

Научная статья

УДК 67.02

DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-4-5-16

Моделирование и программирование процесса спиральной намотки с использованием робота-манипулятора

Алексей Васильевич Гирн¹
Алексей Сергеевич Калашников²
Яков Юрьевич Пикалов³

Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева
Красноярск, Россия

¹girn@sibsau.ru

²fangy.ko@gmail.com

³yapibest@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена решению актуальной задачи изготовления изделий из углепластиковых композиционных материалов, которые получают в результате послойной выкладки углеродного волокна с пропиткой их связующим компонентом. В работе описаны процесс спиральной намотки изделий на цилиндрической оправке и соответствующая математическая модель, которая учитывает коэффициент трения и необходимые зоны реверса, в которых не происходит соскальзывания ленты. Модель реализована в виде программы на языке Python и способна моделировать и визуализировать пошаговую намотку углеродной ленты на цилиндрическую поверхность. Есть возможность оптимизации коэффициента трения для обеспечения максимально плотной намотки последующих проходов. В программе учтены зоны реверса, которые вычисляются с учетом коэффициента трения цилиндрической оправки. По смоделированному процессу намотки генерируется управляющая программа для робота-манипулятора. Работоспособность предложенной модели и ее реализации были апробированы на тестовом стенде с роботом.

Ключевые слова

намотка углеродного волокна, намотка цилиндрических деталей, моделирование процесса намотки, роботизированная намотка, композитные материалы

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госконтракт № FEFE-2020-0017).

Для цитирования

Гирн А. В., Калашников А. С., Пикалов Я. Ю. Моделирование и программирование процесса спиральной намотки с использованием робота-манипулятора // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21, № 4. С. 5–16. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-4-5-16

© Гирн А. В., Калашников А. С., Пикалов Я. Ю., 2023

Modeling and Programming of a Spiral Winding Cycle Using a Robotic Arm

Alexey V. Girn¹, Alexey S. Kalashnikov²,
Yakov Yu. Pikalov³

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Reshetnev University
Krasnoyarsk, Russian Federation

¹girn@sibsau.ru

²fangy.ko@gmail.com

³yapibest@mail.ru

Abstract

This article is devoted to solving the problem of manufacturing products from carbon fiber composite materials, which are obtained as a result of layer-by-layer laying of carbon fiber with impregnation of their binder components. This paper presents a description of the process of spiral winding of products on a cylindrical mandrel and the mathematical model, which takes into account the coefficient of friction and the necessary reverse zones in which the tape will not slip. The model is implemented as a Python program and is capable of simulating and visualizing the step-by-step winding of a carbon tape on a cylindrical surface. It is possible to optimize the friction coefficient to ensure the tightest winding of subsequent passes. The program takes into account reverse zones, which are calculated taking into account the friction coefficient of the cylindrical mandrel. Based on the simulated winding process, a control program for the robotic arm is generated. The performance of the proposed model and its implementation was tested on a test bench with a robot.

Keywords

carbon fiber winding, cylindrical part winding, winding process modeling, robotic winding, composite materials

Funding

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Contract № FEFE-2020-0017).

For citation

Girn A. V., Kalashnikov A. S., Pikalov Y. Y. Modeling and programming of a spiral winding cycle using a robotic arm. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 5–16 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-4-5-16

Введение

В космической отрасли в качестве несущих конструкций широко применяются изделия из углепластиковых композиционных материалов. Один из основных методов изготовления композитных оболочек – это намотка. Универсальный метод изготовления композитных конструкций повторяющимися витками нитей или лент в непрерывном автоматизированном режиме. Методом намотки можно получить любую выпуклую форму изделия, при условии, что намотку осуществляют с натяжением наматываемого материала.

Процесс намотки изделий является достаточно сложным в реализации и содержит целый комплекс проблем. Например, в [1] авторы решают проблемы неравномерности уплотнения композитного препрега на поверхности изделия. Как недостаточное уплотнение, так и переуплотнение, связанное с подачей уплотняющего катка, может привести к дефектам намоточных сопел. В статье [2] решаются вопросы, связанные с обеспечением оптимальных режимов работы лазера, нагревающего препрег до требуемой температуры. В статье [3] рассмотрена навивка цилиндрической и эллипсоидальной (купольной) части сосуда под давлением с участками различной кривизны оснастки. Модель управления мощностью лазера для равномерного управления температурой на поверхности. Предложенная методология оптимизации регулирует температуру в пределах отклонения 1,5 °С от желаемого значения. Работа [4] демонстрирует математическую модель для генерации управляющей программы, которая формируется для изготовления конкретного изделия. Модель учитывает кинематические особенности стан-

ка и позволяет производить оценку влияния различных возмущающих факторов метода намотки, на результат отработки управляющих программ. В статье [5] 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 целью повышения стабилизации натяжения слоев намотки и плотности авторы работы [6] предлагают систему управления геометрическими параметрами композитной намотки и ее плотностью. Для оптимального режима наматывания нитей авторы [7] рассматривают модель, учитывающую взаимосвязь модуля упругости и коэффициента Пуассона спирально-анизотропных материалов, физико-механические и кинематические параметры нити и системы намотки. В статье [8] изучены вопросы кинематики намотки концевых участков композитных цилиндрических и конических оболочек и получены зависимости, определяющие геометрические размеры и кинематические параметры спиральной намотки в зоне концевых участков оболочек

Таким образом, для успешной реализации процесса намотки изделий необходимо разработать математическую модель, от качества которой зависит точность прогнозируемого результата в конечном изделии.

