

УДК 681.5.01

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАТЯЖЕНИЯ ПРИ НАМОТКЕ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ИЗ «СУХОГО» КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В. С. Елсуков, А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов

**В** статье изложена методика синтеза электромеханической системы натяжения композиционной ленты, учитывающая особенности процесса намотки изделий сложной геометрической формы. Процесс намотки характеризуется в нестационарности параметров объекта управления, нелинейности его математического описания, изменении параметров объекта управления в широких пределах. Проведенные исследования показали, что робастная электромеханическая система управления обеспечивает требуемое качество регулирования натяжения при намотке изделий типа «Квадрат». Предложенная методика может быть использована при настройке существующих и разработке новых электромеханических систем, используемых при намотке изделий сложной геометрической формы.

**Ключевые слова:** «сухая» композиционная лента, математическая модель, адаптивная система регулирования, корректирующее устройство.

### Введение

В настоящее время изделия, изготавливаемые из композиционных материалов, нашли широкое применение в авиации, химической и нефтегазовой промышленности, судостроении благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам [1 – 5]. Во многом качество будущих изделий зависит от соблюдения заданного технологического регламента намотки. Основным фактором, влияющим на качество будущих изделий, является натяжение композиционного материала при намотке [6 – 9]. Рассмотрим процесс намотки лонжеронов из предварительно пропитанного композиционного материала («препрега») [10]. Данный материал будем называть «сухим» композиционным материалом. Схематически тракт намотки показан на рис. 1.

«Сухой» композиционный материал (2) сматывается с бобины (1) и проходит через натяжное устройство (3). Бобина (1) соединена с тормозным устройством, например, с механическим фрикционным тормозом. Натяжное устройство представляет собой обрезиненные ролики, связанные с приводом (4). Далее лента со скоростью  $v_1$  сходит с роликов (3), проходит измеритель натяжения (5), раскладчик (6) и наматывается на изделие (7) («Квадрат») со скоростью  $v_2$ . Изделие приводится во вращение приводом (8). Натяжение  $S_1$  на участке намотки поддерживается на заданном уровне путем изменения момента

на валу привода (5). С бобины (1) материал сходит с некоторым натяжением  $S_0$ .

Обычно электромеханические системы (ЭМС) натяжения строятся по принципу подчиненного управления. Функциональная схема трехконтурной ЭМС натяжения с внутренними контурами тока и скорости вращения двигателя приведена на рис. 2.

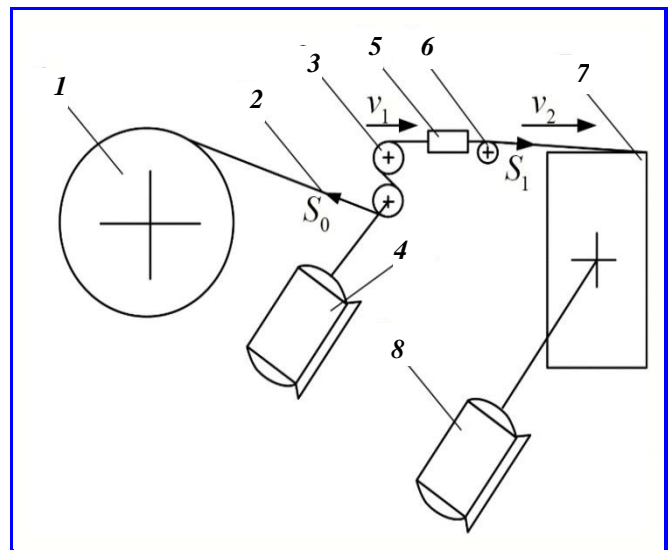


Рис. 1. Схематический тракт намотки изделий из «сухого» композиционного материала

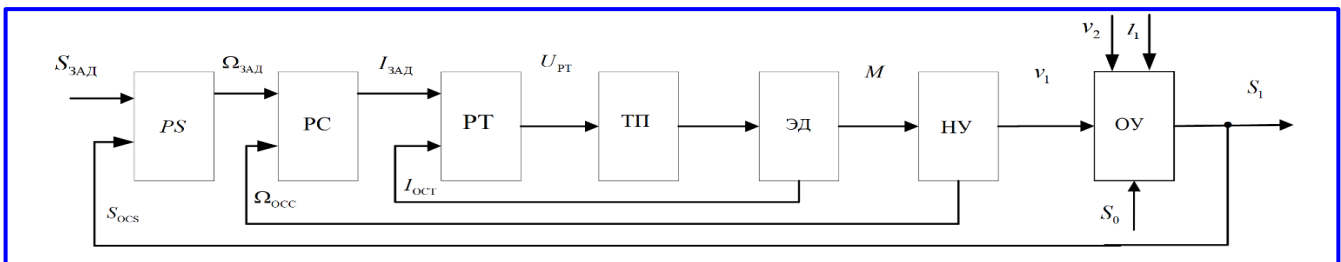


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования натяжения «сухой» композиционной ленты

