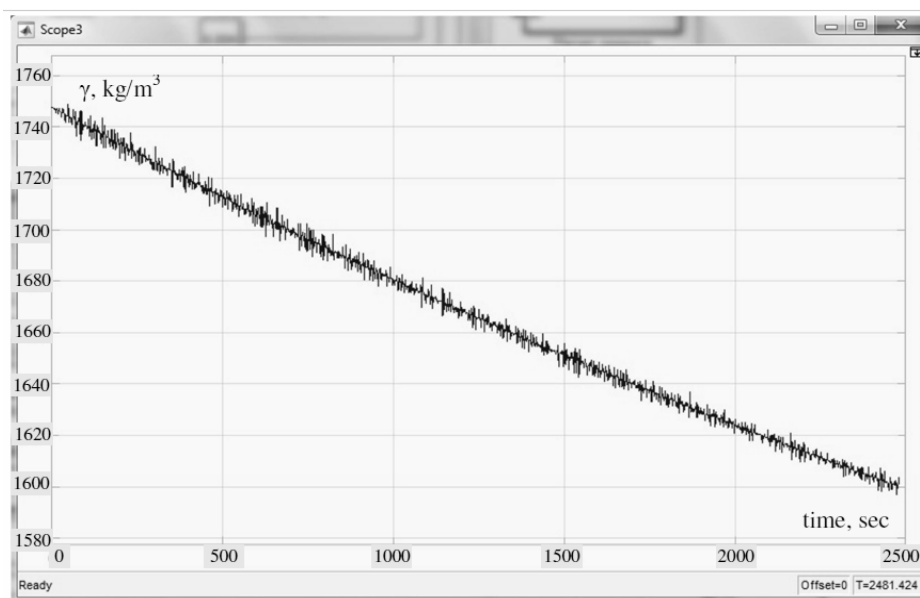


Рис. 4

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Образцов И. Ф., Булычев Л. А., Васильев В. В. и др. Строительная механика летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
2. Thwaites J. J. The elastic deformation of a rod with helical anisotropy // Intern. J. Mech. 1977. Vol. 19, N 3. P. 161—169.

3. Мусалимов В. М., Монахов Ю. С., Кутын А. Ю., Соловьева Г. А. Моделирование процесса наматывания нитей на жесткий цилиндр // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 657—663.
4. Hashimoto H. Intelligent Winding Machine of Plastic Films for Preventing Both Wrinkles and Slippages // Modern Mechanical Engineering. 2016. Vol. 6. P. 20—31 [Электронный ресурс]: <<http://dx.doi.org/10.4236/mme.2016.61003>>.
5. Hashimoto H. et al. Optimum Winding Tension and Nip-Load into Wound Webs for Protecting Wrinkle and Slippage // JSME J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2010. Vol. 4. P. 214—225.
6. Кутын А. Ю. Оценка погрешности при определении длины текстильного материала // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2004. № 2. С. 117—118.

**Сведения об авторах**

- Алексей Юрьевич Кутын** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра мехатроники; E-mail: [kutin\\_alex@mail.ru](mailto:kutin_alex@mail.ru)
- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра мехатроники; E-mail: [musvm@ya.ru](mailto:musvm@ya.ru)
- Артем Сергеевич Поляков** — студент; Университет ИТМО; кафедра мехатроники; E-mail: [artem60395@mail.ru](mailto:artem60395@mail.ru)

Поступила в редакцию  
21.11.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Кутын А. Ю., Мусалимов В. М., Поляков А. С. Проектирование композитной намотки и управление процессом ее формирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 160—166.

**DESIGNING COMPOSITE WINDING AND MANAGING THE PROCESS OF ITS FORMATION**

**A. Yu. Kutin, V. M. Musalimov, A. S. Polyakov**

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [musvm@ya.ru](mailto:musvm@ya.ru)

Filament winding is a common method of manufacturing cylindrical composite products. It is the process of placing threads or tapes in strict geometric order on the surface. The winding material is usually carbon fiber or glass fiber coated by a synthetic resin. The mandrel is removed when the resin hardens and then the final product is formed. Linear speed of winding material and thread tension (tape) are maintained at a given level by special devices in the process of winding up, so no less it is impossible to stabilize the winding tension of the surface layer and to ensure the same winding mode and the same winding density for all reproduced products. Final products have differentiations in radius of winding along generator line of the cylindrical body and surface layer of the finished product has tuberosity. To address this shortcoming, a control system of the composite winding density is proposed. The system is anticipated to ensure stability of the composite product's geometric parameters and its density.

**Keywords:** composite material, circumferential winding, thread tension, control system of the composite winding density

**Data on authors**

- Aleksey Yu. Kutin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Mechatronics; E-mail: [kutin\\_alex@mail.ru](mailto:kutin_alex@mail.ru)
- Victor M. Musalimov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Mechatronics; E-mail: [musvm@ya.ru](mailto:musvm@ya.ru)
- Artem S. Polyakov** — Student; ITMO University, Department of Mechatronics; E-mail: [artem60395@mail.ru](mailto:artem60395@mail.ru)

**For citation:** Kutin A. Yu., Musalimov V. M., Polyakov A. S. Designing composite winding and managing the process of its formation. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 160—166 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166