Математическое моделирование и алгоритмизация

Данная статья описывает решение вопросов, связанных с моделированием процесса намотки цилиндрических стекло- и углепластиковых изделий с использованием робота-манипулятора.

Намотку цилиндрических изделий осуществляют за счет комбинации вращательного движения жесткой оправки и прямолинейного возвратно-поступательного движения исполнительного устройства, подающего ленту или нить препрега. Для обеспечения постоянной толщины и регулярной структуры стенки трубы на всей длине оправку изготавливают увеличенной длины для формирования участков разворота наматываемой ленты при ее обратном проходе (зона реверса). На конечном изделии данная зона удаляется и остается рабочий участок трубы с регулярной и однородной намоткой по всей поверхности.

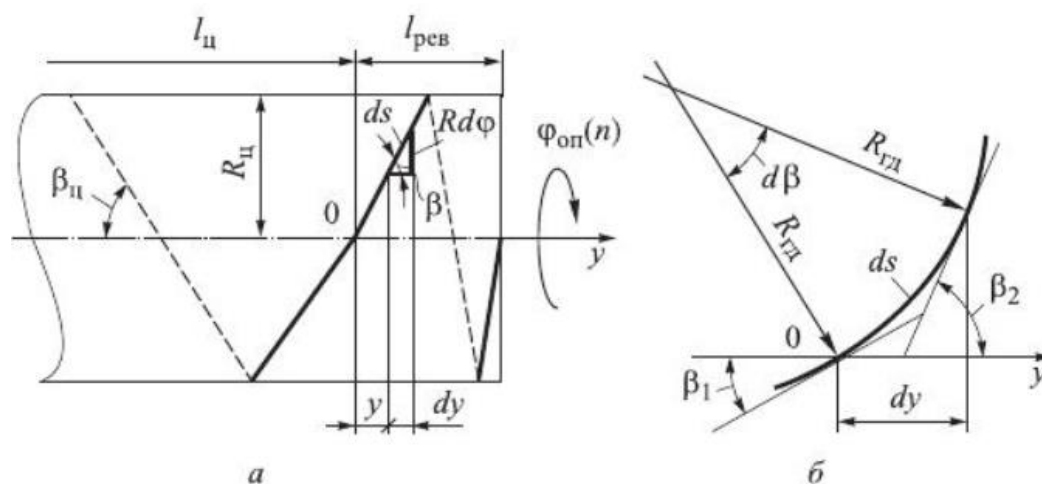


Рис. 1. Схема намотки с реверсом укладчика ленты
Fig. 1. Winding scheme with reverse of the tape stacker

В зоне реверса укладчика происходит изменение угла намотки ленты относительно оси вращения и направления перемещения исполнительного устройства, что приводит к из-

менению углов намотки цилиндра от расчетного значения угла $\beta_{\text{ц}}$ до предельного значения $\beta = \beta(y) = \pi / 2$. Связь текущего значения угла наклона β к оси вращения цилиндра, длины зоны реверса $l_{\text{рев}}$ и угла поворота оправки $\varphi_{\text{рев}}$ определяется следующим уравнением (рис. 1, а) [8]:

$$d\varphi(y) = \operatorname{tg} \beta(y) dy / R_y, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{оп}}$ – угол вращения оправки; y – линейное перемещение суппорта; β – текущий угол намотки.

Зависимость, описывающая изменение угла намотки β на длине реверса ленты:

$$\frac{1}{\sin \beta} = \frac{1}{\sin \beta_y} - y \frac{\operatorname{tg} \theta}{R_y}. \quad (2)$$

Для определения полной длины реверса ленты принимается $y = l_{\text{рев}}$, а $\beta = \pi/2$, подставив данные значения в (2), получим:

$$l_{\text{рев}} = \frac{R_y (1 - \sin \beta_y)}{\operatorname{tg} \theta \sin \beta_y} = \frac{R_y (1 - \sin \beta_y)}{f \sin \beta_y}. \quad (3)$$

При полном реверсе ленты от угла $\beta = \beta_y$ до $\beta = \pi/2$ оправка соответственно повернется на угол

$$\varphi_{\text{рев}} = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \ln \frac{\sin \beta_y}{1 - \cos \beta_y} = \frac{1}{f} \ln \frac{\sin \beta_y}{1 - \cos \beta_y}. \quad (4)$$

Оптимальной намоткой является укладка следующего прохода встык или с небольшим наложением, но практическая реализация идеальной геодезической намотки – задача трудно-выполнимая. Причинами этого являются погрешности технологической системы СПОН (станок – приспособление – оправка – нить).