На рис. 2 введены следующие обозначения: ОУ – объект управления (упругая лента); НУ – натяжное устройство; ЭД – электродвигатель; ТП – транзисторный преобразователь; РТ – регулятор тока; РС – регулятор частоты вращения двигателя; PS – регулятор натяжения композиционной ленты;  $M$  – момент, создаваемый электродвигателем;  $U_{РТ}$  – напряжение на выходе регулятора тока;  $I_{ЗАД}$  и  $I_{ОСТ}$  – значения заданного и реального токов ЭД;  $\Omega_{ЗАД}$  и  $\Omega_{ОСС}$  – значения заданной и реальной частоты вращения ЭД;  $S_{ЗАД}$  и  $S_{ОСС}$  – значения заданного и реального натяжения.

В процессе намотки изделий сложной геометрической формы (лонжерон) параметры объекта регулирования изменяются в широких пределах очень быстро, в том числе скачком. Стандартные настройки регулятора натяжения не обеспечивают заданное качество регулирования в процессе намотки таких изделий. Точность поддержания натяжения в процессе намотки должна быть не хуже  $\pm 1\%$ .

**Постановка задачи**

Данная статья посвящена разработке методики синтеза электромеханической системы натяжения «сухого» композиционного материала, учитывающей особенности процессов намотки изделий сложной геометрической формы, которые заключаются в нестационарности параметров объекта управления, нелинейности его математического описания, изменении параметров объекта управления в широких пределах.

**Краткий обзор литературных источников**

В настоящее время известны различные методы синтеза ЭМС для линейных и нелинейных объектов [11 – 15]. Однако при их использовании не удается получить систему управления, поведение которой не изменяется при изменении параметров объекта регулирования. Известные методы не пригодны для синтеза законов управления неопределенными по состоянию и управлению нелинейными объектами.

В работах [16 – 19] рассмотрены методы структурно-параметрического синтеза законов управления нелинейными объектами с произвольным относительным порядком и функциональной неопределенностью по состоянию. В настоящей статье предлагается использовать данные методы синтеза законов управления нелинейными объектами с функциональной неопределенностью по состоянию и управлению для синтеза ЭМС натяжения при намотке изделий «Квадрат».

**Теоретическая часть**

Математическое описание (упругой «сухой» композиционной ленты) ОУ представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение следующего вида [20]:

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{l_1(t)} [(S_1 - S_0 + EF) \times (v_2 + \frac{dl_1(t)}{dt} - \frac{S_1 - S_0 + EF}{EF} v_1)] + \frac{dS_0}{dt}, \quad (1)$$

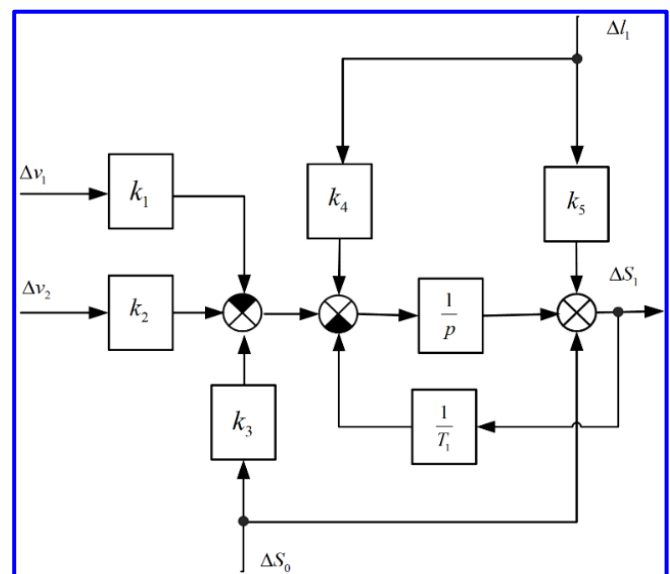
где  $l_1(t)$  – длина тракта намотки ленты на изделие в момент времени  $t$ ;  $E$  и  $F$  – соответственно модуль упругости и площадь поперечного сечения композиционной ленты.

После линеаризации выражения (1) получена структурная схема линеаризованного объекта регулирования (рис. 3). Здесь  $k_1, \dots, k_5$  – коэффициенты линеаризации;  $T_1$  – постоянная времени.

При намотке тел вращения типа лонжерон коэффициенты  $k_i$  и постоянная времени  $T_1$  изменяются в десятки раз [20, 21].

Вопросам разработки традиционной трехконтурной ЭМС натяжения «сухого» композиционного материала посвящены работы [20, 21]. Там приведены основные дифференциальные уравнения системы, в том числе математическое описание натяжного устройства.

На основании математического описания структурной схемы [20, 21] разработаем робастную ЭМС натяжения «сухой» композиционной ленты [16].



