

Разработка модели сортировки полимерных изоляторов

Б.М. Шифрин^{1a}, Д.А. Попова^{2b}, В.А. Соколова^{3c}, С.А. Мешков^{4d}, С.В. Алексеева^{5e}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

² АО «НПО «Изолятор»», ул. Михайлова, 11, Санкт-Петербург, Россия

³ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

^a shifrinb@mail.ru, ^b lesingle23malibu@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d meshkovcergey@mail.ru, ^e pum222@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-5377-741X>, ^b <https://orcid.org/0009-0007-4006-1018>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

^d <https://orcid.org/0009-0003-0741-6522>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Статья поступила 24.10.2023, принята 03.11.2023

В данной статье предлагается подход к систематизации факторов, влияющих на процесс сортировки полимерных изоляторов по качеству, с последующей разработкой модели на базе нечеткой логики. Предметом рассмотрения являются приемо-сдаточные испытания готовой продукции, которые проводятся отделом технического контроля с целью проверки пригодности к поставке и использованию конечной продукции (изоляторов) потребителям. Приемо-сдаточные испытания полимерных изоляторов включают ряд процедур и тестов, которые выполняются для проверки соответствия изоляторов требованиям и стандартам безопасности, качества и производительности. Конкретные испытания и процедуры испытаний могут различаться в зависимости от конкретного применения и требований заказчика. Были рассмотрены и проанализированы свертка габаритных размеров с чертежом; испытания на герметичность для исключения возможности проникновения влаги или других вредных веществ через изоляционный материал; визуальный контроль внешнего вида каждого изолятора (не допускаются нарушения состояния целостности резины — царапины, порывы, расслоение, поджоги, посторонние включения, пузыри, недолиты); испытания на растяжение, чтобы убедиться, что изоляторы способны выдерживать требуемые механические нагрузки без деформации или разрушения; электроиспытания (необходимо убедиться, что изоляторы имеют достаточные изоляционные свойства для предотвращения протекания электрического тока и предоставления надлежащей изоляции). Предлагаемая модель реализована с помощью алгоритма Мамдани в пакете FuzzyLogic, входящем в состав среды MatLab и позволяющем создавать системы нечеткого вывода и нечеткой классификации. Модель построена и протестирована для нескольких основных параметров. Дальнейшие исследования должны быть направлены на увеличение количества учитываемых факторов и автоматизацию процессов испытаний и контроля.

Ключевые слова: полимерный изолятор; приемо-сдаточные испытания; сортировка; адгезия; нечеткая логика; функция принадлежности; база правил.

Development of a model for sorting polymer insulators

B.M. Shifrin^{1a}, D.A. Popova^{2b}, V.A. Sokolova^{3c}, S.A. Meshkov^{4d}, S.V. Alekseeva^{5e}

¹ St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

² JSC «NPO «Izolyator», 11, Mikhailov St., St. Petersburg, Russia

³ Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

⁴ Baltic State Technical University "VOENMECH" named after. D.F. Ustinov; 1, 1st Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

⁵ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, Russia

^a shifrinb@mail.ru, ^b lesingle23malibu@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d meshkovcergey@mail.ru, ^e pum222@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-5377-741X>, ^b <https://orcid.org/0009-0007-4006-1018>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

^d <https://orcid.org/0009-0003-0741-6522>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Received 24.10.2023, accepted 03.11.2023

This article proposes an approach to systematize the factors influencing the process of sorting polymer insulators by quality, followed by the development of a model based on fuzzy logic. The subject of this article is acceptance tests of finished products, which are carried out by the technical control department in order to verify the suitability for delivery and use of final products (insulators) to

consumers. Acceptance testing of polymer insulators involves a series of procedures and tests that are performed to verify that the insulators meet safety, quality and performance requirements and standards. Specific tests and test procedures may vary depending on the specific application and customer requirements. The verification of overall dimensions with the drawing, leak testing to eliminate the possibility of moisture or other harmful substances penetrating through the insulating material and visual inspection of the appearance of each insulator (violations of the integrity of the rubber are not allowed: scratches, explosions, delamination, arson, foreign inclusions, bubbles, underfilling) are carried out. The tensile tests to ensure that the insulators are able to withstand the required mechanical loads without deformation or failure and electrical testing (it is necessary to ensure that insulators have sufficient insulating properties to prevent the flow of electrical current and provide adequate insulation) are performed. The proposed model is implemented using the Mamdani algorithm in the FuzzyLogic package, which is part of the MatLab environment and makes it possible to create fuzzy logical inference and fuzzy classification systems. The model is built and tested for several basic parameters. Further research should be aimed at increasing the number of factors taken into account and automating testing and control processes.

Keywords: polymerinsulator; acceptance tests; sorting; adhesion; fuzzy logic; membership function; rule base.

Введение. НПО «Изолятор» производит полимерные изоляторы (устройства, предназначенные для изоляции крепления проводов воздушных линий электропередачи и распределительных устройств электростанций и подстанций, а также токоведущих частей в электрических аппаратах) из высококачественных композитных материалов. В производстве используются передовые технологии — опрессовка металлическими оконцевателями, оцинкованными термодиффузионным или горячим цинком.

Конструкция типового полимерного изолятора изображена на рис. 1.

НПО «Изолятор» планирует, разрабатывает и реализует процессы, обеспечивающие стабильное производство качественных изделий в соответствии с процессной моделью (рис. 2).