Допустимое отклонение от геодезической линии определяется тангенсом угла трения θ , максимальное значение которого не может превышать коэффициент трения f между нитью и поверхностью оправки. Он зависит от натяжения нитей, вида армирующих волокон, состояния связующего, свойств материала поверхности оправки и в каждом конкретном случае определяется экспериментально.

Из выражения (3) следует, что чем меньше коэффициент трения f , тем зона реверса больше, чтобы армирующий материал не сползал с рассчитанных траекторий в процессе намотки, и наоборот – с высоким коэффициентом трения требуется меньшая зона реверса. Следовательно, определив коэффициент трения экспериментально, можно рассчитать кинематические параметры и произвести намотку. Для проведения экспериментальных исследований необходимо разработать математическую модель намотки и реализовать ее в виде управляющей программы на языке программирования Python.

Задав условия намотки, можно получить и визуализировать траекторию процесса. Модель не учитывает взаимодействия волокна с оснасткой и волокна с волокном. Тем не менее это позволяет оценить точность математических выкладок и в дальнейшем определить, с какими параметрами осуществлять намотку непропитанного армирующего волокна.

На рис. 2 представлены развертки намоток (4 прохода) с одинаковыми условиями: угол намотки, длина требуемого изделия (без реверсов), диаметр оснастки, ширина волокна, но с разными коэффициентами трения, равными: а) 0,2; б) 0,22; в) 0,215.

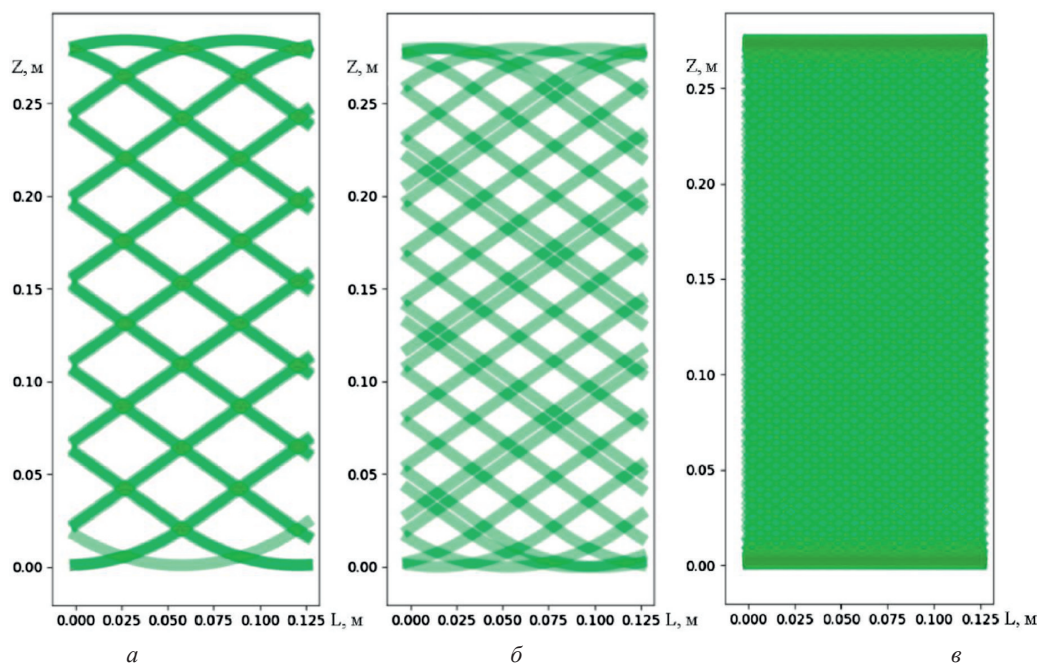


Рис. 2. Симуляции намотки с разными коэффициентами f : а) два прохода $f=0,2$;
 б) два прохода $f=0,22$; в) готовое изделие $f=0,215$
 Fig. 2. Winding simulations with different f coefficients: а) two passes $f=0.2$;
 б) two passes $f=0.22$; в) finished product $f=0.215$

Из проведенных расчетов следует, что изменение коэффициента f , а значит и зоны реверса, в значительной степени влияет на узор намотки. Аналогично при одном коэффициенте f , но разных прочих условиях намотки узор будет различным.

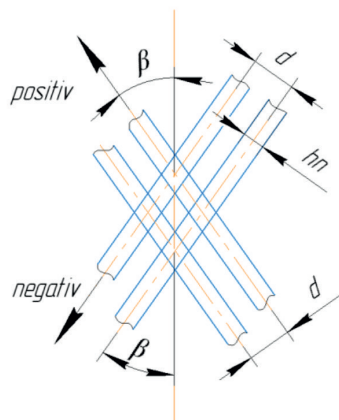


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поиска оптимального коэффициента f
 Fig. 3. Block diagram of the algorithm for finding the optimal coefficient f

Для определения оптимальных параметров коэффициента трения прочие (диаметр и длина изделия, толщина нити) считаются постоянными и зафиксированными. Поиск оптимального коэффициента реализован программно – для каждого коэффициента рассчитывается зона реверса и производится расчет двух проходов намотки, в котором определяется расстояние между витками намотки d в одинаковых направлениях в середине изделия (рис. 3).

