

Применение двухэтапного метода линеаризации для получения инвариантных зависимостей критических характеристик одноосного растяжения образцов эластомеров в различных условиях испытаний

© Попок Владимир Николаевич

МИРЭА-Российский технологический университет. пр-т Вернадского, 78. г. Москва, 119454. Россия.

Тел.: +7 (499) 600-80-80, доб. 43005. E-mail: vnporok@mail.ru

Ключевые слова: эластомер, критические характеристики, прочность, деформация, температура, скорость растяжения, двухэтапная линеаризация, аппроксимация, обобщенные переменные и инвариантные зависимости.

Аннотация

Представлены результаты применения двухэтапного метода линеаризации и обобщения нелинейных и немонокотных зависимостей для критических, в том числе предельных, характеристик одноосного растяжения образцов группы эластомеров в разных температурных и скоростных условиях с получением инвариантных уравнений регрессии с высоким значением коэффициента корреляции. В качестве критических параметров экспериментальных зависимостей напряжение-деформация используются напряжение и деформация, соответствующие разрушению образца или максимуму напряжения. Построение обобщенных зависимостей проводится до настоящего времени с использованием большого перечня обобщенных переменных, а также коэффициентов трансформации к базовой зависимости. При этом зависимости в исходных и обобщенных переменных являются, как правило, нелинейными и немонокотными, что вызывает определенные трудности в оценке корректности операций трансформации зависимостей. Дополнительным негативным фактором, свойственным практически всем исходным и обобщенным зависимостям для напряжений и деформаций, является неоднородность данных. Группы данных полученных, например, при фиксированной температуре и наборе скоростей растяжения имеют разные знаки коэффициентов корреляции с обобщенной кривой в области изменения переменных. Метод двухэтапной линеаризации, предложенный нами ранее, нелинейных и немонокотных зависимостей, показал эффективность при решении задач линеаризации и получения обобщенных инвариантных эмпирических зависимостей, связанных с эксплуатационными свойствами разных классов эластомеров. Обобщенные (инвариантные) зависимости получают непосредственно в процессе двухэтапной линеаризации исходных зависимостей, как следствие их общих геометрических характеристик, или при совмещении прямых линий корректными операциями трансляции и поворота. В работе с использованием двухэтапного метода линеаризации широкой группы типовых эмпирических зависимостей получены инвариантные линейные соотношения для критических характеристик одноосного растяжения в разных условиях образцов эластомеров: натурального каучука, бутилкаучука, фторсодержащего полимера Витон В, бутадиенстирольного каучука и отвержденных композиций на основе азидного полимера. Показано, что использование в качестве одной из переменных, частных или комплексных параметров, характеризующих условия нагружения, приводит к нескольким областям линейности, обусловленным неоднородностью данных.

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Попок В.Н. Применение двухэтапного метода линеаризации для получения инвариантных зависимостей критических характеристик одноосного растяжения образцов эластомеров в различных условиях испытаний. *Бутлеровские сообщения*. 2026. Т.87. №9. С.43-54. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-43

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Попок В.Н. Применение двухэтапного метода линеаризации для получения инвариантных зависимостей критических характеристик одноосного растяжения образцов эластомеров в различных условиях испытаний. *Бутлеровские сообщения В*. 2026. Т.14. №3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-43/ROI-jbc-B/26-14-3-5 (Russian)

The output for citing the English online version of the article:

Vladimir N. Popok. Application of a two-stage linearization method to obtain invariant dependences for critical characteristics of uniaxial tension of elastomer samples under different test conditions. *Butlerov Communications B*. 2026. Vol.14. No.3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-43/ROI-jbc-B/26-14-3-6

