

УДК 621.798.426-52
DOI 10.47367/0021-3497_2024_5_57

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕМНОГО НЕТКАНОГО ПОЛОТНА

RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BULK NONWOVEN FABRIC

Е.М. ФИЛИМОНОВА, А.Е. ПОЛЯКОВ

E.M. FILIMONOVA, A.E. POLYAKOV

(Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: filimonova-em@rguk.ru

В статье рассмотрены вопросы, связанные с автоматическим регулированием процессов формирования и наматывания волокнистого материала. Для получения качественного готового волокнистого продукта с необходимой степенью вытяжки необходимо поддержание заданных скоростных режимов и жесткая стабилизация технологических параметров. Стабильность этих величин определяют физико-механические свойства перерабатываемого продукта. В статье приведены результаты испытаний термоскрепленных нетканых материалов для определения их физико-механических свойств в статическом и динамическом режиме. Определены основные параметры нетканого материала, которые влияют на скорость его разрушения. Использована механическая модель Я.И. Френкеля для изучения упругих свойств волокнистых материалов. Для проектирования вытяжных, крутильных и мотальных механизмов текстильных машин и аппаратов указанные параметры имеют научно-практическое значение. Дано математическое описание физико-механических свойств для последующего применения в системах управления.

The article addresses issues related to the automatic regulation of processes involved in the formation and winding of fibrous materials. To obtain a high-quality finished fibrous product with the required degree of stretching, it is essential to maintain the specified speed modes and firmly stabilize the technological parameters. The stability of these values is determined by the physical and mechanical properties of the processed product. The article presents the results of tests on thermally bonded nonwoven materials to determine their physical and mechanical properties in both static and dynamic modes. The main parameters of the nonwoven material that influence its failure rate were identified. The mechanical Ya.I. Frenkel model was utilized to study the elastic properties of fibrous materials. For the design of drawing, twisting, and winding mechanisms of textile machines and apparatus, these parameters hold scientific and practical significance. A mathematical description of the physical and mechanical properties is provided for subsequent application in control systems.

Ключевые слова: физико-механические свойства, объемное нетканое полотно, модель Я.И. Френкеля, прочность, деформация, долговечность, диаграмма Боде.

Keywords: physical and mechanical properties, bulk nonwoven fabric, Ya.I. Frenkel model, strength, deformation, durability, Bode diagram.

Введение

Заключительным этапом формирования объемного нетканого полотна является скрепление холста легкоплавким связующим в термокамере, при транспортировании в которой он претерпевает структурные изменения, при этом происходит его усадка по длине и ширине. Готовое нетканое полотно должно наматываться в рулон с постоянным натяжением, в процессе чего оно подвергается действию продольной нагрузки. Следовательно, необходимо определить ограничения, при которых наматывание будет происходить без повреждения полотна и неравномерности слоев рулона. Необходимо изучить свойства нетканых полотен в статическом и динамическом режимах [1].

Определяющим параметром, характеризующим физико-механические свойства нетканого полотна, является прочность. Она определяется способностью материала сохранять форму или целостность в условиях заданного механического нагружения [2], т. е. сопротивлением материала развитию в нем необратимых деформаций.

Методы исследования

Испытания термоскрепленных нетканых материалов на прочность проводились в ла-

боратории кафедры материаловедения и товарной экспертизы РГУ им. А.Н. Косыгина при одноосном растяжении на установке «Инстрон» в режиме постоянной скорости деформации в соответствии с ГОСТ Р 53226-2008.

