

УДК 621.744; 621.642.07; 678.067.5; 658.512.22

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМОТКИ КОМПОЗИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

А.Ю. Кутын^а, Г.П. Арясов^б

^а ООО «ВП Петро Ин Трейд», Санкт-Петербург, 194295, Российская Федерация

^б Таллинский университет технологий, Таллин, 19086, Эстония

Адрес для переписки: kutin_alex@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.02.20, принята к печати 05.03.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Кутын А.Ю., Арясов Г.П. Моделирование процесса намотки композитных цилиндрических оболочек // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 283–289. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289

Аннотация

Предмет исследования. Существует эффективный способ филаментной намотки для изготовления полых композитных изделий (трубы, емкости и т. п.). Готовая продукция отличается легкостью, прочностью и широко используется в промышленности. Однако этот метод имеет существенные недостатки. Натяжение поверхностного слоя и натяжение внутренних слоев могут значительно различаться у формируемых изделий. Этот эффект наблюдается и в том случае, когда натяжение наматываемого материала регулируется. Еще одним существенным недостатком технологии является изменение диаметра поперечного сечения изделия в торцевых зонах, где осуществляется возвратное движение подвижной тележки с нитями (лентой). Вследствие указанных недостатков имеются отклонения плотности намотки и других показателей напряженно-деформированного состояния от плановых значений. **Метод.** Для устранения отмеченных недостатков предлагается оригинальный метод управления радиальным приращением композитной намотки и ее плотностью. Он базируется на модели формирования композитной намотки, в основе которой лежит представление о движении точки наматывания материала по спирали в проекции, перпендикулярной оси вращения оправки. С помощью модели определяются заданная плотность намотки, нормированное приращение радиуса намотки и изменение угловой скорости оправки при движении раскладчика в торцевой зоне. Анализ модели показывает, что для формирования композитной намотки с равными технологическими параметрами (радиус, длина намотки, плотность) необходимо поддерживать фактическую скорость перемещения точки наматывания, равной теоретической. Практически это означает, что нужно поддерживать фактический радиус формируемой намотки, равным теоретическому на каждом текущем значении угла поворота оправки. **Основные результаты.** Для реализации заявленного метода разработано устройство управления процессом формирования намотки. Устройство обеспечит воздействие на намотку с переменным усилием, адекватно реагируя на случайные возмущения и поддерживая равенство между фактическим и расчетным радиусами намотки. С помощью приложения Simulink, являющегося составной частью пакета прикладных программ MATLAB, построена модель процесса управления устройством. **Практическая значимость.** Предлагаемый метод и устройство управления радиальным приращением композитной намотки и ее плотностью повысят эффективность производства цилиндрических композитных изделий за счет стабилизации напряженно-деформированного состояния композитной намотки и предотвращения действия случайных факторов.

Ключевые слова

композитный материал, намотка, натяжение нити, управление процессом наматывания, система управления

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289

MODELING OF WINDING PROCESS OF COMPOSITE CYLINDRICAL SHELLS

A.Yu. Kutin^а, G.P. Aryasov^б

^а VP Petro In Treid, LLC, Saint Petersburg, 194295, Russian Federation

^б Tallinn University of Technology, Tallinn, 19086, Estonia

Corresponding author: kutin_alex@mail.ru

Article info

Received 03.02.20, accepted 05.03.20

Article in Russian

For citation: Kutin A. Yu., Aryasov G.P. Modeling of winding process of composite cylindrical shells. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 283–289 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289

Abstract

Subject of Research. The paper presents a review of an effective filament winding method for hollow composite products manufacturing (tubes and containers). Finished products are lightweight, durable and widely used in industry. However, this method has significant drawbacks. The tension of the surface layer and the tension of the inner layers can differ significantly for the formed products. This effect is also observed when the tension of the wound material is regulated. Another significant disadvantage of technology is the change in the cross-sectional diameter of the product in the end zone, where the backward motion of the movable trolley with filaments (tape) is performed. Due to these shortcomings, there are deviations in the winding density and other indicators of the stress-strain state from the planned values. **Method.** We offer an original method for controlling the radial increment of the composite winding and its density to eliminate mentioned above drawbacks. The method is based on a composite winding model. The model is developed in view of the following representation: the trajectory of the winding-on point is a spiral in a section perpendicular to the axis of the mandrel rotation. The specified winding density, the normalized increment of the winding radius and the change in the angular velocity of the mandrel in the end zones are determined by this model. The model analysis shows that actual speed of the winding point should be equal to the theoretical one for the deterministic winding process. If this condition is met, then all other technological parameters (radius, length, density) will be reproduced on the basis of pre-known functions. It is advisable to maintain the equality between the actual winding radius and theoretical winding radius for the practical implementation of the control algorithm winding process. If this condition is implemented, then the process of material winding will be predictable. **Main Results.** A control device for the winding process implementing this method is designed. The device provides an action on the winding with variable force, adequately responding to random disturbances and maintaining equality between the actual and calculated winding radii. The Simulink application, an integral part of the Matlab application package, is used for control device modeling. **Practical Relevance.** The proposed efficient solution for the control composite winding density provides stabilization of the stress-strain state of the cylindrical composite products by changing the radial increment of the winding layers and preventing the effect of the random factors and, consequently, increases production efficiency.