Литература

- [1] T.L. Smith. Ultimate Tensile Properties of Elastomers. II. Comparison of Failure Envelopes for Unfilled Vulcanizates. *Journal of Applied Physics*. **1964**. Vol.35. №1. P.27-36. DOI:10.1063/1.1713094
- [2] T.L. Smith. Dependence of the Ultimate Properties of a GR-S Rubber on Strain Rate and Temperature. *Journal of Polymer Science*. **1958**. Vol.32. №124. P. 99-113. DOI:10.1002/pol.1958.1203212409
- [3] Mechanics and Chemistry of Solid Propellants. *Proceedings of the Fourth Symposium on Naval Structural Mechanics*. Pergamon Press. **1967**. 627p.
- [4] L.R.G. Treloar. The Physics of Rubber Elasticity. Oxford. **1975**. 310p.
- [5] M.F. Bukhina and S.K. Kurlyand. Low-Temperature Behaviour of Elastomers. *Leiden – Boston*. **2007**. 188p.
- [6] D.W. van Krevelen, K. te Nijenhuis. Properties of Polymers. Their Correlation with Chemical Structure. Elsevier. **2009**. 1004p.
- [7] Попок В.Н. Корреляция физико-механических характеристик смесевых энергетических материалов. *Бутлеровские сообщения*. **2017**. Т.49. №3. С.135-146. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/17-49-3-135. [V.N. Popok. Correlation of physical-mechanical characteristics composition power materials. *Butlerov Communications*. **2017**. Vol.49. No.3. P.135-146. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/17-49-3-135].
- [8] Попок В.Н., Бычин Н.В. Инвариантные корреляционные зависимости между физико-механическими характеристиками полимерных композиций. *Бутлеровские сообщения*. **2022**. Т.69. №3. С.1-20. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-69-3-1 [V.N. Popok, N.V. Bychin. Invariant correlation dependences between physicomachanical characteristics of polymeric compositions. *Butlerov Communications A*. **2022**. Vol.3. No.2. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-A/22-3-2-5]
- [9] J. Bergström. Mechanics of solid polymers. Theory and computational modeling. Elsevier. **2015**. 509p.
- [10] A.S. Ermilov, E.M. Nurullaev. Mechanical properties of elastomers filled with solid particle. *Mechanics of Composite Materials*. **2012**. Vol.48. No.3. P.243-252.
- [11] J.E. Mark. Elastic Properties of model polymer networks. *Pure and Appl.Chem*. **1981**. Vol.53. No.8. P.1495-1503. DOI:10.1351/pac198153081495
- [12] Мошев В.В., Свистков А.Л., Гаришин О.К. и др. Структурные механизмы формирования механических свойств зернистых полимерных композитов. *Екатеринбург: Изд-во УрО РАН*. **1997**. 508с. [V.V. Moshev, A.L. Svistkov, O.K. Garishin and others. Structural mechanisms of formation of mechanical properties of granular polymer composites. *Ekaterinburg: Publishing House of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. **1997**. 508p. (Russian)]
- [13] Закс А. Статистическое оценивание. Москва: Статистика. **1976**. 598с. [A. Zaks. Statistical evaluation. Moscow: Statistics. **1976**. 598p. (Russian)]
- [14] Y. Oyumi. Mechanical properties of plateau burn azide composite propellants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. **1999**. Vol.24. No.5. P.249-254. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4087(199908)24:4<249::AID-PREP249>3.0.CO;2-R
- [15] Попок В.Н. Корреляционные инварианты кривых напряжение-деформация одноосного растяжения полимерных композиций. *Бутлеровские сообщения*. **2023**. Т.74. №4. С.1-11. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-74-4-1. [V.N. Popok. Correlation invariants of stress-strain curves of uniaxial stretching of polymer compositions. *Butlerov Communications A*. **2023**. Vol.5. No.2. Id.1. DOI: 10.37952/ROI-jbc-A/23-5-2-1]
- [16] Попок В.Н. Инвариантные корреляционные зависимости для характеристик горения полимерных композиций. *Бутлеровские сообщения*. **2023**. Т.74. №5. С.75-86. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-74-5-75. [V.N. Popok. Invariant correlation dependencies for the combustion characteristics of polymer compositions. *Butlerov Communications B*. **2023**. Vol.5. No.2. Id.8. DOI:10.37952/ROI-jbc-B/23-5-2-8]
- [17] Попок В.Н., Бычин Н.В. Корреляционные инварианты для скорости горения и параметров агломерации алюминия ряда полимерных композиций. *Бутлеровские сообщения*. **2023**. Т.75. №7. С.40-52. DOI:10.37952/ROI-jbc-01/23-75-7-40. [V.N. Popok, N.V. Bychin. Correlation Invariants for the Burning Rate and Aluminum Sintering Parameters of a Number of Polymer Compositions. *Butlerov Communications B*. **2023**. Vol.6. No.3. Id.1. DOI: 10.37952/ROI-jbc-B/23-6-3-1.]
- [18] Попок В.Н. Инвариантные корреляционные зависимости характеристик термического разложения компонентов и полимерных композиций на их основе. *Бутлеровские сообщения*. **2023**. Т.76. №12. С.29-41. DOI:10.37952/ROI-jbc-01/23-76-12-29. [V.N. Popok. Invariant correlations thermal decomposition characteristics components and polymer compositions based on them. *Butlerov Communications B*. **2023**. Vol.6. No.4. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-12-29/ROI-jbc-B/23-6-4-5]
- [19] Попок В.Н. Сложные кинетические зависимости термического разложения энергоемких соединений – линеаризация и определение кинетических констант. *Бутлеровские сообщения*. **2024**. Т.78. №6. С.43-54. DOI:10.37952/ROI-jbc-01/24-78-6-43. [V.N. Popok. Complex kinetic dependences of thermal decomposition of energy-intensive compounds – linearization and determination of kinetic constants. *Butlerov Communications B*. **2024**. Vol.7. No.2. Id.10. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-78-6-43/ROI-jbc-B/24-7-2-10]
- [20] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва: Наука. **1978**. 832с. [G. Korn, T. Korn. Handbook of Mathematics. Moscow: Nauka. **1978**. 832p. (Russian)]
- [21] Ермилов А.С., Нуруллаев Э.М. Концентрационная зависимость усиления каучуков и резин дисперсными наполнителями. *Журнал прикладной химии*. **2012**. Т.85. №8. С.1371-1374. DOI:10.15593/2224-9982/2015.41.10 [A.S. Ermilov, E.M. Nurullaev. Concentration dependence of

- ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЭТАПНОГО МЕТОДА ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ... _____ 43-54
reinforcement of rubbers and rubbers with dispersed fillers. *Journal of Applied Chemistry*. **2012**. Vol.85. No.8. P.1371-1374. DOI:10.15593/2224-9982/2015.41.10 (Russian)]
- [22] P. Toulemonde, J. Diani, P. Gilormini, N. Desgardin, R. Nevière. Effects of small particles on the mechanical behavior and on the local damage of highly filled elastomers. *Journal of Materials Science*. **2017**. Vol.52 (2). P.878-888. DOI:10.1007/s10853-016-0383-9
- [23] Попок В.Н., Попок Н.И. Критические характеристики и некоторые свойства полимерных композиций, содержащих высокодисперсный гексанитрогексаазазисовурцитан. *Бутлеровские сообщения*. **2019**. Т.60. №10. С.146-159. ROI: jbc-01/19-60-10-146 [V.N. Popok, N.I. Popok. Critical characteristics and some properties of polymer compositions containing highly dispersed hexanitrohexaazaisovurcitan. *Butlerov Communications*. **2019**. Vol.60. No.10. P.146-159. ROI: jbc-02/19-60-10-146]
- [24] Попок В.Н., Попок Н.И. Перколяция в смешанных энергетических материалах. Характеристики горения, зажигания и чувствительности смесей к механическим воздействиям. *Бутлеровские сообщения*. **2014**. Т.39. №8. С.1-16. ROI: jbc-01/14-39-8-1. [V.N. Popok, N.I. Popok. Percolation in mixed energy materials. Characteristics of burning, ignition and sensitivity of mixtures to mechanical stress. *Butlerov Communications*. **2014**. Vol.39. No.8. P.1-16. ROI: jbc-02/14-39-8-1]
- [25] K. Matous, H.M. Inglis, X. Gu, D. Rypl, T.L. Jackson, P.H. Geubelle. Multiscale modeling of solid propellants: From particle packing to failure. *Composites Science and Technology*. **2007**. Vol.67. P.1694-1708.
- [26] Попок В.Н. Изокинетическая температура термического разложения энергетических соединений, проблемы определения и связь с другими параметрами термической чувствительности. *Бутлеровские сообщения*. **2024**. Т.80. №12. С.66-75. DOI:10.37952/ROI-jbc-01/24-80-12-66. [V.N. Popok. Isokinetic temperature of thermal decomposition of energetic compounds, features of determination and connection with other parameters of thermal sensitivity. *Butlerov Communications B*. **2024**. Vol.9. No.4. Id.10. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-12-66/ROI-jbc-B/24-9-4-10]
- [27] Vladimir N. Popok. Application of a two-stage linearization method to obtain invariant dependences for critical characteristics of uniaxial tension of elastomer samples under different test conditions. *Butlerov Communications B*. **2026**. Vol.14. No.3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-43/ROI-jbc-B/26-14-3-6
- [28] Попок В.Н. Применение двухэтапного метода линеаризации для получения инвариантных зависимостей критических характеристик одноосного растяжения образцов эластомеров в различных условиях испытаний. *Бутлеровские сообщения B*. **2026**. Т.14. №3. Id.5. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-43/ROI-jbc-B/26-14-3-5 (Russian)