**Рис. 3. Структурная схема линеаризованного объекта регулирования**

Пусть ЭМС описывается математической моделью вида:

$$\dot{x}_i = \begin{cases} x_{i+1} & \text{при } i = 1; \\ bu - \varphi(\mathbf{x}) & \text{при } i = 2; \end{cases} \quad (2)$$

$$y = C\mathbf{x},$$

где  $b$  – постоянный коэффициент;  $u$  – управляющее воздействие;  $\varphi(\mathbf{x})$  – нелинейная функция;  $\mathbf{x}$  – вектор состояния;  $y$  – выходная величина;  $C$  – матрица выхода.

Для систем регулирования натяжения выходной величиной является натяжение наматываемого материала  $S_1$ .

Осуществим синтез закона управления  $u = u(y, g)$  объектом, описываемым выражением (2), чтобы движение синтезированной системы соответствовало уравнению:

$$(1 + \sum_{i=1}^n \tau_i p^i) y = g, \quad (3)$$

где  $\tau_i$  – постоянные коэффициенты, которые определяются из условий:

$$I = \int_0^{\infty} [x_1(0) - x_1(t)] dt \rightarrow \min, \quad x_1(0) > 0;$$

$$|A(p)|_{p=j\omega} \geq 1,$$

где  $A(p)$  – характеристический полином синтезируемой линеаризованной системы;  $g$  – сигнал задания.

Функциональная схема робастной ЭМС приведена на рис. 4. Робастная система управления по определению [22] обеспечивает приемлемое качество регулирования натяжения при изменении параметров объекта управления.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: СУ – суммирующий усилитель; ЭМ – эталонная модель; НПС – наблюдатель переменных состояния системы; БУМ – блок умножения; ДФ1, ДФ2 – дифференцирующие фильтры, на выходе которых формируются сигналы, необходимые для работы вычислителя оценки (ВО).

Для решения данной задачи зададимся требуемым уравнением ЭМС:

$$[(4T_{\mu} p + 1)\tau p + 1]y = g. \quad (4)$$

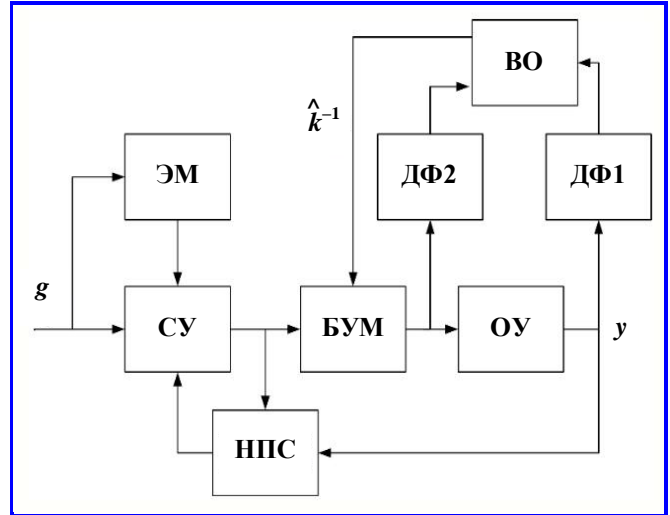


Рис. 4. Функциональная схема робастной электромеханической системы

Запишем выражения для дифференцирующих фильтров:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(p) &= \frac{(1 - e^{-\xi p})p}{1 + \mu_1 p}, \\ \Phi_2(p) &= \frac{1 - e^{-\xi p}}{1 + \mu_1 p} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $\mu_1$  – малая постоянная времени, необходимая для физической реализуемости дифференцирующих фильтров.

Требуемый закон управления запишем в виде:

$$\dot{y}_T = \frac{1}{\tau(4T_{\mu} p + 1)}(g - y). \quad (6)$$

В соответствии с критерием самонастройки необходимо использовать обратную связь:

$$\hat{k}^{-1} = \frac{k_{22}}{p} \left\{ |(1 - e^{-\xi p})\Omega_1| - \hat{k}^{-1} |(1 - e^{-\xi p}) \frac{p}{1 + \mu_1 p} y| \right\}. \quad (7)$$

Для компенсации изменения параметров объекта управления применяется дифференциальная компенсирующая связь по возмущению вынужденного движения ЭМС.

На рис. 5 приведена структурная схема робастной ЭМС натяжения «сухой» композиционной ленты при намотке тел вращения «Квадрат» с линеаризованным объектом управления.