В случае когда это расстояние меньше или равно допустимому значению, оптимальное значение коэффициента трения считается найденным. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.

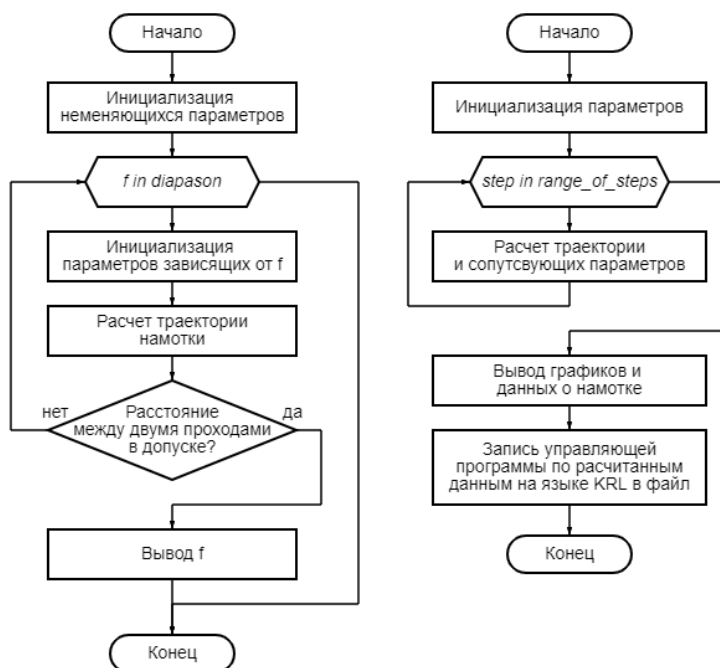


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска оптимального коэффициента f
Fig. 4. Block diagram of the algorithm for finding the optimal coefficient f

Найденный коэффициент трения обеспечивает оптимальную намотку, если реальный коэффициент трения равен или больше его. Тем не менее данный алгоритм позволяет упростить поиск оптимальной намотки, что важно при проектировании изготовления новых конструкций.

После определения оптимальных параметров процесса намотки вычисляются координаты точек траектории катушки и составляется управляющая программа для робота. Управляющая программа содержит вспомогательную информацию для оператора: длина волокна, размер намотки с зонами реверсов, толщина намотки. Графики сгенерированной траектории в пространстве представлены на рис. 5.

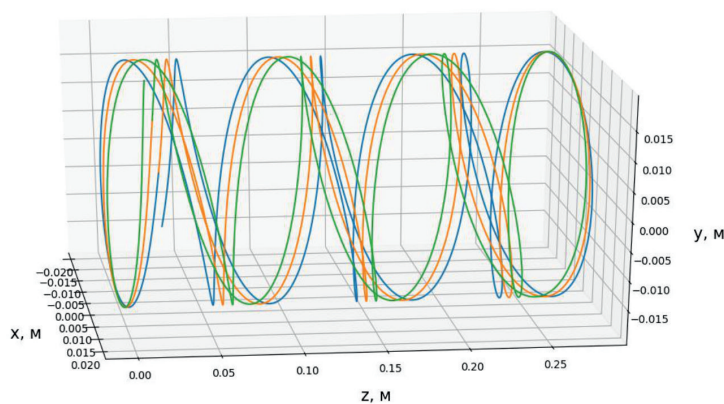


Рис. 5. Форма намотки, состоящая из трех проходов
Fig. 5. Three-pass winding form

Блок-схема алгоритма расчета намотки представлена на рис. 6.