Keywords

composite material, circumferential winding, thread tension, composite winding density control

Введение

Относительно недавно все трубы и промышленные емкости производились из металлов. Сейчас для их изготовления применяют композитные материалы. Одним из известных и эффективных методов изготовления полых изделий (труб и больших емкостей) является филаментная намотка [1]. Она осуществляется специальными устройствами [2]. Волокна сматываются с бобин, установленных на шпулярнике, пропитываются в специальной ванне смолой для укрепления их структуры и последующего склеивания в намотке, а затем наматываются на вращающуюся форму (оправку).

Помимо очевидных преимуществ у этого метода есть и существенные недостатки. Например, несмотря на регулирование натяжения подаваемого материала с целью поддержания его на заданном уровне [3–6], натяжение поверхностного слоя и внутренних слоев не удается стабилизировать и обеспечить для всех воспроизводимых изделий одинаковые значения радиуса намотки и ее плотности [7, 8]. Причина этого явления — неоднородность наматываемого материала по физико-механическим показателям (линейной плотности, характеристикам упругих свойств, влажности и т. п.) [9–11] и случайный характер собственно процесса наматывания. Изменение любого технологического фактора, связанного с процессом наматывания и влияющего на него, неизбежно приводит к отклонению движения точки наматывания от планируемой траектории. Еще одним существенным недостатком технологии является изменение диаметра поперечного сечения изделия в концевых зонах, где осуществляется возвратное движение подвижной тележки с нитями (лентой).

Таким образом, актуальной является задача стабилизации плотности намотки композитного изделия за счет управления процессом наматывания. Существующие примеры решения указанной задачи [12, 13] недостаточно эффективны из-за отсутствия взаимосвязи между геометрическими параметрами создаваемой намотки и параметрами ее напряженного состояния.

Модель формирования композитной намотки и определение кинематических параметров

Для решения поставленной задачи авторами было предложено устройство управления процессом формирования намотки [14], разработанное на основе модели ее формирования [15]:

$$a = f(\theta), \rho(\theta) - \rho_0 = \int_0^\theta a d\theta, L = \int_0^\theta \rho(\theta) d\theta, \gamma = \frac{mD(\rho)}{\pi H(\rho^2 - \rho_0^2)}, \tag{1}$$

где θ — угол поворота оправки; a — параметр спирали намотки; ρ_0 — радиус оправки; m — масса единицы длины наматываемого материала; H — ширина оправки; ρ — текущий радиус намотки; L — длина композитного слоя наматываемого материала; D — длина наматываемого материала.

Параметр спирали намотки определяется отношением

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

где v — скорость перемещения точки наматывания (точки контакта наматываемого материала с телом на-

мотки) в радиальном направлении ($v = dp/dt$); ω — угловая скорость вращения оправки ($\omega = d\theta/dt$); t — текущее время движения точки наматывания.

При небольшой толщине намотки параметр a практически не меняет своего значения в процессе наматывания ($a = \text{const}$), и текущий радиус намотки рассчитывается по спирали Архимеда [15]

$$\rho(\theta) = \rho_0 + a\theta, \quad (3)$$

а длина композитного слоя наматываемого материала рассчитывается по упрощенной формуле спрямления дуги спирали [16]

$$L = a\theta^2/2 + \rho_0\theta = (\rho^2 - \rho_0^2)/2a. \quad (4)$$

Уравнения (2)–(4) связывают движение точки наматывания $\rho(\theta)$ в проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения, с длиной композитного слоя $L(\theta)$. Согласно (1), для определения плотности намотки $\gamma(\theta)$ этого недостаточно, и необходимо рассчитывать длину наматываемого материала $D(\rho)$. Для этого рассмотрим движение точки наматывания на поверхности оправки в цилиндрической системе координат. В ней положение точки наматывания \mathbf{r} в момент времени t помимо координат ρ, θ будет определяться и координатой z ($\mathbf{r} = \{\rho, \theta, z\}$), задающей величину отрезка на образующей цилиндрической поверхности от плоскости, перпендикулярной оси вращения, в которой откладываются ρ и θ , до точки наматывания.