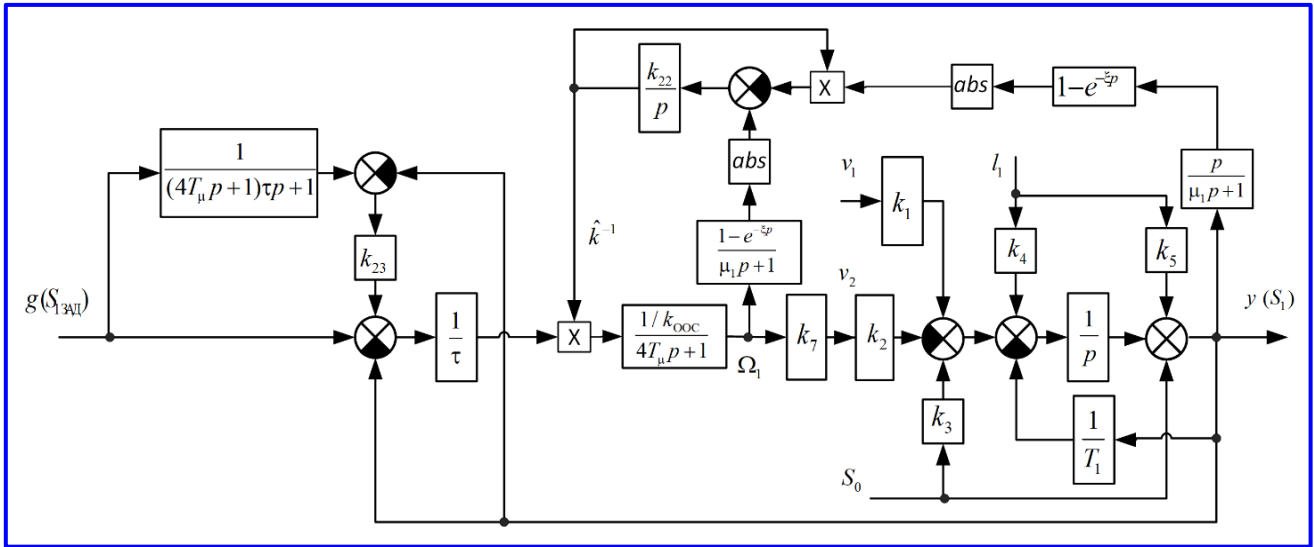


Рис. 5. Структурная схема робастной электромеханической системы натяжения «сухой» композиционной ленты с линеаризованным объектом регулирования