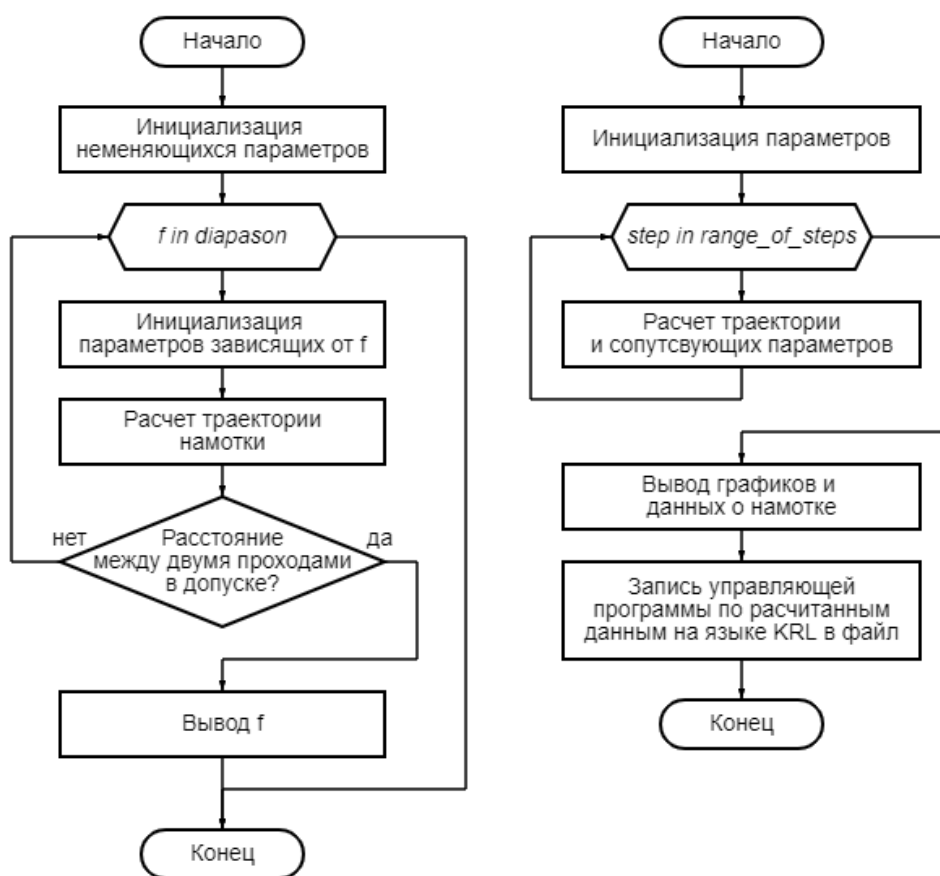


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета намотки
Fig. 6. Block diagram of the winding calculation algorithm

Симуляция предполагает, что подаваемое инструментом волокно сразу соприкасается с поверхностью оснастки, но при намотке необходимо обеспечить вылет нити из инструмента для предотвращения брака.

Точность изготовления характеризуется соответствием между получаемыми и проектируемыми размерами. При реализации процесса намотки необходимо дополнительно обеспечить безопасную дистанцию между устройством подачи армирующего волокна и оснасткой.

Для выполнения этого условия следует произвести корректировку управляющей программы, устройство подачи должно опережать расчетную координату на величину $h \cdot \text{ctg}(\beta)$.

Результаты моделирования

Таким образом, графики перемещения по оси Z без опережения и с опережением будут иметь вид, как на рис. 7.

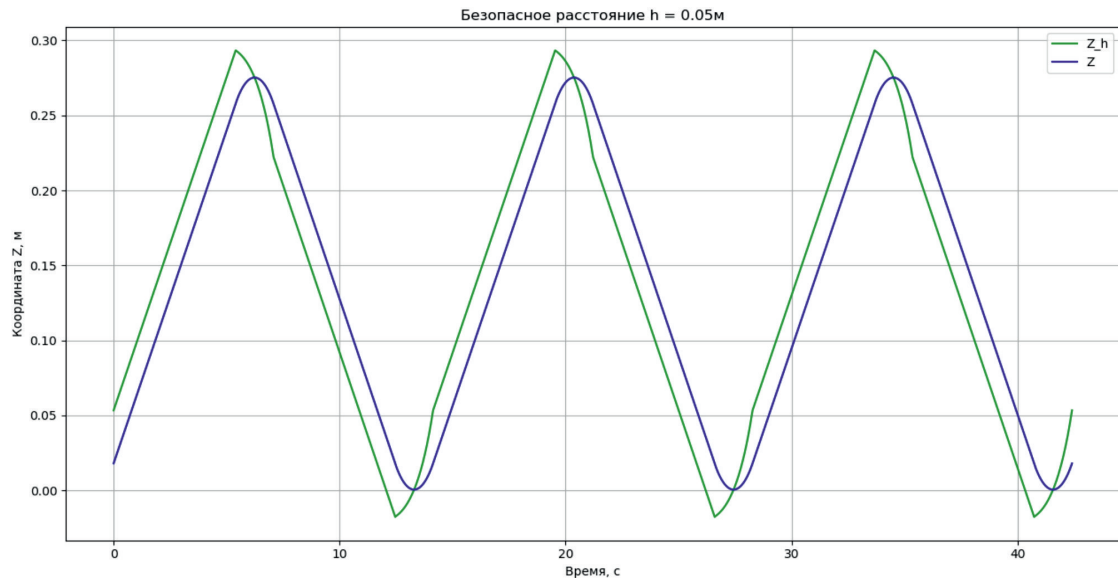


Рис. 7. Графики изменения координаты Z со временем:

Z – без опережения; Z_h – с опережением

Fig. 7. Graphs of changes in Z coordinate over time:

Z – without advance; Z_h – ahead

Графики скорости перемещения исполнительного устройства без опережения и с опережением будут иметь вид, как на рис. 8.