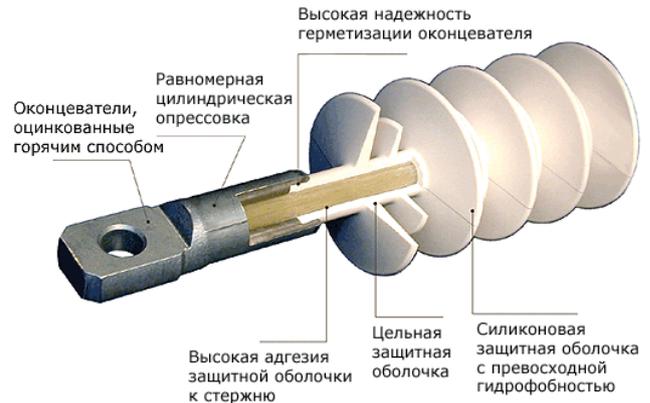


Рис. 1. Конструкция полимерного изолятора

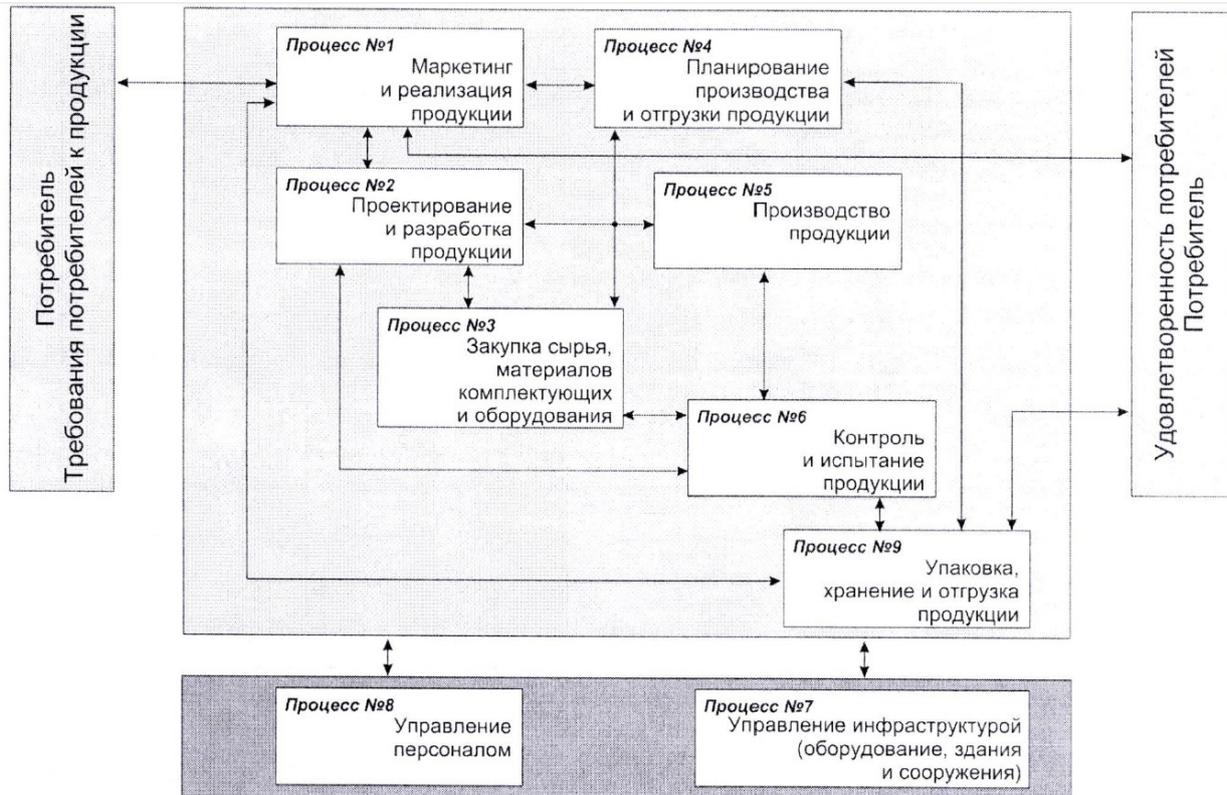


Рис. 2. Процессная модель системы менеджмента качества НПО «Изолятор»

Безусловно, одним из ключевых процессов является контроль и испытание продукции. Как видно на рис. 2, данный процесс состоит из четырех основных этапов:

- входной контроль поступающих на предприятие материально-технических запасов;

- операционный контроль для выявления несоответствующей продукции в процессе производства;
- приемо-сдаточные испытания (ПСИ) готовой продукции;
- выявление несоответствующей продукции в процессе хранения.

Описание объекта исследования. Предметом рассмотрения данной статьи являются приемо-сдаточные испытания готовой продукции, которые проводятся отделом технического контроля с целью проверки пригодности к поставке и использованию конечной продукции (изоляторов) потребителям.

В частности, нарушение целостности резины может привести к ухудшению электрической изоляции и повышению вероятности возникновения короткого замыкания или других повреждений в системе. Помимо этого, влага может вызвать окисление или коррозию металлических элементов изолятора, что также приводит к его деградации. В итоге разрушение целостности резины и попадание влаги могут серьезно повлиять на безопасность и надежность работы электрооборудования.

Зачищенные от облоя изоляторы поступают в цех ОТК, где контролеры проверяют соответствие геометрическим параметрам

чертежа, внешний вид, качество цинкового покрытия оконцевателей, механическую прочность изоляторов на растяжение и изгиб, электрические параметры (наличие частичных разрядов и выдерживаемое кратковременное напряжение в сухом состоянии). На каждую партию изоляторов, прошедшую контроль, делается запись в журнале ПСИ, и оформляется протокол ПСИ согласно стандарту предприятия.

