Научная статья
УДК 677.024.28: 519.876.5
EDN MZMFIS
https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-3-73-44-49
Петр Алексеевич Севостьянов[1]
Ольга Михайловна Власенко[2]
[1,2] Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия
[1] petrsev46@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-9919-5551
[2] vlasenko-om@rguk.ru; https://orcid.org/0000-0001-9351-303X

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УПРАВЛЕНИЯ НАМОТКОЙ РУЛОНА

Аннотация. *Статья посвящена особенностям математического описания и моделирования системы управления натяжением при намотке текстильных материалов в рулон с учетом распределения механических напряжений и деформаций. Проведен анализ решений задачи управления натяжением различными исследователями, который показал, что поддержание натяжения материала на постоянном уровне в процессе намотки может привести к необратимым деформациям и разрывам, что означает появление бракованных участков материала. Предложен закон управления, который позволяет линейно уменьшать натяжение наматываемого материала, что позволит максимально выровнять напряжения и пропорциональные им деформации в течение намотки рулона. Предложенный подход будет интересен технологам, специалистам в области моделирования систем управления технологическими процессами перемотки и намотки плоских материалов в рулон.*
Ключевые слова*: система напряжения и деформации в рулоне, натяжение, намотка, радиус слоя намотки, смещение слоя, модель, закон управления*

Для цитирования: Севостьянов П. А., Власенко О. М. Об особенностях управления намоткой рулона // Технологии и качество. 2026. № 3(73). С. 44–49. https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-3-73-44-49.

Original article
Petr A. Sevostyanov[1]
Olga M. Vlasenko[2]
[1,2] Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

ABOUT THE FEATURES OF ROLL WINDING CONTROL

Absrtact. *The article is devoted to the features of the mathematical description and modeling of the tension control system when winding textile materials into a roll taking into account the distribution of mechanical stresses and deformations is considered. An analysis of solutions to the tension control problem was conducted by various researchers. It showed that maintaining the material tension at a constant level during the winding process can lead to irreversible deformations and ruptures. A control law is proposed that allows for a linear reduction in the tension of the wound material. This will allow for maximum equalization of stresses and proportional deformations during roll winding.The proposed approach will be of interest to technologists, specialists in the field of modeling and synthesis of control systems for technological processes of rewinding and winding flat materials into rolls.*
Keywords: *stresses and deformations in the roll, tension, roll winding, winding layer radius, layer displacement, model, control law*

For citation: Sevostyanov P. A., Vlasenko O. M. About the features of roll winding control. Technologies & Quality. 2026. No 3(73). P. 44–49. (In Russ.) https://doi.org/ 10.34216/2587-6147-2026-3-73-44-49.

Актуальная проблема моделирования и построения системы управления процессом намотки рулонных материалов включает в себя необходимость математического описания процесса с учетом распределения механических напряжений и деформаций внутри формируемого рулона.

Упаковку плоских материалов в рулон используют при производстве многих изделий: металлических листов и фольги, бумаги, поли-

© Севостьянов П. А., Власенко О. М., 2026

мерных пленок, тканых, нетканых и вязаных текстильных изделий и др. [1–6]. Широкими «лентами» наматывают и нити основы на сновальные валики перед шлихтованием и навои перед заправкой на ткацкие машины. Натяжение плоского материала при намотке на вал и ранее намотанные слои необходимо регулировать, так как при малом натяжении намотка оказывается «рыхлой», а при большом натяжении возникают излишне большие сдавливающие напряжения [7]. В обоих случаях происходит необратимая деформация материала, которая ухудшает его качество и может привести к нарушениям целостности – разрывам наматываемого материала.