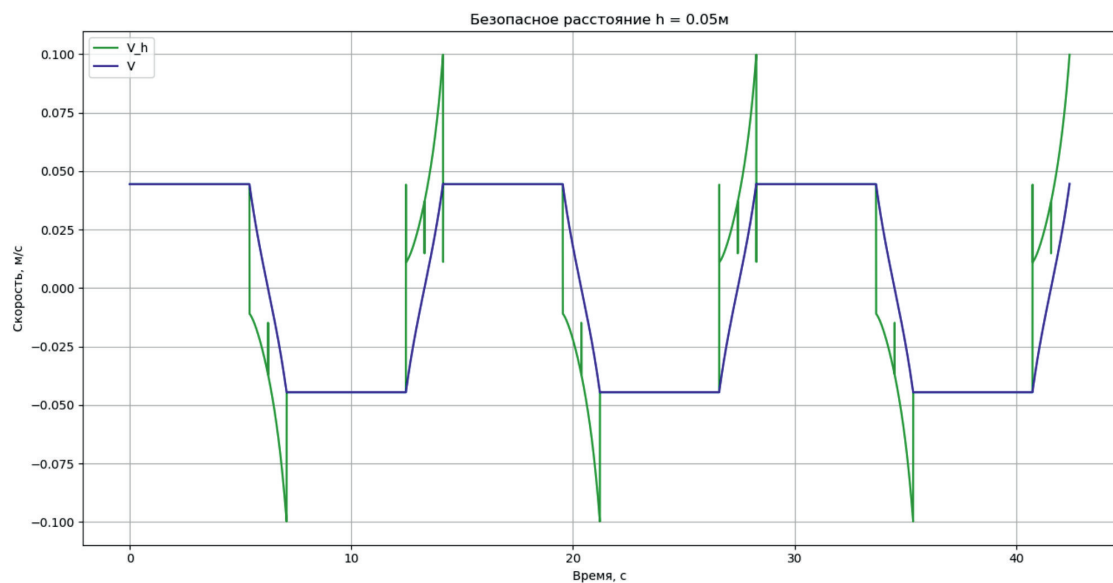


Рис. 8. Графики скорости перемещения со временем:

V – без опережения; V_h – с опережением

Fig. 8. Graphs of movement speed over time:

V – without advance; V_h – ahead

Так как в зоне реверса перемещение в каждую расчетную точку происходит с переменной скоростью, то система управления роботом не может выполнить плавные перемещения. Одна-

ко в зоне реверса высокой точности перемещения не требуется, так как в дальнейшем она подлежит удалению. В этой связи в управляющей программе указывается усредненная скорость для участков реверса (рис. 9).

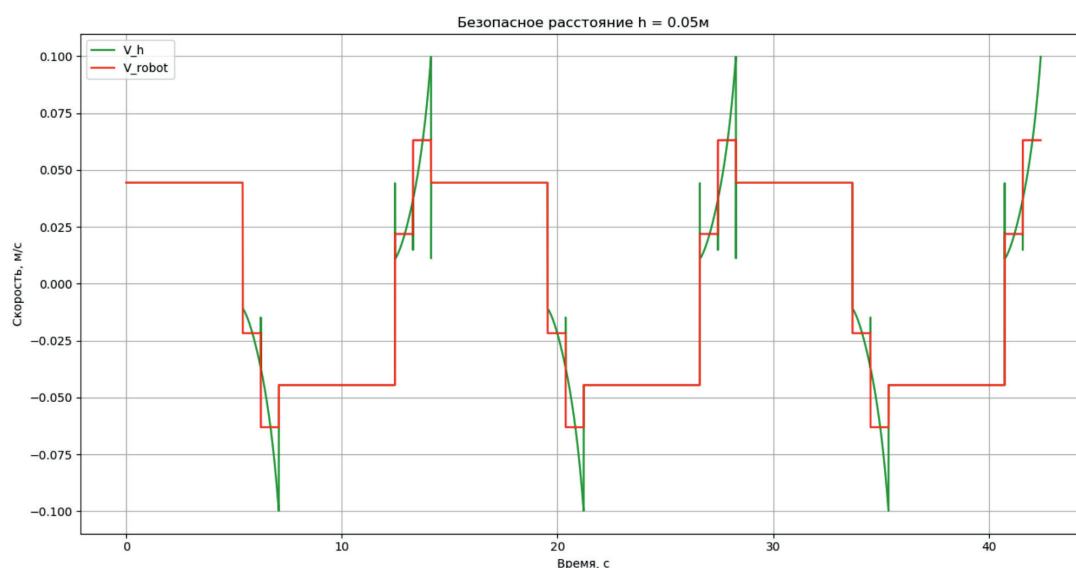


Рис. 9. Графики скорости перемещения со временем:
 V_h – с опережением; V_{robot} – для управления роботом-манипулятором

Fig. 9. Graphs of movement speed over time:
 V_h – forward; V_{robot} – for controlling the robotic manipulator

В ключевые точки робот-манипулятор приходит за тот же промежуток времени, что достаточно для обеспечения расчетной намотки (рис. 10).