Конечно, выпускаемая продукция проходит контроль качества не только на стадии ПСИ, но и на каждой технологической операции (рис. 3). На предприятии внедрена система менеджмента качества в соответствии с международным стандартом ИСО 9001:2015. Ежегодно продукция предприятия проходит сертификацию, подтверждающую достаточно высокое качество изделий.

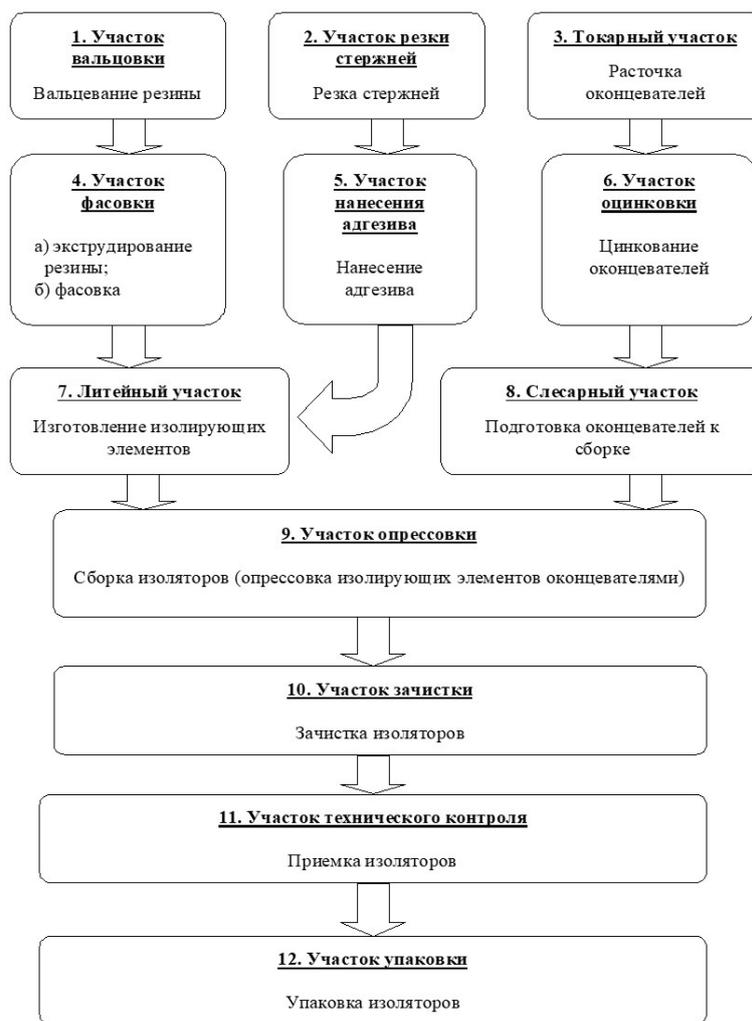


Рис. 3. Технологический процесс изготовления полимерных изоляторов

При этом необходимо указать на отсутствие достоверных методов диагностики полимерных изоляторов [1]. Регулярный мониторинг и инспекция изоляции являются важными составляющими поддержания надежности системы. Они позволяют выявлять начальные стадии дефектов и предпринимать меры по их устранению до возникновения серьезных последствий.

Кроме того, разработка новых методов контроля и диагностики полимерных изоляторов продолжается. Например, автоматизированные системы мониторинга, использующие различные физические параметры, такие как емкость, прочность, акустические характеристики и др., мо-

гут предоставлять более точную и надежную информацию о состоянии изоляции.

Таким образом, хотя существующие методы контроля не могут полностью предсказать рабочий ресурс полимерных изоляторов, систематический мониторинг и использование новых технологий позволяют своевременно обнаруживать дефекты и принимать меры по их устранению, что способствует повышению надежности и безопасности работы электрооборудования. Дефекты могут проявлять себя не сразу, на рис. 4 фотографии прогоревшего спустя четыре года эксплуатации изолятора.



Рис. 4. Сгоревший изолятор

Отсутствует обобщенная многоэтапная модель ПСИ, отдельные проверочные процедуры не позволяют в полной степени автоматизировать процесс как отдельных испытаний и контроля, так и отнесения образца к годным, требующим ремонта или доработок, или к неремонтопригодным (брак).

Перечислим, опишем и, по возможности, формализуем отдельные стадии испытаний и контроля для конкретной марки изолятора, основываясь на стандартах предприятия и многолетнем опыте специалистов.

В данной статье мы выбрали из более 12 тыс. наименований полимерный изолятор ПСПКр 70-3/06 ППП (рис. 5, 6), где: П – подвесной; С – стержневой; П – полимерный; К – кремнийорганическая оболочка; Р – ребристый; 70 – нормированная разрушающая нагрузка на растяжение; 3 – нормированное рабочее напряжение, кВ; 0,6 – длина пути утечки; П – птицезащищенный; Г – гнездо (оконцеватель); П – пест (оконцеватель).

Изолятор состоит из оконцевателей (верх «гнездо» КИ 20.00.02, низ «пестик» КИ 20.00.01), стеклостержня (стекловолокно пропитано смолой), ребристой полимерной защитной оболочки.

Адгезив наносится ровно на 2 мм выше опрессовочной части равномерно по всей части тяги до другого оконцевателя, захватывая опрессовочное место оконцевателя.

Данный изолятор устанавливают на силовые линии электропередач на электрифицированных железных дорогах.