Диапазон изменения координаты z ограничен шириной оправки ($0 \leq z \leq H$). В этом диапазоне движение точки наматывания по образующей цилиндрической поверхности определяется движением раскладчика в торцевых зонах и в регулярной зоне ($H = H_T + H_p + H_T$). В торцевой зоне H_T оболочки, где происходит реверс раскладчика, намотка осуществляется по линии равного геодезического отклонения [17]. В этой зоне происходит плавное изменение угла намотки β_T материала на оболочку от расчетного значения β до предельного значения $\beta_n = \pi/2$ при изменении скорости V_T раскладчика от значения V до 0 или наоборот. В регулярной зоне H_p скорость движения раскладчика постоянна ($V_T = V = \text{const}$), поэтому

$$r = \left\{ \rho, \theta, H_T + \frac{H_p}{2} [1 - (-1)^n] + (-1)^n Vt \right\} \quad \text{при } H_T < z < H_T + H_p, \quad (5)$$

где n — количество реверсов раскладчика ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Когда нельзя пренебречь шириной g наматываемого материала или группы нитей, координата z является координатой точки, лежащей посередине места, занимаемого наматываемым материалом в зоне его контакта с телом намотки, на образующей цилиндрической поверхности. В этом случае диапазон изменения координаты z сократится на величину g ($0 \leq z \leq H-g$), так как уменьшится диапазон раскладки нитей в торцевых зонах оправки ($H_T^* = H_T - g/2$).

В торцевых зонах скорость V_T раскладчика меняется от 0 до V и наоборот. С учетом небольшой величины этих зон по отношению к регулярной зоне возможно

аппроксимировать движение точки наматывания в них как равнозамедленное или равноускоренное, тогда

$$r = \left\{ \rho, \theta, \frac{H_T}{2} [1 - (-1)^n] + (-1)^n V \frac{t}{2} \right\} \quad \text{при } 0 \leq z \leq H_T, \quad (6)$$

$$r = \left\{ \rho, \theta, (H_T + H_p) + \frac{H_p}{2} [1 - (-1)^n] + (-1)^n V \frac{t}{2} \right\} \quad \text{при } H_T + H_p \leq z \leq H, \quad (7)$$

Текущее значение угла намотки β_T материала на оболочку в этих зонах, где укладка витков осуществляется по линии равного геодезического отклонения, зависит от угла геодезического отклонения φ , характеризующего равновесность нити (волокна) на поверхности оправки. Тангенс этого угла является отношением геодезической кривизны к нормальной [17]:

$$\text{tg}\varphi = K_{gd}/K_n = R_n/R_{gd}, \quad (8)$$

где K_n и K_{gd} , R_n и R_{gd} — нормальная и геодезическая кривизна витка и их радиусы.

Нормальная кривизна определяется из уравнения Эйлера:

$$K_n = K_1 \cos^2 \beta_T + K_2 \sin^2 \beta_T, \quad (9)$$

где K_1 и K_2 — наибольшая и наименьшая нормальные кривизны поверхности в точке наматывания. В данном случае для линии равного геодезического отклонения $K_1 = 0$ и $K_2 = 1/p$.

Из уравнения (8) с учетом (9) следует:

$$R_{gd} \text{tg}\varphi = \rho / \sin^2 \beta_T. \quad (10)$$

Радиус R_{gd} геодезической кривизны витка для развертываемой цилиндрической поверхности оправки (рис. 1) определяется отношением

$$R_{gd} = ds/d\beta_T = dz/(d\beta_T \cos \beta_T). \quad (11)$$

После подстановки (10) в (11) получится

$$dz = \frac{\rho}{\text{tg}\varphi} \frac{\cos \beta_T}{\sin^2 \beta_T} d\beta_T. \quad (12)$$

Интегрирование выражения (12) позволяет найти зависимость угла намотки β_T от величины перемеще-

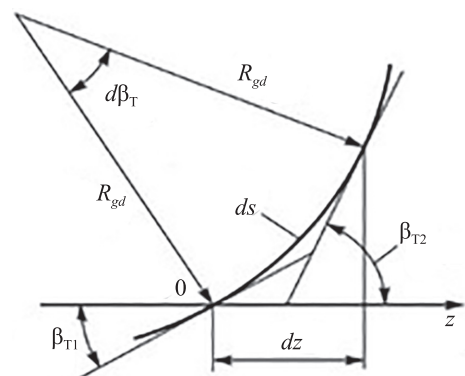


Рис. 1. Радиус геодезической кривизны витка

ния точки наматывания вдоль координатной оси z в торцевых зонах при изменении z от 0 до H_T или от H до $H_T + H_p$:

$$\frac{1}{\sin\beta_T} = 1 + \left| \left[z - \frac{H}{2} (1 - (-1)^n) \right] \frac{\text{tg}\varphi}{\rho} \right|. \quad (13)$$

Модуль слагаемого в (13) обусловлен сменой направления движения раскладчика нити и соответственно сменой направления отсчета угла намотки.