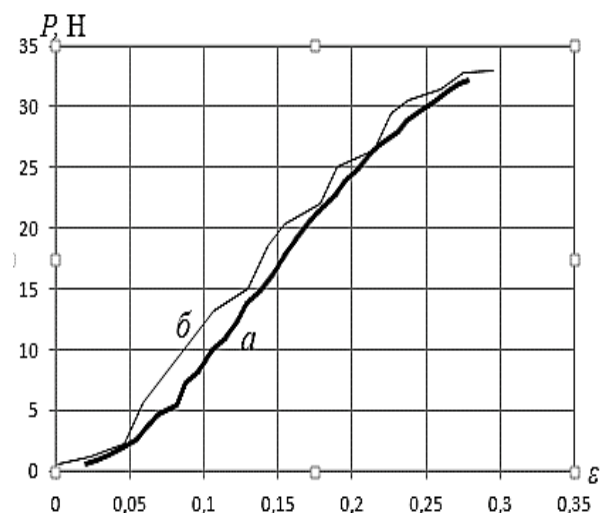


Рис. 1

По экспериментальным данным построены диаграммы растяжения (рис. 1), на которых наклон начального участка характеризует начальный модуль упругости материала E , а перегиб кривой, переходящей в пологий участок, соответствует пределу

| Нагрузка, Н | Составляющие деформации | | |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | упругая (ϵ_y) | эластическая ($\epsilon_{эл}$) | пластическая ($\epsilon_{пл}$) |
| 6 | 0,15 | 0,01 | 0,01 |
| 19 | 0,14 | 0,01 | 0,04 |

формоустойчивости материала. До перегиба деформация практически обратима, при больших удлинениях материала – необратима. Конец кривой соответствует разрушению образца. Координаты конца кривой являются разрушающей нагрузкой P_p при растяжении и относительной деформацией (относительным удлинением) ϵ_p при разрыве [3].

При более высокой скорости растяжения деформация полотна меняется неравномерно с характерными внутренними разрывами. В этом случае начальный модуль упругости больше.

Во время испытаний определены следующие параметры:

- усилие, выдерживаемое образцом до разрыва, – 32 Н;
- наибольшее удлинение, выдерживаемое образцом до разрыва, – 29 мм;
- относительное удлинение – 0,29;
- начальный модуль упругости, выраженный в Ньютонах, – 102 Н.

Проведен анализ составных частей полной деформации $\epsilon_{п}$, возникающей при растяжении под действием нагрузок, меньших разрывной [3]:

$$\epsilon_{п} = \epsilon_y + \epsilon_{эл} + \epsilon_{пл}, \quad (1)$$

где ϵ_y – упругая (быстрообратимая) часть деформации; $\epsilon_{эл}$ – эластическая (медленнообратимая) часть деформации; $\epsilon_{пл}$ – пластическая (необратимая) часть деформации.

Составные части деформации определены в процессе цикла нагрузка – разгрузка – отдых на релаксметре типа «стойка». На основе данных эксперимента построены однопериодические диаграммы (рис. 2, 3), результаты анализа которых приведены в табл. 1.

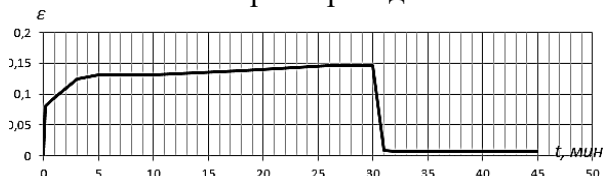


Рис. 2

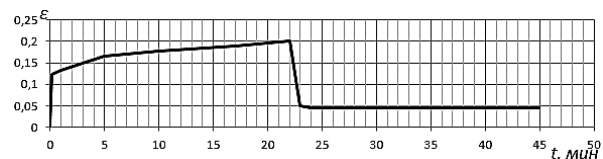


Рис. 3

Следовательно, чтобы исключить необратимую деформацию, нетканые полотна при растяжении (деформации) должны испытывать нагрузку не более 5...10% от разрывной (в зависимости от плотности вырабатываемой продукции), и для исследуемого образца она составляет 3 Н [4].

Еще одним важным параметром нетканого материала является долговечность, т. е. продолжительность сохранения им формы и целостности под действием нагрузки [5]. Долговечность зависит от приложенной нагрузки и температуры. Ее можно рассматривать как обратную усредненную скорость разрушения материала (накопление в материале микродефектов).