Рис. 5. Полимерный изолятор



Рис. 6. Тяга – заготовка

1. *Сверка габаритных размеров с чертежом.* При отклонении от заданного размера (292 мм) больше, чем на 10 мм, изделие, скорее всего, маркируется как брак, при прочих идеальных характеристиках — как годное изделие.

На начальном этапе опрессовки тяги опрессовщик для запуска партии сообщает ОТК, где производится контроль.

2. *Адгезия.* На каждом изоляторе необходимо проверить качество адгезии (плотность примыкания) изолирующей оболочки к оконцевателю, при этом не должно происходить отслоения. Если плотность примыкания более 10 мм, изделие маркируется как брак, от 1 до 10 мм — отправляется на доработку (подклейку), менее миллиметра — годно.

3. *Внешний вид.* Визуальный контроль внешнего вида изолятора играет важную роль в обнаружении потенциальных дефектов и повреждений. При проведении визуального контроля необходимо обратить внимание на следующие аспекты:

- Целостность резины: проверяется на наличие царапин, порывов, расслоений, поджогов и других видимых повреждений. Даже мелкие дефекты могут привести к ухудшению электрической изоляции и требуют внимания.

- Посторонние включения: проверяется на наличие посторонних материалов, которые могут попасть на изолятор в процессе изготовления, транспортировки или эксплуатации. Это могут быть пыль, грязь, металлические частицы и т. д.

- Пузыри и недоливы: проверяется наличие воздушных пузырей внутри резины, а также наличие недоливов, когда резина не заполнила полностью объем изолятора.

Эти дефекты могут снизить эффективность изоляции и должны быть устранены. При отсутствии каких-либо замечаний к внешнему виду изделие считается годным; при количестве ожогов меньше трех и одном постороннем включении на ребре требует доработки; при наличии двух пузырей (один на ребре, один на стеклостержне, расстояние между ними менее 80 мм) требует ремонта; иначе брак. При прочих идеальных характеристиках может попасть в соседнюю категорию качества (годный может потребовать доработки, требующий доработки нуждается в ремонте и т. д.).

4. *Испытание на растяжение.* Технические условия для изоляторов включают требования к их механической прочности и способности выдерживать нагрузки без повреждений. В частности, испытательная механическая растягивающая сила, которая применяется в испытаниях, равна 50 % от нормированной разрушающей механической силы изолятора.

Это означает, что изолятор должен выдержать нагрузку, эквивалентную половине силы, которая может привести к разрушению его целостности. Этот тест проводится в течение одной минуты, и если изолятор сохраняет свою целостность в течение этого времени, он считается соответствующим техническим требованиям.

Такие испытания помогают гарантировать, что изоляторы обладают необходимой механической прочностью и способностью выдерживать нагрузки в условиях эксплуатации. Это важно для обеспечения безопасной и надежной работы электрооборудования. Изоляторы, не прошедшие испытания на механическую прочность (ломается стеклостержень, сползает оконцеватель, ломаются ушки), однозначно маркируются как брак.

5. Электроиспытания. Испытания слоистых диэлектриков проводятся для проверки их изоляционных свойств и способности выдерживать повышенные напряжения в условиях эксплуатации. Для этого применяется кратковременное повышенное напряжение промышленной частоты 50 Гц с контролем утечки тока. При проведении испытаний необходимо приложить испытательное напряжение к тому оконцевателю изолятора, который в эксплуатации находится под напряжением. Это помогает оценить работоспособность изолятора в реальных условиях эксплуатации. Длительность испытательного напряжения для слоистых диэлектриков составляет 5 мин. Этот период времени достаточен для оценки стабильности и надежности работы изолятора при повышенных напряжениях. Контроль утечки тока в течение испытаний позволяет выявить наличие возможных дефектов или повреждений в изоляции, которые могут привести к утечке тока и снижению изоляционных свойств.

В зависимости от класса напряжения изолятора, установлены значения испытательного напряжения: класс напряжения 3 кВ — испытательное напряжение 24 кВ. При пробое изделие бракуется и передается в изолятор брака.

Даже из такого, не очень подробного описания стадий испытаний и контроля видно, что формальные требования ГОСТ не всегда дают возможность однозначной классификации изоляторов по качеству. В статье предлагается разработка модели оценки качества изоляторов и отнесения их к конкретной категории годности на основе нечеткой логики. Формализация способности экспертов к неточным или приближенным рассуждениям позволяет более адекватно описывать ситуации с неопределенностью [2–6]. Кроме того, появляется возможность не только отнести оцениваемый изолятор к тому или иному классу, но и выдать степень уверенности в данной оценке [7].

Результаты и их обсуждение. Предлагаемая модель реализована с помощью алгоритма Мамдани в пакете *FuzzyLogic*, входящем в состав среды *MatLab* и позволяющем создавать системы нечеткого логического вывода и нечеткой классификации. В соответствии со стандартами предприятия и формализованным выше многолетнем опытом специалистов, изолятор по результатам интегральной оценки пяти факторов (сверка габаритных размеров с чертежом — *Size*, адгезия — *Adhesion*, внешний вид — *Appearance*, испытание на растяжение — *Strength*, электроиспытания — *Electrical*) может быть признан годным (*Excellent*), требующим доработки (*Revision*) или ремонта (*Defect*), или бракованным и неремонтопригодным (*Useless*) (рис. 7) [8–14].