Аналогичным образом определяется зависимость угла намотки β_T при изменении z от $H_T + H_p$ до H или от H_T до 0:

$$\frac{1}{\sin\beta_T} = \frac{1}{\sin\beta} - \left[\frac{(H_T + H_p)}{2} (1 - (-1)^{n+1}) + (-1)^{n+1}z \right] \frac{\text{tg}\varphi}{\rho}. \quad (14)$$

Текущее значение угла намотки β_T связано с углом поворота оправки в торцевой зоне θ_τ дифференциальным соотношением (рис. 1) [17]:

$$\text{tg}\beta_T = \frac{\rho d\theta_\tau}{dz}, \quad d\theta_\tau = \frac{dz \text{tg}\beta_T}{\rho}. \quad (15)$$

После подстановки (12) в (15) и интегрирования получится

$$\theta_\tau = \frac{1}{\text{tg}\varphi} \left[\ln\left(\text{tg}\frac{\beta_T}{2}\right) - \ln\left(\text{tg}\frac{\beta}{2}\right) \right]. \quad (16)$$

При полном прохождении раскладчиком торцевой зоны оправка в соответствии с (16) повернется на угол:

$$\theta_\tau = \frac{1}{\text{tg}\varphi} \ln\left(\frac{\sin\beta}{1 - \cos\beta}\right). \quad (17)$$

Угол намотки материала на оболочку β_T в регулярной зоне определяется скоростью раскладчика и достигает значения β (рис. 2). Его можно рассчитать на основе отношения расстояния h , пройденного раскладчиком, за время t_1 одного оборота оправки ($t_1 = 2\pi/\omega$ при $\omega = \text{const}$) к значению длины окружности намотки:

$$h = Vt_1 = V \frac{2\pi}{\omega}, \quad \beta = \text{arccctg}\left(\frac{V}{\rho\omega}\right), \quad (18)$$

где ω — угловая скорость оправки.

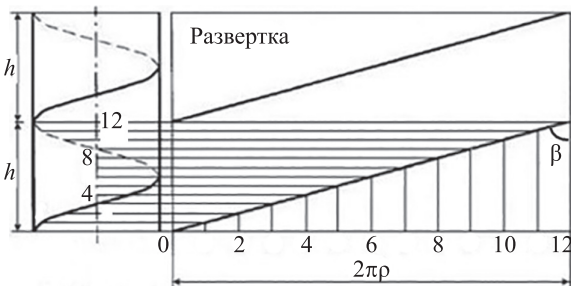


Рис. 2. Развертка витка нитей на цилиндрической поверхности

Выбор в качестве аппроксимирующей функции, характеризующей движение точки наматывания в торцевой зоне, зависимости, описывающей это движение как равнозамедленное (равноускоренное), позволяет рассчитать время t_{rev} прохождения раскладчиком торцевой зоны H_T и положение y на ней точки наматывания

$$t_{rev} = \frac{2H_T}{V}, \quad y = \frac{t_\tau V}{2}, \quad (19)$$

$$z(y) = (-1)^n y + \frac{H}{2} (1 - (-1)^n),$$

где t_τ — текущее время движения раскладчика в торцевой зоне, $t_\tau \in [0, t_{rev}]$.

С учетом β_T в (13) или (14) и z в (19), уравнение (16) представляет собой функцию θ_τ , зависящую от времени t_τ , в соответствии с которой определяется угловая скорость в торцевой зоне

$$\omega_\tau = \frac{\theta_\tau(t_\tau)}{t_\tau}. \quad (20)$$

Последнее выражение необходимо для генерации управляющих воздействий на привод оправки с целью регулирования ее угловой скорости при движении точки наматывания в торцевых зонах в процессе формирования композитного изделия. Таким образом, зависимости (13), (14), (16), (19), (20) в сочетании с (5)–(7) позволяют внести необходимые и корректные изменения в алгоритм управления процессом намотки [14, 15] и повысить его эффективность.

Значение длины торцевой зоны H_T оболочки, где происходит реверс раскладчика, согласно (13) и (14) связано с углом геодезического отклонения φ формулой [16]:

$$H_T = \frac{\rho}{\text{tg}\varphi} \left(\frac{1 - \sin\beta}{\sin\beta} \right), \quad \text{tg}\varphi = \frac{\rho}{\text{tg}\varphi} \left(\frac{1 - \sin\beta}{\sin\beta} \right). \quad (21)$$

Длина наматываемого материала D рассчитывается в соответствии с движением раскладчика. Расстояние h , пройденное раскладчиком в регулярной зоне, за время t_1 одного оборота оправки ($t_1 = 2\pi/\omega$ при $\omega = \text{const}$) рассчитывается по формуле (18). Скорость движения раскладчика определяет угол намотки β (рис. 2). Под этим углом β наматываемый материал подается в так называемой регулярной зоне H_p цилиндрической оболочки, где скорость раскладчика постоянна ($V = \text{const}$). Как показано на развертке (рис. 2), длина одного витка намотанных нитей в этой зоне определяется выражением:

$$D_B = \sqrt{(2\pi\rho(\theta))^2 + h^2} = \sqrt{(2\pi\rho(\theta))^2 + \left(\frac{2\pi V}{\omega}\right)^2}. \quad (22)$$