Задача управления натяжением наматывания решалась рядом исследователей [1, 3–6]. Для построения системы управления использовалась математическая модель, описывающая распределение механических напряжений и деформаций в теле намотки [2, 3, 5]. Модель обычно строят исходя из следующих упрощающих предположений [1–3]:

– материал рулона считается сплошной и однородной деформируемой средой;
– распределение напряжений и деформаций по объему рулона обладает аксиальной симметрией;
– так называемыми краевыми эффектами, т. е. особенностями деформации на торцевых краях рулона пренебрегают, поскольку предполагают, что протяженность этих краев вдоль образующей цилиндра намотки на порядки короче длины этой образующей;
– время одного оборота рулона при намотке очередного слоя на несколько порядков превосходит время распространения деформации в объеме рулона, что позволяет решать задачу о распределении деформации и напряжений в рулоне как квазистатическую.

При таких предположениях задача о распределении смещения u слоев рулона в виде круговых аксиальных цилиндров к оси, относительных деформаций ε и механических напряжений σ решается аналитически [8]. Величины u, ε и σ являются функциями только радиуса намотки r:

$$u(r) = C_1 r + \frac{C_2}{r},$$

$$\sigma_r = \frac{EC_1}{1-\mu} - \frac{EC_2}{1+\mu} \cdot \frac{1}{r^2},$$

$$\sigma_\theta = \frac{EC_1}{1-\mu} + \frac{EC_2}{1+\mu} \cdot \frac{1}{r^2},$$

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr},$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r},$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E}(\sigma_r + \sigma_\theta),$$

здесь E и μ – модуль упругости Юнга и коэффициент Пуассона сплошной среды – материала рулона. Ось z совпадает с осью рулона намотки.

Константы интегрирования C_1 и C_2 определяют из краевых условий. Типичными являются условия, при которых внутренний радиус r_1 рулона остается неизменным в течение всего времени намотки, т. е. перемещение $u(r)$ при $r = r_1$ равно нулю $u(r_1) = 0$. На внешнем периметре намотки с радиусом r_2, т. е. при $r = r_2$, давление P наматываемого слоя на уже намотанные слои постоянно и пропорционально натяжению ленты, при котором происходит ее наматывание на рулон. Таким образом, второе краевое условие равно $\sigma(r_2) = -P$.

Исследуем зависимость функций $u(r)$, $\sigma_r(r)$, $\sigma_\theta(r)$, $\varepsilon_r(r)$ и $\varepsilon_\theta(r)$ от величины внешнего радиуса r_2. Для этого выполним расчет констант интегрирования C_1 и C_2 и построим графики зависимости, например $u(r)$, от радиуса r для значений r_2, нарастающих от r_1 до конечной величины наматываемого радиуса R_2 рулона. При расчетах были приняты следующие числовые значения параметров: E = 2 МПа; μ = 0,33; P = 0,1 МПа; r_1 = 0,2 м; R_2 = 1,0 м; число слоев в рулоне n = 80.

На рисунках 1, 2 и 3 приведены кривые, показывающие изменения величин: перемещения $u(r)$ кольцевых слоев рулона радиуса r к центру намотки; механические напряжения вдоль радиуса намотки $\sigma_r(r)$ и в тангенциальном направлении $\sigma_\theta(r)$ (нормальные компоненты тензора напряжений) и относительные деформации $\varepsilon_r(r)$ и $\varepsilon_\theta(r)$ в этих же направлениях (нормальные компоненты тензора упругих деформаций) в зависимости от расстояния от вала в основании намотки рулона до кольцевого слоя при разных радиусах рулона R_2. Все графики говорят о существенном градиенте перечисленных величин по глубине рулона. Очевидно, что если деформации превысят предельные для наматываемого материала значения, то в нем могут возникнуть необратимые деформации, а то и разрывы, что означает появление бракованных участков материала. Кривые построены при условии постоянства натяжения наматываемой ленты на рулон.

В результате анализа полученных кривых предложен закон управления натяжением намотки, по которому оно постепенно уменьшается, стараясь максимально выровнять напряжения и пропорциональные им деформации в течение намотки рулона. При равномерном убывании натяжение наматываемого в рулон материала изменяется от начального давления на слои P_{max} до натяжения, приводящего к минимальному давлению P_{min}, согласно формуле

$$p(j) = P_{max}\left(1 - \frac{j-1}{n-1}\right) + P_{min}\left(\frac{j-1}{n-1}\right),$$

где j – номер наматываемого слоя, $j = 1, ..., n$.