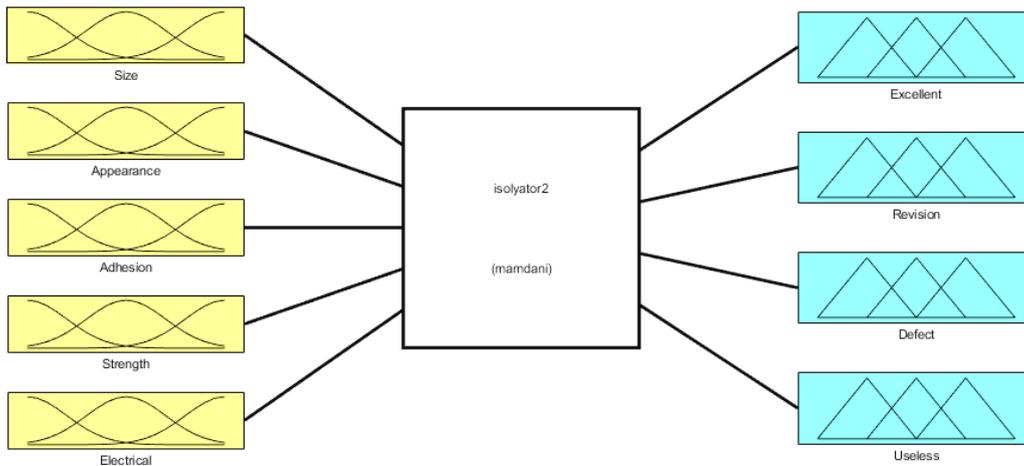


Рис. 7. Модель сортировки полимерных изоляторов

Функции принадлежности входных и выходных переменных приведены на рис. 8–12.

Составленная в соответствии со стандартами и опытом специалистов база правил приведена на рис. 13.