Для разных материалов экспериментально установлена линейная зависимость логарифма долговечности от нагрузки, которая описывается универсальным уравнением [2]:

$$\ln \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{u - \gamma \sigma}{RT}, \quad (2)$$

где u – температурный коэффициент процесса разрушения материала; γ – структурный коэффициент; σ – напряжение; τ – долговечность материала при заданном напряжении; τ_0 – коэффициент; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Величины коэффициентов устанавливают эмпирически.

Решение уравнения (2) относительно σ дает выражение для прочности при растяжении образца материала с увеличением напряжения от 0 до σ за определенное время t в зависимости от величин коэффициентов:

$$\sigma(t) = \frac{\tau}{\tau_0 \gamma}. \quad (3)$$

Скорость нагружения обратно пропорциональна времени растяжения материала до разрыва t . Как видно из уравнения (3),

с увеличением скорости нагружения растет прочность материала.

Предельно возможный ресурс долговечности задан температурным коэффициентом u , а реальный ресурс – структурным коэффициентом γ . Чем γ меньше, тем больше ресурс τ . Скорость расходования ресурса тем больше, чем выше T и σ . Влияние температуры и напряжения на долговечность материала эквивалентно (T и σ входят в показатель экспоненты). Следовательно, механические (вязкоупругие) свойства полимерного материала при одной температуре можно отождествить со свойствами материала при другой температуре только изменением продолжительности воздействия силы [6].

На рис. 4 показана зависимость (3) на отрезке $\tau = [0,1; 40]$ при коэффициентах, подобранных в соответствии с формулой (3). Анализ полученных зависимостей устанавливает следующие ограничения для нагрузок на нетканое полотно при наматывании:

- 1) заданное натяжение (10 % от разрывной нагрузки) – 3 Н;
- 2) максимальное натяжение при перегулировании – 3,8 Н.

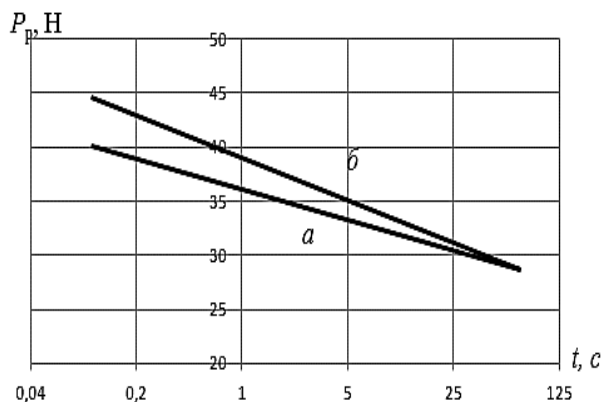


Рис. 4

При склеивании бикомпонентными волокнами в местах пересечений волокон создаются склейки. Они имеют минимальные размеры и прочность, оптимальную шарнирную подвижность. Волокна и склейки деформируют и разрушают действующие в них усилия, которые отличаются от внешнего усилия, приложенного к нетканому материалу, тем больше, чем более совершенна структура материала. Жесткость и

прочность склеек выше жесткости и прочности волокон, поэтому склейки под действием нагрузки практически не деформируются [7]. По мере увеличения длины волокон растет площадь контакта между растаскиваемыми волокнами и соответственно увеличивается прочность материала.

Таким образом, скорость процесса разрушения материала, т. е. его долговечность и прочность, непосредственно зависит от структуры материала (длины и диаметра волокон, расстояний между ними), механических свойств волокон и их связующих (упругости и прочности, релаксационных свойств), а также от адгезионной прочности связующего (легкоплавкого компонента).

Параметры материала сложно взаимосвязаны, а изменение одного из них отражается на структуре и всем комплексе свойств материала, а не только на прочности и технологии изготовления. Например, ориентация волокон увеличивает прочность в одном направлении, но снижает в других [8].

Деформация нетканого материала при растяжении происходит за счет распрямления изогнутых волокон и сопровождается кооперативным перемещением склеек и сегментов волокон, что связано с шарнирным поворотом сегментов волокон в склейках. Процесс деформации нетканого материала можно упрощенно описать, разделив его условно на три явления: изгиб и распрямление волокон, деформация склеек и упругая деформация волокон (увеличение их контурной длины). Деформация материала за счет распрямления волокон тем больше, чем больше коэффициент извитости волокон.