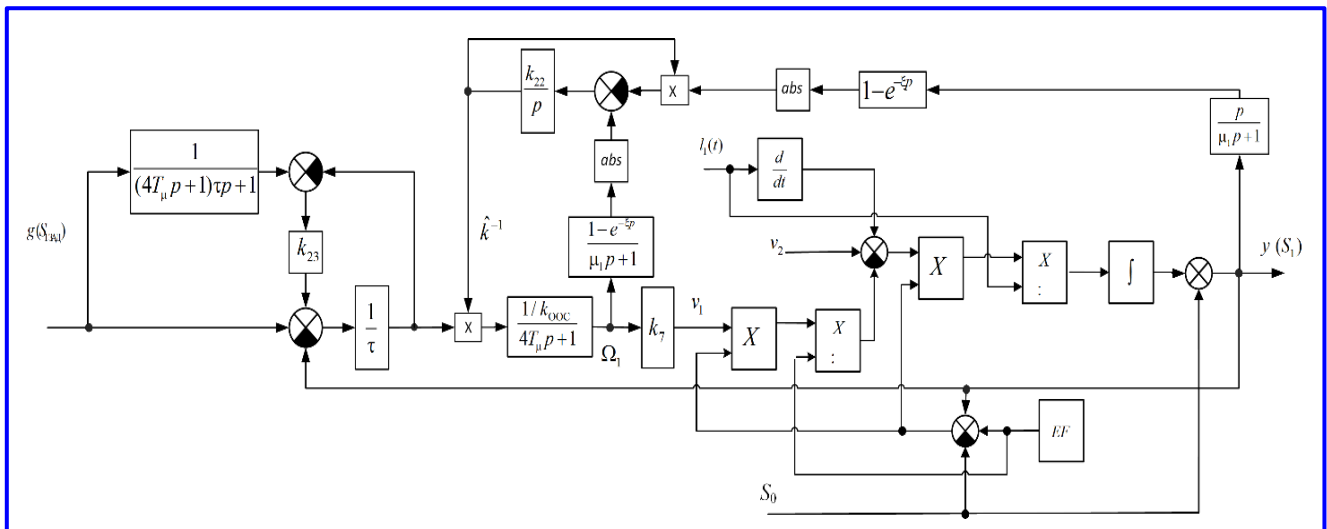


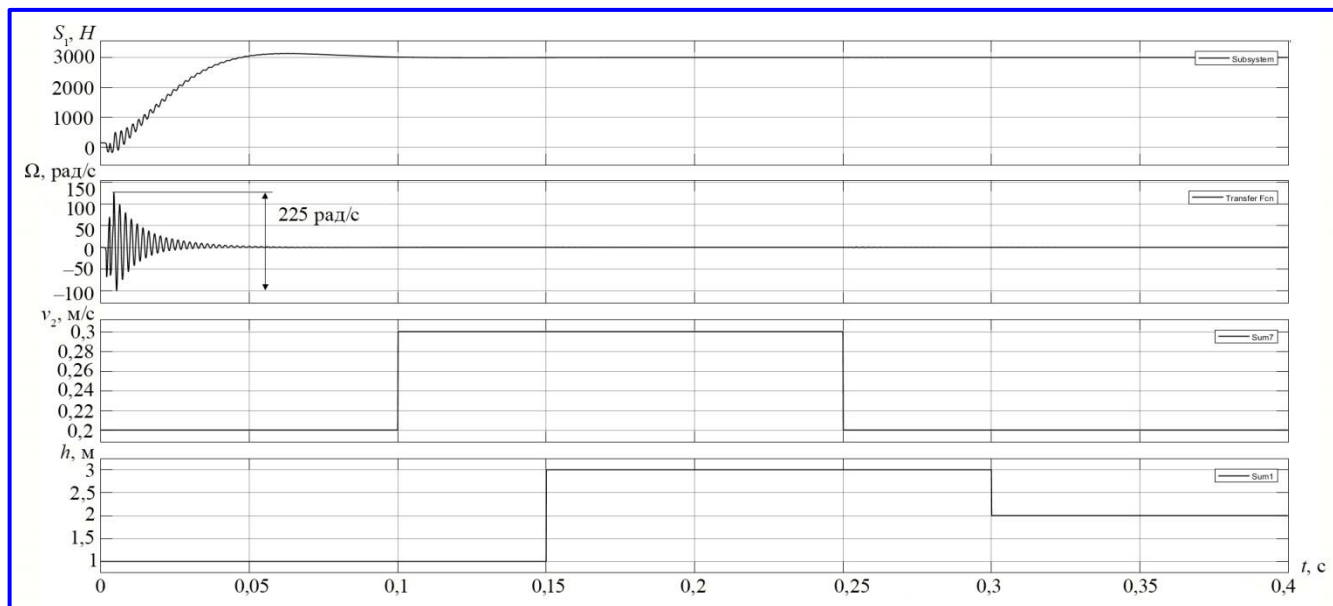
Рис. 6. Структурная схема робастной системы управления натяжением «сухой» композиционной ленты с нелинейным объектом регулирования

На рис. 5 обозначены:  $T_\mu$  – малая постоянная времени ЭМС;  $k_{оос}$  – коэффициент усиления датчика обратной связи контура частоты вращения привода;  $\Delta\Omega_1$  – частота вращения привода натяжного устройства;  $k_1, \dots, k_5$  – коэффициенты линеаризации математического описания упругой композиционной ленты [20, 21];  $k_7$  – коэффициент, связывающий частоту вращения двигателя натяжного устройства и скорость входа композиционного материала в зону намотки;  $k_7 = \frac{r}{i}$ ;  $r$  – радиус тормозного ролика;  $i$  – передаточное отношение редуктора, расположенного между тормозным роликом и двигателем.

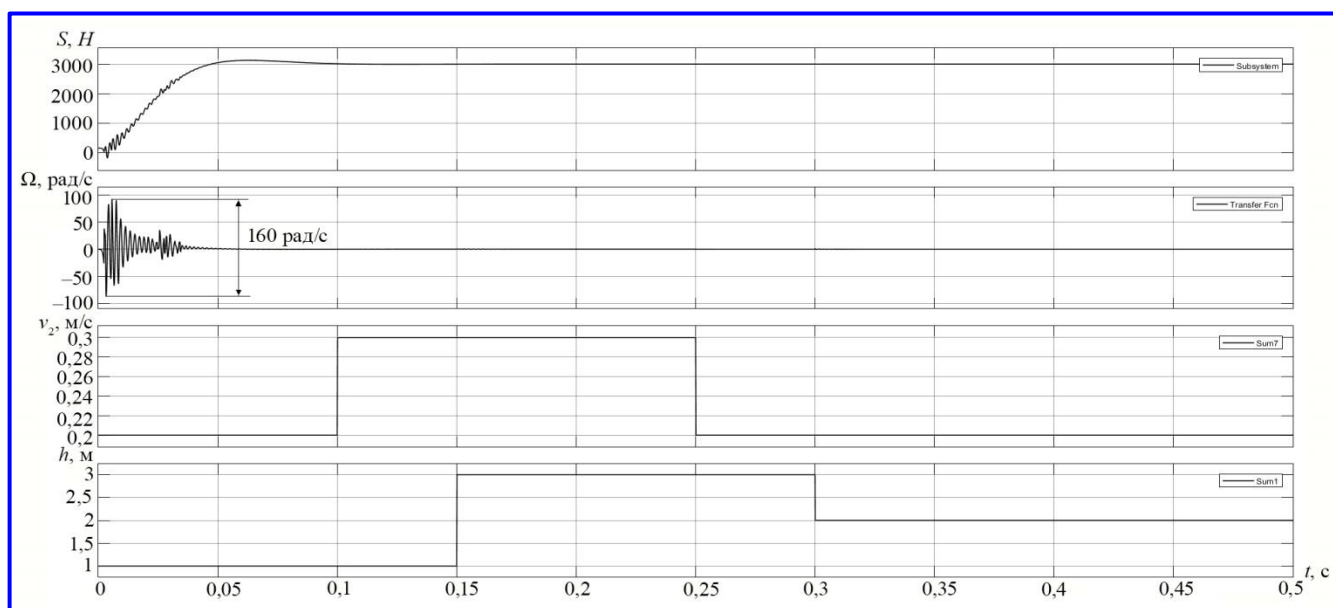
Проведем исследование разработанной робастной ЭМС натяжения «сухого» композиционного материала. Параметры, входящие в схемы, принимают следующие значения:  $T_\mu = 0,004$ ;  $T_1$  от 1,5 до 30;  $k_1$  от 27 350 до 200 000;  $k_2$  от 2000 до 20000;  $k_3$  от 0,21 до 0,846;  $k_4$  от 0 до 10097;  $k_5$  от 6667 до 18 286;  $k_7 = 0,012$ ;  $k_{22} = k_{23} = 800$ ;  $k_{оос} = 0,03$ ;  $\mu_1 = 0,001$ ;  $\eta = 0,003$ ;  $\tau = 2T_\mu$ .