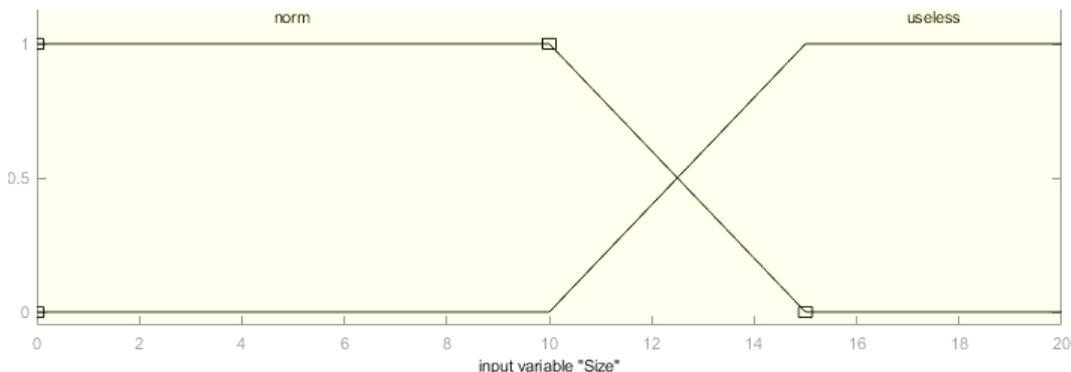


Рис. 8. Функции принадлежности входа *Size*

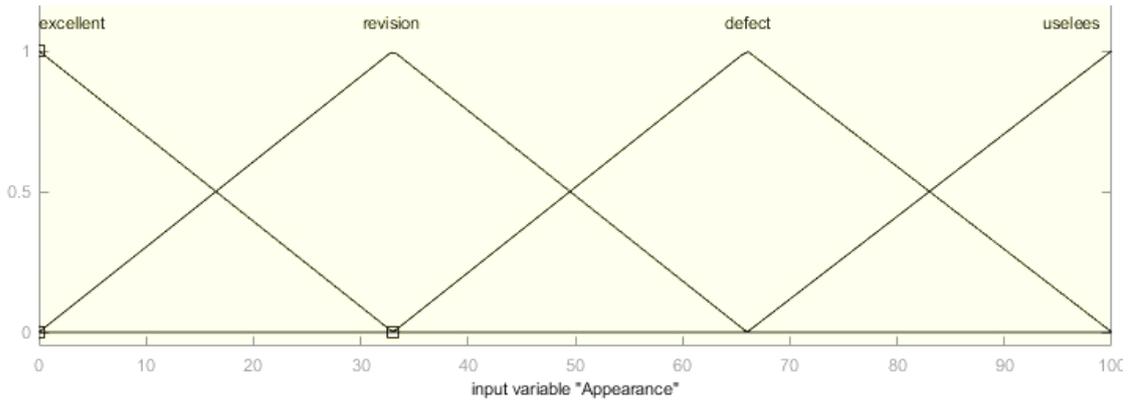


Рис. 9. Функции принадлежности входа *Appearance*

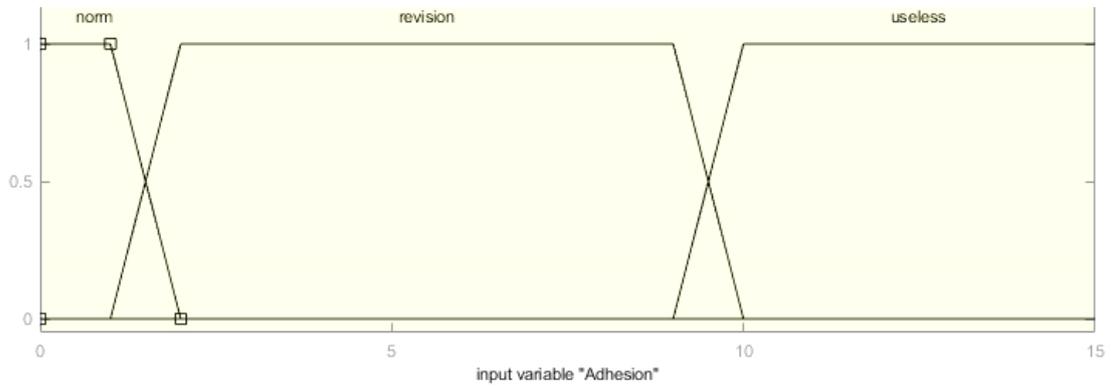


Рис. 10. Функции принадлежности входа *Adhesion*

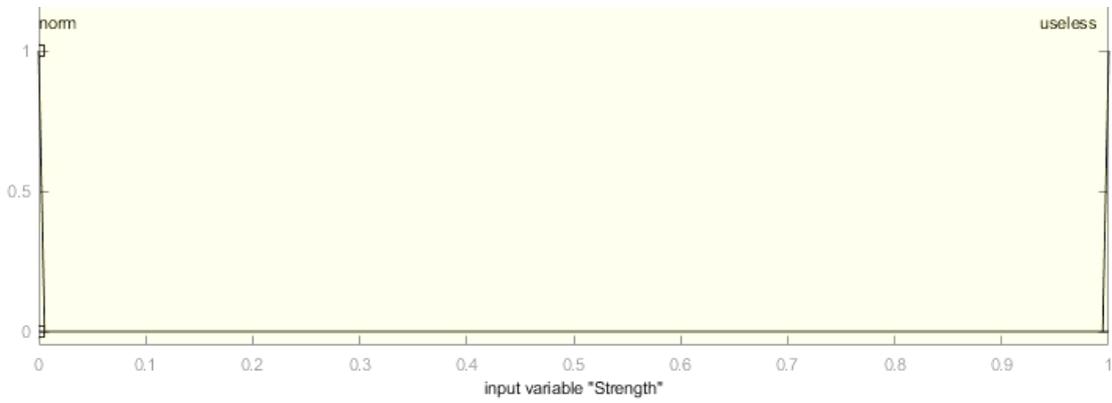


Рис. 11. Функции принадлежности входов *Strength* и *Electrical*

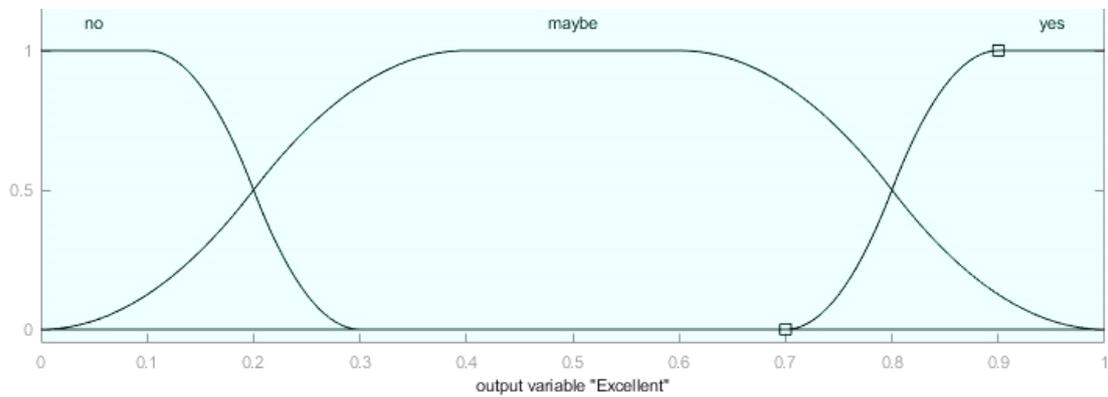


Рис. 12. Функции принадлежности всех выходов

If Size is norm and Appearance is excellent and Adhesion is norm and Strength is norm and Electrical is norm then Excellent is yes, Revision is maybe, Defect is no, Useless is no
If Size is norm and Appearance is revision and Adhesion is norm and Strength is norm and Electrical is norm then Excellent is maybe, Revision is yes, Defect is maybe, Useless is no
If Size is norm and Appearance is defect and Adhesion is norm and Strength is norm and Electrical is norm then Excellent is no, Revision is maybe, Defect is yes, Useless is maybe
If Size is norm and Appearance is useless and Adhesion is norm and Strength is norm and Electrical is norm then Excellent is no, Revision is no, Defect is maybe, Useless is yes
If Size is useless and Appearance is not useless and Adhesion is norm and Strength is norm and Electrical is norm then Excellent is no, Revision is no, Defect is maybe, Useless is yes
If Size is useless and Appearance is useless then Excellent is no, Revision is no, Defect is no, Useless is yes
If Adhesion is useless or Strength is useless or Electrical is useless then Excellent is no, Revision is no, Defect is no, Useless is yes
If Adhesion is revision then Excellent is no, Revision is yes, Defect is maybe, Useless is no

Рис. 13. База правил

Пример поверхности «вход – выход», соответствующей синтезируемой нечеткой системе, приведен на рис. 14.

Тестирование построенной модели заключается в задании значений входных переменных, при этом искомый итог рассчитывается программой посредством дефаздификации [15–20]. На

рис. 15 видно, что при адгезии 5 мм и удовлетворительных результатах остальных испытаний изолятор нуждается в доработке и, скорее всего, является ремонтпригодным. Полученные на модели результаты соответствуют практике.