С учетом (22) длина намотанных по спирали нитей в регулярной зоне H_p оправки вычисляется следующим образом

$$\frac{H_p}{h} D_B = \frac{H_p \omega}{2\pi V} \sqrt{(2\pi\rho(\theta))^2 + \left(\frac{2\pi V}{\omega}\right)^2}, \quad (23)$$

где H_p/h — число оборотов, совершаемое оправкой при наматывании в регулярной зоне H_p .

В торцевой зоне H_T , определяемой выражениями (17) и (21), длина наматываемого материала s определяется на основе указанного ранее дифференциального соотношения (12) и соотношения, возникающего в криволинейном треугольнике (рис. 1):

$$dz = ds \cos \beta_T. \quad (24)$$

После подстановки (24) в (12) получим

$$ds = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi \sin^2 \beta_T} d\beta_T. \quad (25)$$

Проинтегрировав, имеем

$$s = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} \int_{\beta}^{\pi/2} \frac{1}{\sin^2 \beta_T} d\beta_T = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} (-\operatorname{ctg} \beta_T) \Big|_{\beta}^{\pi/2} = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} \operatorname{ctg} \beta. \quad (26)$$

С учетом (18) длина нитей (26) в зоне реверса

$$s = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} \frac{V}{\rho \omega} = \frac{V}{\omega \operatorname{tg} \phi}. \quad (27)$$

Сложив (23) и (27), найдем длину материала, наматываемого за один проход раскладчика

$$\lambda_c = \frac{H_p \omega}{2\pi V} \sqrt{(2\pi r(\theta))^2 + \left(\frac{2\pi V}{\omega}\right)^2} + \frac{2V}{\omega \operatorname{tg} \phi}. \quad (28)$$

Вместе с тем необходимо отметить, что для расчета длины намотки, учитывая наличие в устройстве управления [15] датчика оборотов оправки, следует использовать в качестве аргумента число оборотов, совершенных паковкой. В этом случае интегралом для (25) будет следующее выражение:

$$s_T = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} \int_{\beta_T}^{\pi/2} \frac{1}{\sin^2 \beta_T} d\beta_T = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} (-\operatorname{ctg} \beta_T) \Big|_{\beta_T}^{\pi/2} = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} \operatorname{ctg} \beta_T, \quad (29)$$

или, принимая во внимание (16), представим (29) в виде

$$s_T = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} \operatorname{ctg} \beta_T(\theta_r), \quad (30)$$

где $\theta_r(\theta)$.

Последовательно складывая элементы длины материала, полученные согласно (23) или (30), рассчитаем ее совокупное значение:

$$D_k = D_{k-1} + \begin{cases} \frac{\rho}{\operatorname{tg} \phi} (\operatorname{ctg} \beta_T(\theta) + C_{\Delta\beta_T}), & \text{если точка наматывания} \\ & \text{в торцевой зоне,} \\ 2\pi \Delta\theta \sqrt{(2\pi r(\theta))^2 + \left(\frac{2\pi V}{\omega}\right)^2}, & \text{если в регулярной зоне,} \end{cases} \quad (31)$$

где $\Delta\theta$ — приращение с момента расчета предпоследнего значения D_{k-1} длины намотанного материала; $\Delta\beta_T$ — приращение β_T ; $C_{\Delta\beta_T}$ — постоянная интегрирования (25), определяемая величиной приращения угла намотки; $r(\theta)$ считаем постоянной величиной при движении раскладчика материала (нитей) до смены направления.

С помощью (31), где $D(\rho) = D_k$, и (28) согласно (1), рассчитывается плотность $\gamma(\theta)$ намотки.

Как показывает анализ выражения (1), для формирования композитной намотки с равными технологическими параметрами (радиус, длина, плотность) необходимо поддерживать фактическую скорость перемещения точки наматывания, равной теоретической. Практически это означает, что нужно поддерживать фактический радиус формируемой намотки, равный теоретическому, на каждом текущем значении угла поворота θ оправки. Величину отклонения фактического радиуса намотки от теоретического радиуса при данном значении угла поворота следует использовать для построения системы управления процессом формирования намотки. Необходимо воздействовать на намотку с переменным усилием [12–14], адекватно реагируя на все случайные возмущения и обеспечивая равенство между фактическим и теоретическим радиусами намотки.