Структурная схема робастной системы управления натяжением «сухой» композиционной ленты с нелинейным объектом регулирования приведена на рис. 6.

Для исследования разработанной робастной системы проведено ее моделирование в MatLab Simulink.



**Рис. 7. Результаты моделирования робастной системы регулирования натяжения «сухой» композиционной ленты при  $\mu_1 = 0,001$**



**Рис. 8. Результаты моделирования робастной системы регулирования натяжения «сухой» композиционной ленты при  $\mu_1 = 0,01$**

На рис. 7 и 8 приведены результаты моделирования при разных малых постоянных времени  $\mu_1$  при намотке изделия «Квадрат» со сторонами 2,4 м на 1,6 м. Скорость вращения изделия составляла 1 рад/с. В момент времени 0,1 с изменялись скорость намотки с 0,2 до 0,3 м/с; в момент времени 0,15 с изменялась длина тракта намотки с 1 до 3 м; в момент времени 0,25 с изменялась скорость намотки с 0,3 до 0,2 м/с; в момент времени 0,3 с изменялась длина тракта намотки с 3 до 2 м.

В процессе начала работы происходит адаптация системы, при этом скорость вращения привода изменяется от  $-100$  до  $+150$  рад/с при постоянной времени  $\mu_1 = 0,001$  с, и от  $-80$  до  $+80$  рад/с при  $\mu_1 = 0,01$  с. Длительность процесса адаптации не изменяется. В процессе изменения параметров объекта регулирования при намотке натяжение материала практически не изменяется.

Разработанная робастная система управления обеспечивает требуемое качество регулирования

натяжения при изменении параметров объекта управления во всем диапазоне их возможных изменений, в том числе скачком, но в процессе адаптации имеет колебательность.

### Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная робастная электромеханическая система регулирования натяжения «сухого» композиционного материала удовлетворяет требованиям, предъявляемым к таким системам. Необходимо продолжить работу с целью снижения колебательности в процессе адаптации.