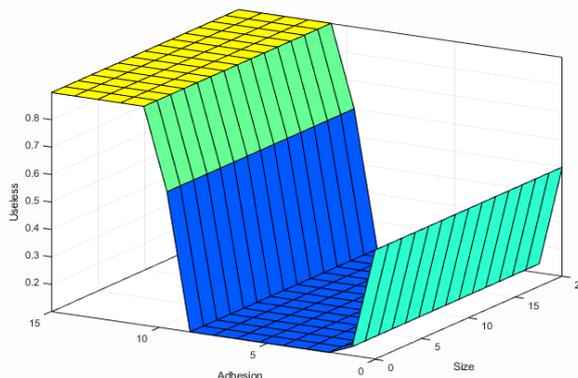


Рис. 14. Зависимость выходной переменной *Useless* от входных переменных *Size* и *Adhesion*

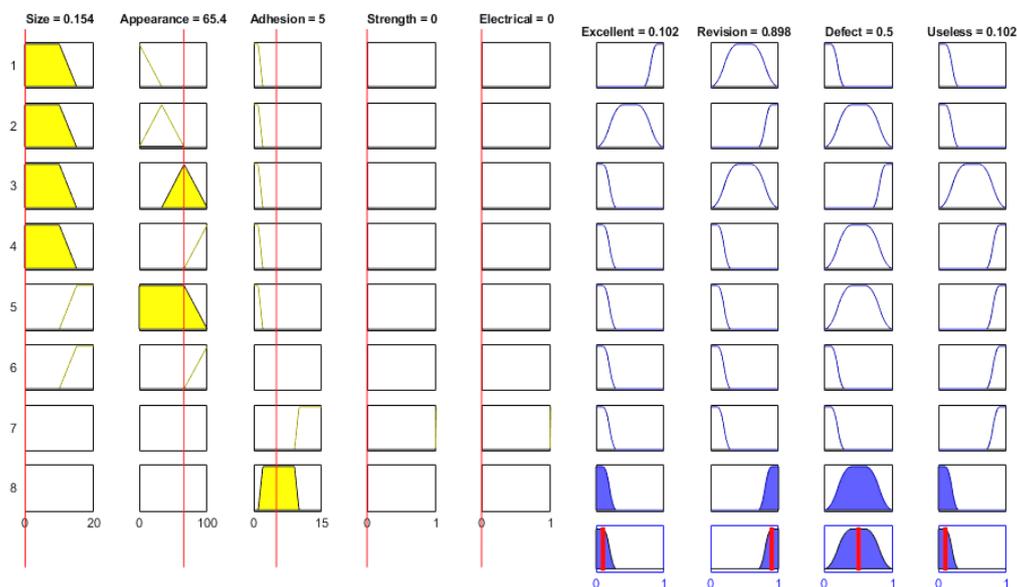


Рис. 15. Тестирование построенной модели

Таким образом, в данной статье предложен подход к систематизации факторов, влияющих на процесс сортировки полимерных изоляторов, с последующей разработкой модели на базе нечеткой логики. Модель построена и протестирована

для нескольких основных параметров. Дальнейшие исследования должны быть направлены на увеличение количества учитываемых факторов и автоматизацию процессов испытаний и контроля.

Литература

1. Глебов И. Надежность полимерных изоляторов: миф или реальность? // Энергетика и промышленность России. 2011. № 1-2 (165-166) [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.eprussia.ru/epr/165/12550.htm?ysclid=lopi4yrb9m488990808> (дата обращения: 08.11.2023).
 2. Прокопчина С.В., Шестопалов М.Ю., Уткин Л.В., Куприянов М.С., Лазарев В.Л., Имаев Д.Х., Горохов В.Л., Жук Ю.А., Спесивцев А.В. Управление в условиях неопределенности: моногр. СПб., 2014. 304 с.