Проектирование устройства управления

Для реализации заявленного метода спроектировано устройство управления (рис. 3). Устройство включает в себя: датчик оборотов оправки 1; датчик радиуса намотки 2; блок управления формированием намотки 3; цифро-аналоговый преобразователь 4; устройство согласования 5; электромагнитную муфту 6; уплотняющий орган 7; оправку 8. В запоминающее устройство блока 3 заносятся постоянные величины: значения радиуса r_0 и ширины H оправки, значение r_{nom} номинального теоретического приращения радиуса намотки.

На основе исходных данных рассчитывается отношение $m/(\pi H)$, используемое в уравнении (1). Найденное значение вводится в оперативное запоминающее устройство блока 3. Кроме того, блок 3 рассчитывает конечное число оборотов оправки n_k и количество оборотов K_2 оправки, через которые прижимной ролик должен переместиться на величину, равную r_{nom} .

В качестве блока управления 3 могут использоваться любые промышленные контроллеры, совместимые с персональным компьютером, например, контроллеры серии ADAM-5000, выпускаемые фирмой Advantech, или аналогичные контроллеры других производителей. Во время наматывания с помощью датчиков измеряется фактический радиус намотки, величина которого записывается в ячейку памяти вычислительного устройства. Через заданное количество оборотов оправки производится расчет теоретического радиуса намотки в соответствии с математической моделью. Когда вычислительное устройство подсчитывает заданное

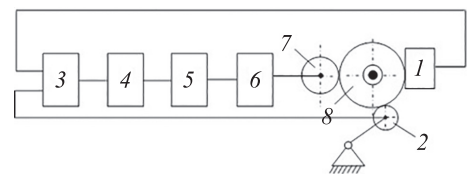


Рис. 3. Структурная схема устройства управления процессом

количество оборотов оправки, уплотняющий орган находится в фиксированном положении (не отводится), что позволяет быстро добиться цилиндричности намотки. После подсчета заданного количества оборотов оправки и расчета теоретического радиуса намотки его значение сравнивается с фактическим радиусом. Информация, полученная в результате сравнения, позволяет вычислительному устройству определить величину отвода уплотняющего органа наматывающей установки и выдать сигнал исполнительному механизму для принудительного отвода с тем, чтобы обеспечить равенство между указанными радиусами. Когда количество оборотов оправки достигнет конечного заданного значения n_k , процесс наматывания завершается.

Для моделирования процесса управления плотностью композитной намотки использовался пакет при-

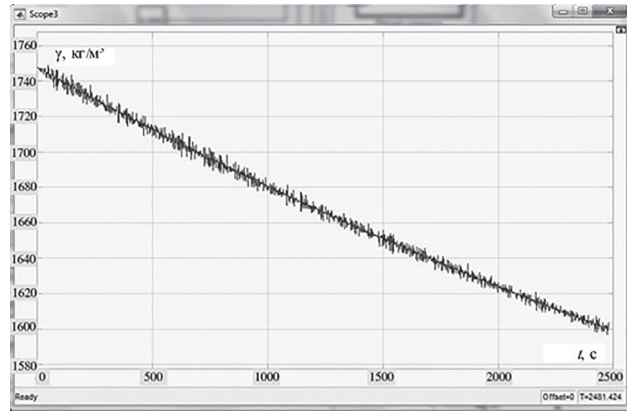


Рис. 5. Изменение плотности намотки в процессе намотки

кладных программ MATLAB. Приложение MATLAB позволяет анализировать производительность устройства и данные на каждом его отдельном узле. На рис. 4 показана модель процесса управления, построенная в Simulink. Результаты моделирования показаны на рис. 5 [15]. Показано изменение фактической плотности намотки в процессе наматывания.

Заключение

Предложено достаточно эффективное решение для управления плотностью композитной намотки с целью стабилизации напряженно-деформированного состояния цилиндрических композитных изделий за счет изменения радиального приращения слоев намотки и предотвращения действия случайных факторов. Его эффективность обусловлена принципом прямого воздействия уплотняющим органом на тело намотки и низкой стоимостью системы управления в отличие от других предложений в этой области [4–7, 12, 13, 18–23].