### Литература

1. Башаров Е. А. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов / Е. А. Башаров, А. Ю. Вагин // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С. 1–33.
2. Композиционные материалы в конструкции летательных аппаратов : сб. статей / Ред. А. Л. Абибов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 272 с.
3. Сидорова В. В. Применение композитных материалов в нефтегазовой промышленности / В. В. Сидорова // Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа: Сб. науч. тр. – Воронеж, 2019. – С. 84–91.
4. Любин Е. А. Применение композиционных трубопроводов в нефтегазовой промышленности / Е. А. Любин, Д. С. Густов // Инженер-нефтяник. – 2016. – № 1. – С. 72–78.
5. Алсаид М. Обоснование применения многослойных композиционных материалов в судостроении / М. Алсаид, А. Саламех // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2019. – № 2. – С. 37–47.
6. Болотин В. В. Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В. В. Болотин // Механика полимеров. – 1972. – № 3. – С. 529–540.
7. Технологические факторы и их влияние на качество изделий из композитов, изготавливаемых методом намотки / Ю. В. Василевич, К. А. Горелый, С. В. Сахоненко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2015. – Т. 4. – С. 194–196.
8. Гуменников В. В. Исследование силы натяжения в нитях при продольной намотке изделий из композитов / В. В. Гуменников, Я. С. Карпов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2013. – Вып. 59. – С. 89–95.
9. Двирный В. В. Исследование влияния усилия натяжения углеродного волокна при намотке / В. В. Двирный, О. А. Исева, Е. Г. Пацков // Материалы XIX Международной науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск): в 2 ч. Ч. 1. ; под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – С. 101–102.
10. Микитинский А. П. Автоматизация процесса изготовления препрега на ленточной установке / А. П. Микитинский, А. А. Завалий // Перспективы развития технических наук: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – Челябинск : Инновационный центр развития образования и науки, 2016. – С. 63–70.
11. Ким Д. П. Синтез неминимально-фазовых систем управления с заданным временем регулирования / Д. П. Ким // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 4. – С. 5–10.
12. Гайдук А. Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления / А. Р. Гайдук. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
13. Гребенщиков Д. Е. Алгоритм робастного управления для одного класса неминимально-фазовых объектов / Д. Е. Гребенщиков, А. И. Паршева, А. М. Цыкунов // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 1. – С. 89–94.
14. Фуртат И. Б. Адаптивное управление неминимально-фазовыми объектами определенного класса / И. Б. Фуртат // Проблемы управления. – 2013. – № 1. – С. 19–25.
15. Фуртат И. Б. Адаптивное управление неминимально-фазовыми нелинейными объектами / И. Б. Фуртат // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – № 3. – С. 30–37.
16. Елсуков В. С. Синтез систем комбинированного управления по вектору состояния нелинейных объектов с функциональными неопределенностями / В. С. Елсуков, В. И. Лачин, В. В. Павлов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 5–11.
17. Елсуков В. С. Синтез систем управления для ограниченно неопределенных нелинейных объектов с произвольным относительным порядком по выходу / В. С. Елсуков, В. И. Лачин, С. М. Липкин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 1. – С. 88–90.
18. Елсуков В. С. Синтез систем управления для ограниченно неопределенных нелинейных объектов с правыми собственными значениями матрицы выхода / В. С. Елсуков, В. И. Лачин, С. М. Липкин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 5. – С. 70–75.
19. Елсуков В. С. Управление ограниченно неопределенными нелинейными объектами / В. С. Елсуков, В. И. Лачин, С. М. Липкин // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4392>.
20. Холоденко Н. О. Решение задачи математического описания упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения сложной геометрической формы / Н. О. Холоденко, А. П. Микитинский // Экономика, наука и образование в XXI веке: материалы III региональной научно-практической конференции ученых, студентов и аспирантов (24–25 марта 2011 г., г. Шахты). – Новочеркасск : Лик, 2011. – С. 376–380.
21. Mikitinskiy A. P. Synthesis of Adaptive Tension Control

System Used in Winding of Some «Dry» Composite Material / A. P. Mikitinskiy, N. Sukhenko // Products Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) 8 – 14 Sept. 2019, Sochi, Russia; IEEE. – 2019. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867808>.

22. Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления : В 5 томах. Том 3 / Н. Д. Егупов, К. А. Пупков. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2004. – 616 с.

Поступила в редакцию 21.02.2023

**Владимир Сергеевич Елсуков**, доктор технических наук, профессор  
(ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный  
технический университет (НПИ) имени М. И. Платова).

**Александр Петрович Микитинский**, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: [mialexp@mail.ru](mailto:mialexp@mail.ru).

**Борис Николаевич Лобов**, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: [blodov@yandex.ru](mailto:blodov@yandex.ru)

(Институт сферы обслуживания и предпринимательства  
(филиал) ДГТУ в г. Шахты Ростовской области).

## ROBUST TENSION CONTROL SYSTEM FOR WINDING AND LAYING OUT A «DRY» COMPOSITE TAPE WITH FUNCTIONAL UNCERTAINTY

**V. S. Elsukov**, A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov

*The purpose of the work is to present a new methodology for the synthesis of tension control systems of composite tape, taking into account the peculiarities of the winding process of products of complex geometric shape, which consist in the non-stationarity of the parameters of the control object, the nonlinearity of its mathematical description, the change of the parameters of the control object in a wide range, including a jump. Research methodology. The method is based on a mathematical description of an elastic band in the form of a nonlinear differential equation, the linearization of which allows you to build and investigate the structural and functional schemes of the tension control system. The results of the study. Studies show that a robust control system provides the required quality of tension control when winding products of the «Square» type. Research prospects. The proposed technique can be used in setting up existing and developing new systems used in winding products of complex geometric shape.*