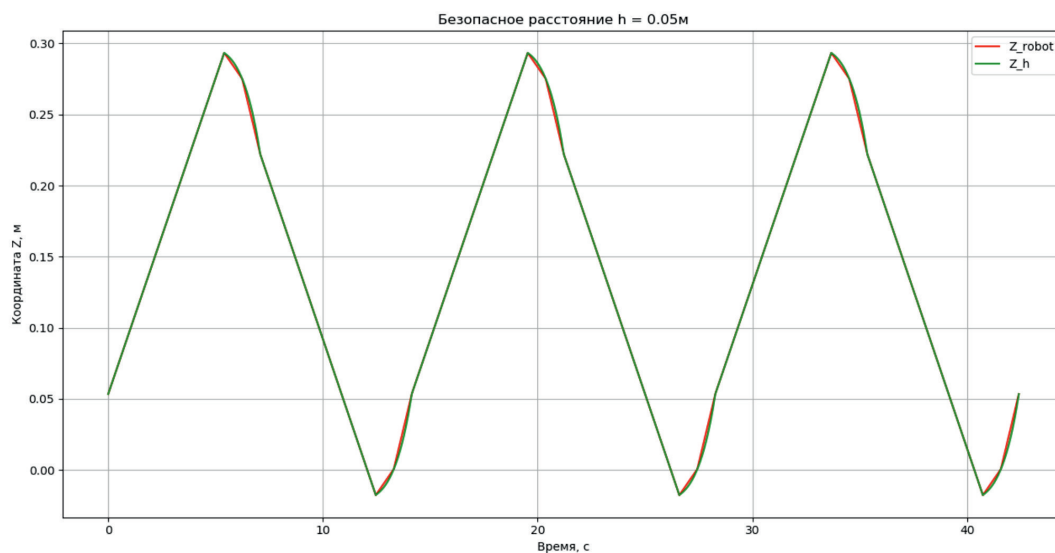


Рис. 10. Графики изменения координаты Z и скорости перемещения со временем:
 Z_h – с опережением; Z_{robot} – для управления роботом-манипулятором

Fig. 10. Graphs of changes in Z coordinate and movement speed over time:
 Z_h – forward; Z_{robot} – for controlling the robotic manipulator

Для подтверждения работоспособности математической модели и разработанной программы был смоделирован процесс полной намотки трубы с учетом ширины композитной ленты. Кроме того, процесс намотки по полученной управляющей программе был реализован на роботе. Ниже приведен фрагмент управляющей программы намотки на роботе:

```

...
$VEL.CP=0.0711
SLIN {Z 692.915, B 35.3} C_DIS
$VEL.CP=0.0711
SLIN {Z 1692.884, B 35.3} C_DIS
$VEL.CP=0.0116
SLIN {Z 1704.303, B -0.0} C_DIS
$VEL.CP=0.0547
SLIN {Z 1650.277, B -35.3} C_DIS
$VEL.CP=0.0711
SLIN {Z 650.344, B -35.3} C_DIS
$VEL.CP=0.0115
SLIN {Z 638.946, B 0.0} C_DIS
$VEL.CP=0.0547
SLIN {Z 692.971, B 35.3} C_DIS
$VEL.CP=0.0711
SLIN {Z 1692.806, B 35.3} C_DIS
$VEL.CP=0.0116
...

```

На рис. 11, а показано устройство натяжения нити, на рис. 11, б – процесс намотки стекловолоконной ленты, на рис. 11, в – готовое изделие.

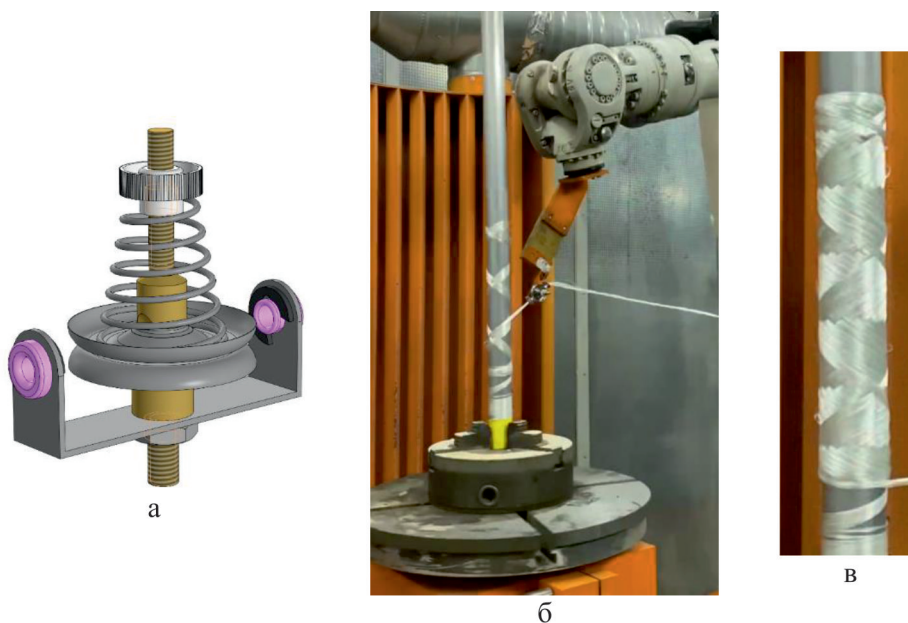


Рис. 11. Экспериментальная проверка математической модели
Fig. 11. Experimental verification of a mathematical model