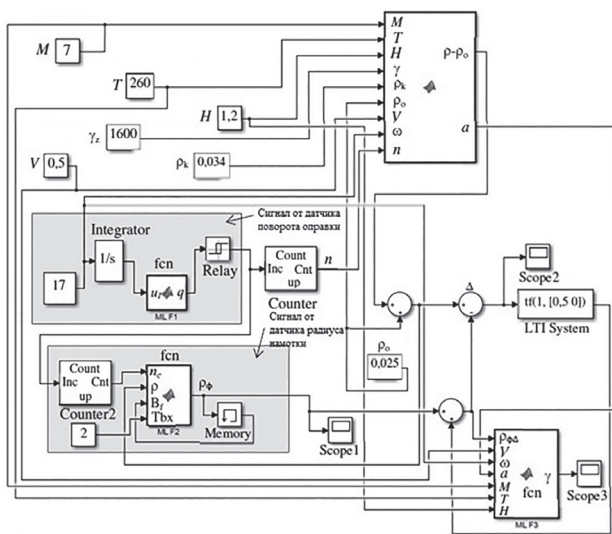


Рис. 4. Динамическая модель процесса управления

Литература

1. Quagliano Amado J.C. Manufacture and testing of lightweight tubes for rocketry and centrifuges // *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*. 2016. P. 421–437. doi: 10.1016/B978-1-78242-325-6.00017-7
2. Shi Y.Y., Tang H., Yu Q. Key technology of the NC tape-winding machine // *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. 2008. V. 29. N 1. P. 233–239.
3. Li Z. Tension control system design of a filament winding structure based on fuzzy neural network // *Engineering Review*. 2015. V. 35. N 1. P. 9–17.
4. Zhang H., Tang H., Shi Y. Precision tension control technology of composite fiber tape winding molding // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2018. V. 31. N 7. P. 925–945. doi: 10.1177/0892705717729018
5. Srivastava S., Shariqul H. A brief theory on latest trend of filament winding machine // *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*. 2016. V. 3. N 4. P. 33–38.
6. Ren S.-L., Lai Y.-N., Wang Y.-Z., Hua L. A new fiber winding precision tension control system // *Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL 2009)*. Shenyang, China, 2009. P. 233–236. doi: 10.1109/ICAL.2009.5262921
7. Мусалимов В.М., Монахов Ю.С., Кутин А.Ю., Соловьева Г.А. Моделирование процесса наматывания нитей на жесткий цилиндр // *Известия вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 8. С. 657–663. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-657-663

References

1. Quagliano Amado J.C. Manufacture and testing of lightweight tubes for rocketry and centrifuges. *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*, 2016, pp. 421–437. doi: 10.1016/B978-1-78242-325-6.00017-7
2. Shi Y.Y., Tang H., Yu Q. Key technology of the NC tape-winding machine. *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, vol. 29, no. 1, pp. 233–239.
3. Li Z. Tension control system design of a filament winding structure based on fuzzy neural network. *Engineering Review*, 2015, vol. 35, no. 1, pp. 9–17.
4. Zhang H., Tang H., Shi Y. Precision tension control technology of composite fiber tape winding molding. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018, vol. 31, no. 7, pp. 925–945. doi: 10.1177/0892705717729018
5. Srivastava S., Shariqul H. A brief theory on latest trend of filament winding machine. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 33–38.
6. Ren S.-L., Lai Y.-N., Wang Y.-Z., Hua L. A new fiber winding precision tension control system. *Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL 2009)*, Shenyang, China, 2009, pp. 233–236. doi: 10.1109/ICAL.2009.5262921
7. Musalimov V.M., Monakhov Yu.S., Kutin A.Yu., Solovieva G.A. Modeling of the process of winding threads on a rigid cylinder. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 657–663. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-657-663