**Keywords:** «dry» composite tape, mathematical model, adaptive control system, corrective device.

### References

1. Basharov E. A. Analysis of the application of composite materials in the design of gliders helicopters / E. A. Basharov, A. Y. Vagin // Trudy MAI. – 2017. – No. 92. – P. 1–33.
2. Composite materials in aircraft design : Collection of articles / Ed. A. L. Habibov – Moscow : Mashinostroenie, 1975. – 272 p.
3. Sidorova V. V. The use of composite materials in the oil and gas industry In the collection / V. V. Sidorova // Hydraulic machines and oil and gas transportation systems. Collection of scientific papers. – Voronezh, 2019. – P. 84–91.
4. Lyubin E. A. Application of composite pipelines in the oil and gas industry / E. A. Lyubin, D. S. Gustov // Petroleum Engineer. – 2016. – No. 1. – P. 72–78.
5. Alsaid M. Justification of the use of multilayer composite materials in shipbuilding / M. Alsaid, A. Salameh // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. – 2019. – No.2. – P. 37–47.
6. Bolotin V. V. The influence of technological factors on the mechanical reliability of composite structures / V. V. Bolotin // Mechanics of polymers. – 1972. – No. 3. – P. 529–540.
7. Technological factors and their influence on the quality of composite products manufactured by the winding method / Yu. V. Vasilevich, K. A. Gorely, S. V. Sakhonenko [at al.] // Actual issues of machine science. – 2015. – Vol. 4. – P. 194–196.
8. Gumennikov V. V. Investigation of the tension force in threads during longitudinal winding of composite products / V. V. Gumennikov, Ya. S. Karpov // Open information and computer integrated technologies : collection of scientific tr. – Kharkiv : Nats. aerospace. un-t «KHAI», 2013. – Issue 59. – P. 89–95.
9. Dvirny V. V. Investigation of the influence of the tension force of carbon fiber during winding / V. V. Dvirny, O. A. Iseeva, E. G. Patskov // Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference, dedicated. 55th anniversary of the Siberian State Aerospace. un-ta im. Academician M. F. Reshetnev (November 10 – 14, 2015, Krasnoyarsk): at 2 parts. Part 1. ; under the general Editorship of Yu. Yu. Loginov ; Sib. gos. aerospace Un-t. – Krasnoyarsk, 2015. – P. 101–102.

10. Mikitinskiy A. P. Automation of the prepreg manufacturing process on a tape installation. In the collection / A. P. Mikitinskiy, A. A. Zavalii // Prospects for the development of technical sciences, a collection of scientific papers on the results of the international scientific and practical conference. – Chelyabinsk : Innovative Center for the Development of Education and Science, 2016. – P. 63–70.
11. Kim D. P. Synthesis of non-minimal-phase control systems with a given control time / D. P. Kim // Mechatronics, automation, control. – 2010. – No. 4. – P. 5–10.
12. Gaiduk A. R. Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems / A. R. Gaiduk. – Moscow : FIZMATLIT, 2012. – 360 p.
13. Grebenshchikov D. E. Robust control algorithm for one class of non-minimal-phase objects / D. E. Grebenshchikov, A. I. Parsheva, A. M. Tsykunov // Bulletin of ASTU. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science, 2010. – No. 1. – P. 89–94.
14. Furtat I. B. Adaptive control of non-minimal-phase objects of a certain class / I. B. Furtat // Control problems. – 2013. – No. 1. – P. 19–25.
15. Furtat I. B. Adaptive control of non-minimal-phase nonlinear objects / I. B. Furtat // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Instrumentation. – 2013. – No. 3. – P. 30–37.
16. Elsukov V. S. Synthesis of combined control systems by the state vector of nonlinear objects with functional uncertainties / V. S. Elsukov, V. I. Lachin, V. V. Pavlov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. North Caucasus region. Technical sciences. – 2019. – No. 3. – P. 5–11.
17. Elsukov V. S. Synthesis of control systems for bounded indefinite nonlinear objects with arbitrary relative order of output / V. S. Elsukov, V. I. Lachin, S. M. Lipkin // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Electromechanics. – 2014. – No. 1. – P. 88–90.
18. Elsukov V. S. Synthesis of control systems for bounded indefinite nonlinear objects with right eigenvalues of the output matrix / V. S. Elsukov, V. I. Lachin, S. M. Lipkin // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Electromechanics. – 2015. – No. 5. – P. 70–75.
19. Elsukov V. S. Management of bounded indefinite nonlinear objects / V. S. Elsukov, V. I. Lachin, S. M. Lipkin // Engineering Bulletin of the Don. – 2017. – № 3. – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4392>.
20. Kholodenko N. O. Solving the problem of mathematical description of elastic tape as a control object when winding bodies of rotation of complex geometric shape / N. O. Kholodenko, A. P. Mikitinskiy // Economics, science and Education in the XXI century: materials of the III regional scientific and practical conference of scientists, students and postgraduates (March 24 – 25, 2011, Shakhty). – Novocherkassk : Lik, 2011. – P. 376–380.
21. Mikitinskiy A. P. Synthesis of Adaptive Tension Control System Used in Winding of Some «Dry» Composite Material / A. P. Mikitinskiy, N. Sukhenko // Products Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference (RusAuto-Con) 8 – 14 Sept. 2019, Sochi, Russia ; IEEE. – 2019. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867808>.
22. Egupov N. D. Methods of classical and modern theory of automatic control. Synthesis of regulators of automatic control systems. In 5 t. / N. D. Egupov, K. A. Pupkov. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2004. – Vol. 3 – 616 p.

**Vladimir Sergeevich Yelsukov** *Doctor of Technical Sciences, Professor.*  
(Platov South Russian State Technical University (NPI)).

**Alexander Petrovich Mikitinskiy**, *Candidate of Technical Sciences,*  
*Associate Professor, e-mail: mialexp@mail.ru.*

**Boris Nikolaevich Lobov**, *Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: blodov@yandex.ru.*  
(Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DSTU in Shakhty, Rostov region).