При малых удлинениях нетканого материала пренебрегают изменением его поперечных размеров, поэтому справедлив закон Гука. Зависимость между удлинением и напряжением волокна будет:

$$\sigma_B = E_B e_B, \quad (4)$$

где σ_B – напряжение волокна; E_B – начальный модуль упругости волокна; e_B – относительное удлинение волокна.

При большом растяжении материала под действием одноосной нагрузки волокна

ориентируются в направлении приложения нагрузки, что приводит к последующему сужению образца.

В полимерных волокнах и в связующем, из которых состоит нетканый материал, наряду с упругой деформацией присутствует эластическая деформация [9]. При этом эластическая деформация составляет незначительную часть обратимой деформации. При больших деформациях появляется также и остаточная деформация. Так как при больших удлинениях закон Гука не выполняется, нагрузку определяют из кривой растяжения, снятой экспериментально. На основании эмпирических зависимостей получена зависимость напряжения от относительного удлинения волокна в виде:

$$\sigma_b = f(e_b). \quad (5)$$

Для описания упругих свойств волокнистых материалов использована механическая модель Я.И. Френкеля, предложенная в работе [10].

На рис. 5 пружина E_2 моделирует упругость нетканого полотна, параллельное соединение пружины E_1 и демпфера η_1 – эластичность, а демпфер η_2 – пластичность.

В соответствии с правилами о последовательном и параллельном соединении элементов и введя следующие обозначения: $k_1 = 1/E_2$; $k_2 = 1/E_1$; $k_3 = 1/\eta_2$; $T = \eta_1/E_1$, получили комплексный модуль упругости для модели, представленной на рис. 5:

$$E(p) = \frac{p(Tp+1)}{k_1Tp^2 + (k_1+k_2+k_3T)p + k_3}. \quad (6)$$

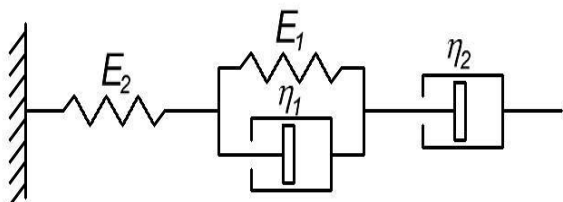


Рис. 5

Соотношение (6) является математической моделью, позволяющей (с заданной точностью) описать механические свойства нетканого материала и представляет собой

зависимость, в которой комплексный модуль упругости зависит от времени. Однако данная зависимость справедлива только на рабочем участке диаграммы растяжения, т. к. коэффициент, определяющий пластическую деформацию, изменяется при больших нагрузках [11].

Для изучения поведения нетканого материала из полиэфирного волокна с поверхностной плотностью 250 г/м^2 при деформировании можно задать следующие значения постоянных: $E_2 = 102 \text{ Н}$, $E_1 = 76 \text{ Н}$, $\eta_1 = 3800 \text{ Н}\cdot\text{с}$, $\eta_2 = 1479289 \text{ Н}\cdot\text{с}$, а входное значение выбрать в виде ε . График на рис. 6 отражает постепенное снижение комплексного модуля упругости при наличии необратимых деформаций, что объясняется структурными изменениями в нетканом материале (рис. 6, а). Напротив, при малых деформациях модуль упругости остается практически постоянным (рис. 6, б). Из данного рисунка установлено, что при воздействии нагрузки на полотно 60 % от разрывной прочности снижается почти вдвое.