8. Lü H., Schlottermüller M., Himmel N., Schledjewski R. Effects of tape tension on residual stress in thermoplastic composite filament winding // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2005. V. 18. N 6. P. 469–487. doi: 10.1177/0892705705054409
9. Образцов И.Ф., Булычев Л.А., Васильев В.В. и др. Строительная механика летательных аппаратов: учебник для авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
10. Thwaits J.J. The elastic deformation of a rod with helical anisotropy // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1977. V. 19. N 3. P. 161–168. doi: 10.1016/0020-7403(77)90075-3
11. Mostafa N.H., Ismarrubie Z.N., Sapuan S.M., Sultan M.T.H. Fibre prestressed composites: theoretical and numerical modelling of unidirectional and plain-weave fibre reinforcement forms // *Composite Structures*. 2017. V. 159. P. 410–423. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.090
12. Hashimoto H. Intelligent winding machine of plastic films for preventing both wrinkles and slippages // *Modern Mechanical Engineering*. 2016. V. 6. N 1. P. 20–31. doi: 10.4236/mme.2016.61003
13. Hashimoto H., Jeenkour P., Mongkolowongroj M. Optimum winding tension and nip-load into wound webs for protecting wrinkles and slippage // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2010. V. 4. N 1. P. 214–225. doi: 10.1299/jamdsm.4.214
14. Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture // *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2019)*. 2019. P. 332–336. doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722860
15. Кутын А.Ю., Мусалимов В.М., Поляков А.С. Проектирование композитной намотки и управление процессом ее формирования // *Известия вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61. № 2. С. 160–166. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166
16. Кутын А.Ю. Оценка погрешности при определении длины текстильного материала // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2004. № 2. С. 117–118.
17. Комков М.А., Тарасов В.А., Бородулин А.С. Спиральная намотка концевых участков композитных оболочек цилиндрической и конической формы // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Серия Машиностроение*. 2012. N 4. P. 78–85.
18. Mutasher S., Mir-Nasari N., Lin L.C. Small-scale filament winding machine for producing fiber composite products // *Journal of Engineering Science and Technology*. 2012. V. 7. N 2. P. 156–168.
19. Zhong W., Yang H., Li H., Xu J. Control system design of robotized filament winding for elbow pipe // *Proc. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013)*. 2013. V. 2. P. 1081–1085. doi: 10.1109/MIC.2013.6758147
20. Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Merzuki M.N.M. Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018. V. 5. N 12. P. 1668–1675.
21. Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Del Sette F. Manufacture of high performance isogrid structure by robotic filament winding // *Composite Structures*. 2017. V. 164. P. 43–50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061
22. Musalimov V., Aryassov G., Zhigailov S., Rõbak D., Penkov I. Motion imitation of the human pelvic and hip joints // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 2029. P. 020046. doi: 10.1063/1.5066508
23. Zhigailov S., Musalimov V., Aryassov G., Penkov I. Modelling and simulation of human lower-limb motion // *International Review on Modelling and Simulations*. 2016. V. 9. N 2. P. 114–123. doi: 10.15866/iremos.v9i2.8358
8. Lü H., Schlottermüller M., Himmel N., Schledjewski R. Effects of tape tension on residual stress in thermoplastic composite filament winding. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2005, vol. 18, no. 6, pp. 469–487. doi: 10.1177/0892705705054409
9. Obratcov I.F., Bulychev L.A., Vasilev V.V. et al. *Structural Mechanics of Aircraft*. Tutorial. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 536 p. (in Russian)
10. Thwaits J.J. The elastic deformation of a rod with helical anisotropy. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1977, vol. 19, no. 3, pp. 161–168. doi: 10.1016/0020-7403(77)90075-3
11. Mostafa N.H., Ismarrubie Z.N., Sapuan S.M., Sultan M.T.H. Fibre prestressed composites: theoretical and numerical modelling of unidirectional and plain-weave fibre reinforcement forms. *Composite Structures*, 2017, vol. 159, pp. 410–423. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.090
12. Hashimoto H. Intelligent winding machine of plastic films for preventing both wrinkles and slippages. *Modern Mechanical Engineering*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 20–31. doi: 10.4236/mme.2016.61003
13. Hashimoto H., Jeenkour P., Mongkolowongroj M. Optimum winding tension and nip-load into wound webs for protecting wrinkles and slippage. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 214–225. doi: 10.1299/jamdsm.4.214
14. Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture. *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2019)*, 2019, pp. 332–336. doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722860
15. 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, no. 2, pp. 160–166. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166
16. Kut' in A.Yu. Assessing the error when determining a length of textile material. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil' noi Promyshlennosti*, 2004, no. 2, pp. 117–118. (in Russian)
17. Komkov M., Tarasov V., Borodulin A. Spiral winding of ends of composite shells with cylindrical and conical shapes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 4, pp. 78–85. (in Russian)
18. Mutasher S., Mir-Nasari N., Lin L.C. Small-scale filament winding machine for producing fiber composite products. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 156–168.
19. Zhong W., Yang H., Li H., Xu J. Control system design of robotized filament winding for elbow pipe. *Proc. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013)*, 2013, vol. 2, pp. 1081–1085. doi: 10.1109/MIC.2013.6758147
20. Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Merzuki M.N.M. Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 1668–1675.
21. Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Del Sette F. Manufacture of high performance isogrid structure by robotic filament winding. *Composite Structures*, 2017, vol. 164, pp. 43–50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061
22. Musalimov V., Aryassov G., Zhigailov S., Rõbak D., Penkov I. Motion imitation of the human pelvic and hip joints. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2029, pp. 020046. doi: 10.1063/1.5066508
23. Zhigailov S., Musalimov V., Aryassov G., Penkov I. Modelling and simulation of human lower-limb motion. *International Review on Modelling and Simulations*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 114–123. doi: 10.15866/iremos.v9i2.8358

Авторы

Кутын Алексей Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, программист, ООО «ВП Петро Ин Трейд», Санкт-Петербург, 194295, Российская Федерация, Scopus ID: 7004603952, ORCID ID: 0000-0002-7714-3259, kutin_alex@mail.ru

Арясов Геннадий Петрович — кандидат технических наук, профессор, Таллинский технический Университет, Таллин, 19086, Эстония, Scopus ID: 56178700200, gennadi.arjassov@taltech.ee

Authors

Aleksey Yu. Kutin — PhD, Associate Professor, Software Engineer, VP Petro In Treid, LLC, Saint Petersburg, 194295, Russian Federation, Scopus ID: 7004603952, ORCID ID: 0000-0002-7714-3259, kutin_alex@mail.ru

Gennady P. Aryasov — PhD, Professor, Tallinn University of Technology, Tallinn, 19086, Estonia, Scopus ID: 56178700200, gennadi.arjassov@taltech.ee