На рисунках 4, 5, 6 показаны распределения смешений, напряжений и относительных деформаций, т. е. тех же величин, что и на рисунках 1, 2 и 3, но при линейно убывающем натяжении наматываемого материала. Кривые получены для значений $P_{max} = 0{,}1$ МПа и $P_{min} = 0{,}02$ МПа.

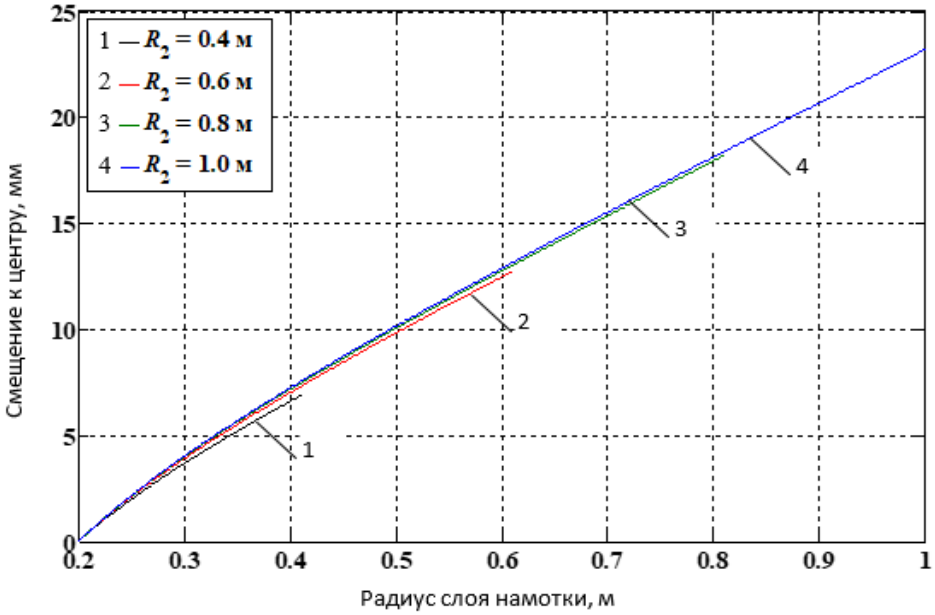


Рис. 1. Смещение слоев намотки (сжатие рулона) к оси вдоль радиуса рулона в зависимости от глубины слоя