The English version of the article has been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications B
Advances in Chemistry & Thermophysics

The Reference Object Identifier – ROI-jbc-B/26-14-3-5

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-43/ROI-jbc-B/26-14-3-5

**Application of a two-stage linearization method to obtain
invariant dependences for critical characteristics of uniaxial
tension of elastomer samples under different test conditions**

Vladimir N. Popok

MIREA – Russian Technological University. Vernadsky Ave., 78. Moscow, 119454.

Russia. Phone: +7 (499) 600-80-80, ext. 43005. E-mail: vnpopok@mail.ru

Keywords: elastomer, critical characteristics, strength, deformation, temperature, tensile velocity, two-stage linearization, approximation, generalized variables and invariant dependencies.

Abstract

The results of applying a two-stage linearization method for the generalization of nonlinear and non-monotonic dependences of critical (including ultimate) characteristics of uniaxial tension of a group of elastomer samples under different temperature and strain-rate conditions are presented, yielding invariant regression equations with high correlation coefficients. The stress and strain at break or at the maximum stress point are used as critical parameters of the experimental stress–strain relationships. To date, the construction of generalized dependences has employed a wide range of generalized variables and shift factors relative to a master curve. However, the dependences in both the original and generalized variables are generally nonlinear and non-monotonic, which complicates the assessment of transformation correctness. An additional negative factor inherent in virtually all original and generalized dependences for stresses and strains is data heterogeneity. Groups of data obtained, for example, at a fixed temperature and a set of strain rates exhibit different signs of the correlation coefficient with the master curve over the domain of variable variation. The two-stage linearization method proposed earlier for nonlinear and non-monotonic dependences has demonstrated effectiveness in solving linearization problems and obtaining generalized invariant empirical dependences related to the operational properties of different classes of elastomers. Generalized (invariant) dependences are obtained directly in the process of two-stage linearization of the original dependences, as a consequence of their common geometric characteristics, or by combining straight lines through correct translation and rotation operations. Using the two-stage linearization method for a wide group of typical empirical dependences, invariant linear relations were obtained for the critical characteristics of uniaxial tension under different conditions of elastomer samples: natural rubber, butyl rubber, Viton B fluorinated polymer, styrene–butadiene rubber, and cured compositions based on an azide polymer. It is shown that the use of partial or complex parameters characterizing the loading conditions as one of the variables leads to several regions of linearity due to data heterogeneity.