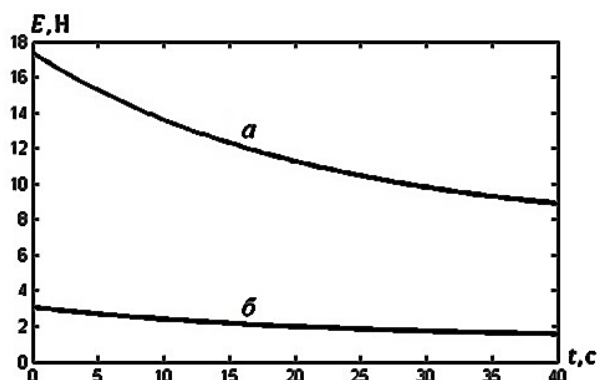


Рис. 6

На рис. 7 представлена диаграмма Боде, которая показывает частотные свойства механической модели нетканого материала при разного рода деформациях. Данная диаграмма отражает повышенный модуль упругости при быстром изменении деформации, т. е. при коротком воздействии нагрузки. При условии изменения деформации 0,06 за минуту наблюдается замедление снижения модуля упругости. В остальных случаях комплексный модуль упругости изменяется как при постоянном уровне деформации [12].

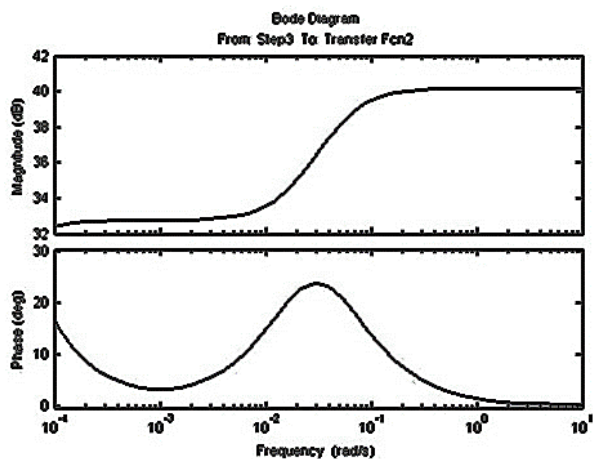


Рис. 7

Таким образом, вышерассмотренные теоретические положения позволяют определять и прогнозировать механические свойства нетканых материалов при проектировании систем управления натяжением при наматывании. Математическое описание физико-механических свойств нетканых материалов позволяет характеризовать поведение волокнистого продукта при воздействии нагрузок, создаваемых работающим оборудованием. Следовательно, полученную модель можно использовать при разработке систем автоматического регулирования натяжением для наматывающего устройства. Однако следует учитывать, что коэффициент модели, определяющий пластическую деформацию, имеет явную нелинейную зависимость от величины нагрузки. Поэтому использование модели ограничено начальным участком диаграммы растяжения.

ВЫВОДЫ

С использованием известных математических моделей и экспериментальных данных определены силовые и временные ограничения внешних воздействий на нетканое полотно из полиэфирных волокон со стороны преобразователя прочеса и наматывающего устройства. Определено максимальное значение нагрузки, при котором исключается необратимая деформация волокнистого материала.

1. Поляков А.Е., Дубовицкий В.А., Чесноков А.В., Филимонова Е.М. Применение классических и интеллектуальных методов для исследования энерго-сберегающих режимов сложных управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования: монография. М.: МГУДТ, 2013. 213 с. – ISBN 978-5-87055-175-3.

2. Поляков А.Е., Иванов М.С., Филимонова Е.М. Исследование свободной зоны транспортирования и наматывания волокнистого материала агрегата для производства объемного нетканого материала как объекта системы автоматического регулирования // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина. М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2023. С. 49...55.

3. Леоненков А. Нечеткое моделирование в средах MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 736 с. – ISBN 978-5-94157-087-4.

4. Polyakov A.E., Ivanov M.S., Ryzhkova E.A., Filimonova E.M. Statement of the task of studying multidimensional dynamic objects with complex deformation zones of fibrous materials // Fibre chemistry. 2021. Т. 53, № 1. P. 50...53.

5. Зими́на Е.Л., Гроше́в И.М. Прогнозирование физико-механических свойств нетканых материалов, изготовленных методом горячего прессования // Сб-к тр. 22-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2019. С. 52...55.

6. Королев Д.О., Масанов Д.В., Рыжкова Е.А. Системы управления асинхронного двигателя, основанные на применении метода нечеткой логики. Сравнительный анализ различных подходов автоматизации // Сб-к матер. всерос. науч.-практ. конф. им. Я.В. Мильмана. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. С. 203...210.