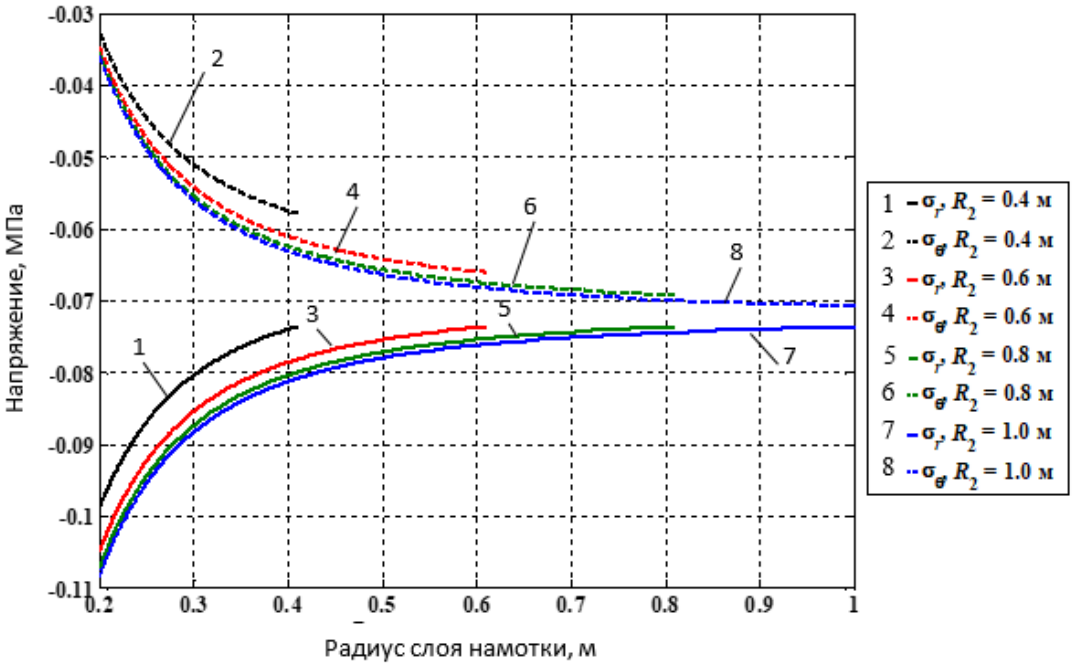


Рис. 2. Радиальное и тангенциальное напряжения слоев намотки вдоль радиуса рулона в зависимости от глубины слоя

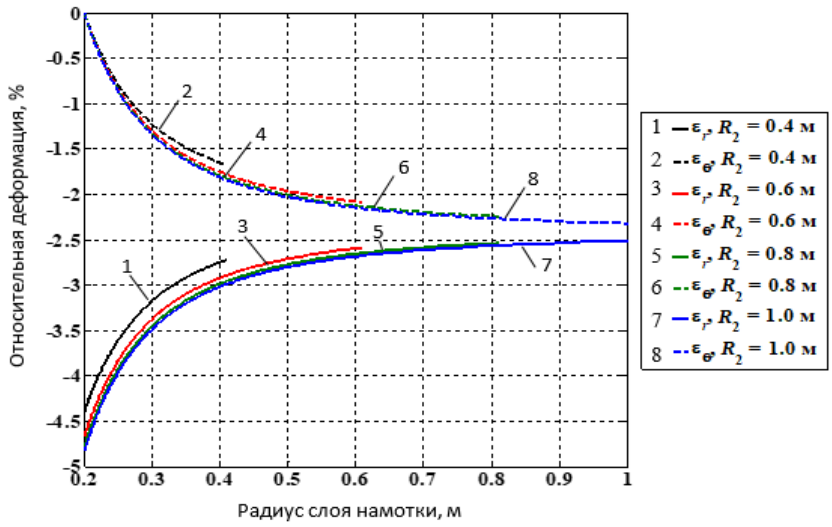


Рис. 3. Радиальная и тангенциальная относительные деформации слоев намотки вдоль радиуса рулона в зависимости от глубины слоя

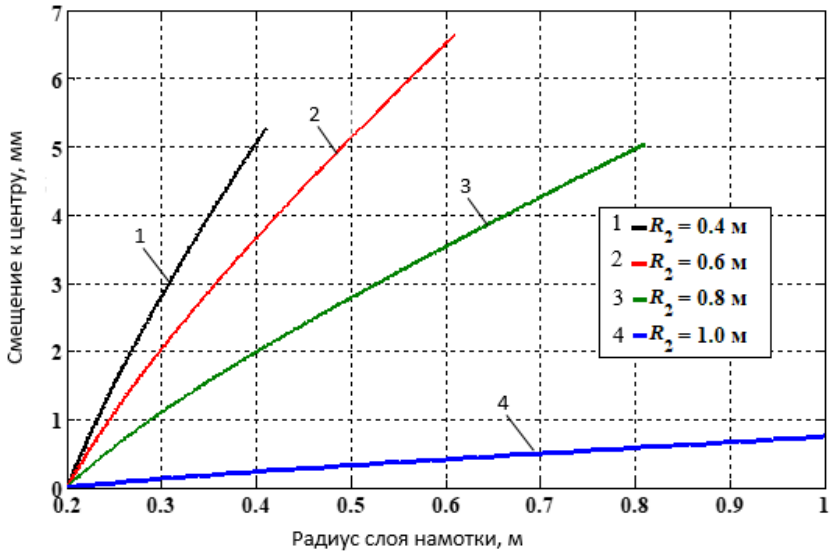


Рис. 4. Сжатие рулона вдоль радиуса в зависимости от глубины слоя при переменном натяжении перемотки