Заключение

Таким образом, была подтверждена работоспособность математической модели процесса спиральной намотки, реализованной в программе для моделирования и генерации управляющей программы для робота. Математическая модель позволяет проводить оптимизацию по коэффициенту трения, обеспечивая необходимую регулярность профиля выкладки углеволокна на цилиндрической оправке.

В дальнейших исследованиях авторы предполагают учесть в математической модели неравномерность коэффициента трения по поверхности оснастки, а также постепенное увеличение радиуса изделия в процессе формирования. Экспериментальный стенд планируется оснастить силомоментными датчиками и системами технического зрения для оперативного контроля и корректировки параметров намотки.

Список источников

1. **He X., Shi Y., Kang C., Yu T.** Analysis and control of the compaction force in the composite prepreg tape winding process for rocket motor nozzles // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2016. № 7. С. 1–10. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.07.004
2. **Hosseini S. M. A., Schäkel M., Baran I., Janssen H., Van Drongelen M.** A new global kinematic-optical-thermal process model for laser-assisted tape winding with an application to helical-wound pressure vessel // *Materials & Design*. 2020. Vol. 193. P. 108854. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108854
3. **Zaami A., Baran I., Bor T.C., Akkerman R.** New process optimization framework for laser assisted tape winding of composite pressure vessels: Controlling the unsteady bonding temperature // *Materials & Design*. 2020. Vol. 196. A. 109130. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109130
4. **Устинова Е. С.** Моделирование намотки композитных конструкций // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2018. № 3. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-27-33
5. **Кутьин 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: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-2895
6. **Кутьин А. Ю., Мусалимов В. М., Поляков А. С.** Проектирование композитной намотки и управление процессом ее формирования // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2018. Т. 61(2). С. 160–166. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166
7. **Мусалимов В. М., Монахов Ю. С., Кутьин А. Ю., Соловьева Г. А.** Моделирование процесса наматывания нитей на жесткий цилиндр // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59(8). С. 657–663. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-657-663
8. **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. С. 78–85.

References

1. **He X., Shi Y., Kang C., Yu T.** Analysis and control of the compaction force in the composite prepreg tape winding process for rocket motor nozzles. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, № 7, pp. 1–10. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.07.004
2. **Hosseini S. M. A., Schäkel M., Baran I., Janssen H., Van Drongelen M.** A new global kinematic-optical-thermal process model for laser-assisted tape winding with an application to

- helical-wound pressure vessel. *Materials & Design*, 2020, vol. 193, pp. 108854. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108854
3. **Zaami A., Baran I., Bor T.C., Akkerman R.** New process optimization framework for laser assisted tape winding of composite pressure vessels: Controlling the unsteady bonding temperature. *Materials & Design*, 2020, vol. 196, A. 109130. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109130
 4. **Ystinova E. S.** Modeling of composite structures winding. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical science*, 2018, № 3, pp. 27-33. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-27-33 (in Russ.)
 5. **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 Russ.). DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-2896
 6. **Kutin A. Yu., Musalimov V. M., Polyakov A. S.** Design of composite winding and control of the process of its formation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*, 2018, vol. 61(2), pp. 160–166. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166 (in Russ.)
 7. **Musalimov V. M., Monakhov Yu. S., Kut'in A. Yu., Solov'yeva G. A.** Modeling the process of winding threads on a rigid cylinder. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*, 2016, vol.59(8), pp. 657–663. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-657-663 (in Russ.)
 8. **Komkov M. A., Tarasov V. A., Borodulin A. S.** Spiral winding of the ends of composite shells with cylindrical and conical shapes. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Bauman, Seriya: Mashinostroyeniye*, 2012, pp. 78–85. (in Russ.)

Информация об авторах

Алексей Васильевич Гирн, кандидат технических наук

Алексей Сергеевич Калашников, лаборант-исследователь

Яков Юрьевич Пикалов, кандидат технических наук

Information about the Authors

Aleksey V. Girn, Candidate of Technical Sciences

Alexey S. Kalashnikov, Laboratory Assistant Researcher

Yakov Yu. Pikalov, Ph.D.

Статья поступила в редакцию 24.11.2023;
одобрена после рецензирования 27.12.2023; принята к публикации 27.12.2023

The article was submitted 24.11.2023;
approved after reviewing 27.12.2023; accepted for publication 27.12.2023