7. Тимошенко А.Н., Зиновьев В.П., Шустов Ю.С. Установление взаимосвязи прочности пряжи от свойств исходных волокон и крутки // Дизайн и технологии. 2023. № 96(138). С. 63...68.

8. Виниченко С.Н., Масанов Д.В., Рыжкова Е.А. Анализ результатов эксперимента оценки качества смешивания разнородных волокон // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10(94). С. 151...159.

9. Рыжкова Е.А., Исаева Е.А. Совершенствование контроля качества готовой ткани в отделочном производстве // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5(395). С. 53...58.

10. Куличенков Р.С., Рыжкова Е.А. Система автоматизированного отслеживания брака на нетканых материалах // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. С. 71...76.

11. Мокроусова А.А., Власенко О.М. Принцип действия разрывной машины // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. С. 116...122.

12. Годунов М.В. Анализ процесса формирования синтетических нитей как объекта // Сборник научных трудов кафедры автоматизации и промышленной электроники. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. С. 13...16.

REFERENCES

1. Polyakov A.E., Dubovitsky V.A., Chesnokov A.V., Filimonova E.M. Application of classical and intelligent methods for studying energy-saving modes of complex controlled electrical complexes of technological equipment: monograph. Moscow: MSUDT, 2013. 213 p. – ISBN 978-5-87055-175-3.

2. Polyakov A. E., Ivanov M. S., Filimonova E. M. Study of the free zone of transportation and winding of fibrous material of the unit for the production of bulk non-woven material as an object of the automatic control system // Collection of works of the Department of Automation and Industrial Electronics. Moscow: The Kosygin State University of Russia, 2023. P. 49...55.

3. Leonenkov A. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH environments. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010. 736 p. – ISBN 978-5-94157-087-4.

4. Polyakov A.E., Ivanov M.S., Ryzhkova E.A., Filimonova E.M. Statement of the task of studying multidimensional dynamic objects with complex deformation zones of fibrous materials // Fibre chemistry. 2021. Vol. 53, No. 1. P. 50...53.

5. Zimina E.L., Groshev I.M. Prediction of physical and mechanical properties of nonwoven materials manufactured by hot pressing // Collection of works of the 22nd International scientific and practical conference. St. Petersburg, 2019. P. 52...55.

6. Korolev D.O., Masanov D.V., Ryzhkova E.A. Control systems of an asynchronous motor based on the application of the fuzzy logic method. Comparative

analysis of various automation approaches // Collection of materials of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference named after Ya.V. Milman. Moscow: The Kosygin State University of Russia, 2024. P. 203...210.

7. Timoshenko A. N., Zinoviev V.P., Shustov Yu.S. Establishing the relationship between yarn strength and the properties of the initial fibers and twisting // Design and technology. 2023. № 96(138). P. 63...68.

8. Vinichenko S.N., Masanov D.V., Ryzhkova E.A. Analysis of the results of the experiment on assessing the quality of mixing of dissimilar fibers // Engineering Bulletin of the Don. 2022. No. 10 (94). P. 151...159.

9. Ryzhkova E.A., Isaeva E.A. Improvement of quality control methods of finished fabric in finishing production // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 5(395). P. 53...58.

10. Kulichenkov R.S., Ryzhkova E.A. Automated system for tracking defects on nonwoven materials // Collection of works of the Department of Automation and Industrial Electronics. Moscow: The Kosygin State University of Russia, 2019. P. 71...76.

11. Mokrousova A.A., Vlasenko O.M. The operating principle of a tensile testing machine // Collection of works of the Department of Automation and Industrial Electronics. Moscow: The Kosygin State University of Russia, 2023. P. 116...122.

12. Godunov M.V. Analysis of the process of forging synthetic threads as a control object // Collection of works of the Department of Automation and Industrial Electronics. Moscow: The Kosygin State University of Russia, 2019. P. 13...16.

Рекомендована кафедрой автоматизации и промышленной электроники РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 23.05.24.