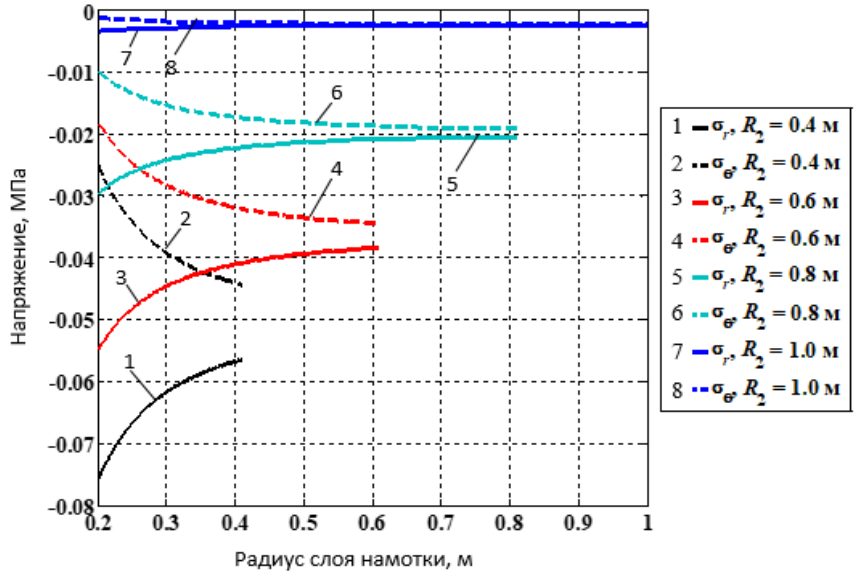


Рис. 5. Радиальное и тангенциальное напряжения слоев намотки вдоль радиуса рулона при переменном натяжении наматываемого продукта

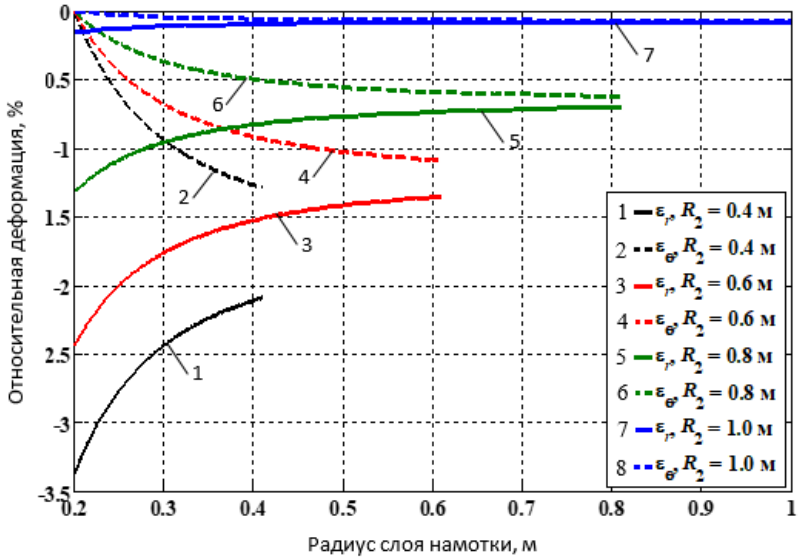


Рис. 6. Радиальная и тангенциальная относительные деформации слоев намотки вдоль радиуса при переменном натяжении намотки

Сравнение кривых на рисунках показывает, что, действительно, даже при простейшем линейном законе убывания натяжения по мере наматывания слоев сжатие рулона в радиальном направлении, радиальные и тангенциальные напряжения и относительные деформации в рулоне снижаются по величине, и уменьшается градиент этих величин вдоль радиуса рулона.

Разработанная модель в виде программы для ЭВМ является удобным инструментом оптимизации закона управления натяжением наматываемого в рулон плоского материала при синтезе автоматической системы управления процессом намотки.

ВЫВОДЫ

Предложенный закон управления, линейно уменьшающий натяжение наматываемого материала, обеспечит выравнивание напряжений и деформаций в теле рулона, что предотвратит разрывы и появление бракованных участков материала. Рассмотренный подход может быть рекомендован к использованию для моделирования и синтеза систем управления технологическими процессами перемотки и намотки плоских материалов в рулон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кутьин А. Ю., Мусалимов М. С., Малов А. Ю. Моделирование динамических процессов в системе управления плотностью композитной намотки // Известия вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 420–429.
2. Усов С. В., Мещеряков В. Н. Математическое моделирование процесса намотки тонкой стальной полосы в рулон // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 2. С. 157–162.
3. Алехин С. Н., Дмитриенко Н. А., Дулоглу Т. А. Экспериментальное исследование деформации текстиля под статической нагрузкой // Молодой ученый. 2016. № 23(127). С. 24–27.
4. Residual Winding Stresses Due to Spatial Web Thickness Variation / J. K. Good, C. Mollamahmutoglu, R. Markum, J. W. Gale // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2017. Vol. 139(3). P. 031003.
5. Numerical simulation of fabric cold pad-batch winding and quality assessment of fabric in roll / M. Zihong, W. Mingliang, H. Jiahao et al. // The Journal of the Textile Institute. Part 2. Textile Economics, Management and Marketing. 2025. No. 116(8). P. 1544–1552.
6. Stress distribution of the nonwoven fabric package during winding / Z. Dai, Y. Li, J. Wang et al. // Textile Research Journal. 2022. No. 93(9-10). P. 2191–2201.
7. Глазунов В. Ф. Управление осевой намоткой ткани // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2008. № 4(309). С. 93–97.
8. Крылов А. Н. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложение в технических вопросах : учеб. пособие для высших учебных заведений. 6-е изд., стер. М. : ЛЕНАНД, 2023. 368 с.

REFERENCES
1. Kutin A. Yu., Musalimov M. S., Malov A. Yu. Modeling of dynamic processes in the composite winding density control system. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of instrument engineering]. 2022;65,6:420–429. (In Russ.)
2. Usov S. V., Meshcheryakov V. N. Mathematical modeling of the winding process of thin steel strip into a roll. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University]. 2014;10,2:157–162. (In Russ.)
3. Alekhin S. N., Dmitrienko N. A., Duloglu T. A. Experimental research of strain textile under static load. *Molodoj uchenyj* [Young Scientis]. 2016;23(127):24–27. (In Russ.)
4. Good J. K., Mollamahmutoglu C., Markum R., Gale J. W. Residual Winding Stresses Due to Spatial Web Thickness Variation. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017;139(3):031003.
5. Zihong M., Mingliang W., Jiahao H. et al. Numerical simulation of fabric cold pad-batch winding and quality assessment of fabric in roll. The Journal of the Textile Institute. Part 2. Textile Economics, Management and Marketing. 2025;116(8):1544–1552.
6. Dai Z., Li Y., Wang J. et al. Stress distribution of the nonwoven fabric package during winding. Textile Research Journal. 2022;93(9-10):2191–2201.
7. Glazunov V. F. Axial fabric winding control. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2008;4(309):93–97. (In Russ.)
8. Krylov A. N. On some differential equations of mathematical physics that have applications in technical matters. Moscow, LENAND Publ., 2023. 368 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 27.03.2026
Принята к публикации 02.07.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
П. А. Севостьянов, доктор технических наук, профессор
О. М. Власенко, кандидат технических наук, доцент