3. Соколова В.А., Иванов А.М. Применение теории нечетких множеств в технологии отделки древесины // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2021): материалы Двенадцатой Междунар. науч.-технической конф. (29-30 июня 2021 г.). Вологда, 2021. С. 163-165.
4. Уткин Л.В., Жук Ю.А. Робастная модель классификации с учетом значимости классов // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. 2015. Т. 2. С. 9-13.
5. Ivanov A.M., Markov V.A., Sokolova V.A., Orekhovskaya A.A. Development of elements of an automated intelligent quality management system // Scientific progress - creativity of the young. 2022. № 1. P. 350-352.
6. Шеховцов О.И., Шифрин Б.М. Разработка модели управления варочной установкой на основе нечеткой логики // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2008. № 1. С. 8-14.
7. Шифрин Б.М. Разработка модели процесса контроля качества поверхности древесностружечных плит на основе нечеткой логики // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2017. № 5. С. 39-43.
8. Shifrin B.M., Eliseev I.V., Sokolova V.A. Development of the external control model of online courses quality indicators // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 6, Politics, Industry, Science, Education (St. Petersburg, 26-28 may 2021 yr.). St. Petersburg, 2021. P. 012069.
9. Нуриева А.М., Пронин Е.А., Кутуева Ю.Р., Павленкова А.А. Обзор материалов для изготовления изоляторов // Наука через призму времени. 2021. № 8 (53). С. 6-9.
10. Сафонов А., Сафонов Л. Прямоугольные электрические соединители. Основные принципы системы менеджмента качества предприятия, выпускающего электронные компоненты // Технологии в электронной пром-сти. 2008. № 1 (21). С. 68-71.
11. Галкин А.Г., Митрофанов А.Н., Митрофанов С.А. Методика проведения риск-анализа и прогнозирования показателей качества состояния контактной сети // Вестн. Самарского муниципального ин-та управления. 2011. № 3 (18). С. 172-182.
12. Уткин Л.В., Селиховкин И.А. Модель классификации на основе расширенной обучающей выборки с использованием доверительных интервалов параметров распределений вероятностей признаков // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. № 198. С. 239-248.
13. Голубь Н.Н., Букреева И.Н. Контроль качества производственных процессов при освоении новой продукции // Экономинфо. 2009. № 11. С. 33-37.
14. Гайворонский А.С. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика при эксплуатации // Главный энергетик. 2010. № 2. С. 23-27.
15. Матузov М.И., Лисихин Д.В., Хованский А.Е. Виды повреждения полимерных изоляторов на контактной сети железных дорог и их диагностирование в процессе эксплуатации // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 10 (26). С. 373-378.
16. Uemura S., Yoshida M., Hoshino S. Investigation for surface modification of polymer as an insulator layer of organic FET // Thin Solid Films. 2003. V. 438-439. P. 378-381.
17. Cho Y.S., Kim S.W., Lee H.K., Shim M.J. Characteristics of polymer insulator materials: Fractal characteristics of electrical tree in DGE-BA/MDA/nitrile system // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2000. V. 6. № 1. P. 13-18.
18. Cho H.G., Lee U.Y., Kang S.H. Electrical property of polymer insulator with end-fitting design // Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN (19-22 sept. 2004 yr.). Indianapolis, IN, 2004. P. 296-299.
19. Wang L.M., Guan Z.C., Dai H.Q., Jiang X.B. Development of a humidity controllable insulator leakage current intelligent monitoring and controllable system // High Voltage Engineering. 2010. V. 36. № 8. P. 1950-1956.
20. Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В. Выбор методов и норм высоковольтных испытаний полимерных изоляторов // Электрические станции. 2023. № 8 (1105). С. 38-44.
1. Glebov I. Reliability of polymer insulators: myth or reality? // Power and Industry of Russia. 2011. № 1-2 (165-166) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.eprussia.ru/epr/165/12550.htm?ysclid=lopi4yrb9m488990808> (data obrashcheniya: 08.11.2023).
2. Prokopchina S.V., Shestopalov M.YU., Utkin L.V., Kupriyanov M.S., Lazarev V.L., Imaev D.H., Gorohov V.L., Zhuk YU.A., Spesivcev A.V. Management under conditions of uncertainty: monogr. SPb., 2014. 304 p.
3. Sokolova V.A., Ivanov A.M. Application of the theory of fuzzy sets in wood finishing technology // Intellektual'no-informacionnye tekhnologii i intellektual'nyj biznes (INFOS-2021): materialy Dvenadcatoy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (29-30 iyunya 2021 g.). Vologda, 2021. P. 163-165.
4. Utkin L.V., Zhuk YU.A. Robust classification model taking into account the significance of classes // Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. 2015. V. 2. P. 9-13.
5. Ivanov A.M., Markov V.A., Sokolova V.A., Orekhovskaya A.A. Development of elements of an automated intelligent quality management system // Scientific progress - creativity of the young. 2022. № 1. P. 350-352.
6. SHekhovcov O.I., SHifrin B.M. Development of a control model for a cooking unit based on fuzzy logic // Izvestiya SPbGETU «LETI». 2008. № 1. P. 8-14.
7. SHifrin B.M. Development of a model for the process of quality control of the surface of particle boards based on fuzzy logic // Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii. 2017. № 5. P. 39-43.
8. Shifrin B.M., Eliseev I.V., Sokolova V.A. Development of the external control model of online courses quality indicators // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 6, Politics, Industry, Science, Education (St. Petersburg, 26-28 may 2021 yr.). St. Petersburg, 2021. P. 012069.
9. Nurieva A.M., Pronin E.A., Kutueva YU.R., Pavlenkova A.A. Review of materials for the manufacture of insulators // Nauka cherez prizmu vremeni. 2021. № 8 (53). P. 6-9.
10. Safonov A., Safonov L. Rectangular electrical connectors. Basic principles of the quality management system of an enterprise that produces electronic components // Technologies in electronic industry. 2008. № 1 (21). P. 68-71.
11. Galkin A.G., Mitrofanov A.N., Mitrofanov S.A. Methodology for conducting risk analysis and forecasting quality indicators of the state of the contact network // Bulletin of the Samara municipal institute of management. 2011. № 3 (18). P. 172-182.
12. Utkin L.V., Selihovkin I.A. Classification model based on an extended training sample using confidence intervals of parameters of feature probability distributions // Izvestia SPbLTA. 2012. № 198. P. 239-248.
13. Golub' N.N., Bukreeva I.N. Quality control of production processes during the development of new products // Ekonominfo. 2009. № 11. P. 33-37.
14. Gajvoronskij A.S. Damage to polymer insulators and their diagnostics during operation // Glavnyj energetik. 2010. № 2. P. 23-27.
15. Matuzov M.I., Lisihin D.V., Hovanskiy A.E. Types of damage to polymer insulators on the contact network of railways and their diagnosis during operation // Alleya nauki. 2018. V. 1. № 10 (26). P. 373-378.
16. Uemura S., Yoshida M., Hoshino S. Investigation for surface modification of polymer as an insulator layer of organic FET // Thin Solid Films. 2003. V. 438-439. P. 378-381.
17. Cho Y.S., Kim S.W., Lee H.K., Shim M.J. Characteristics of polymer insulator materials: Fractal characteristics of electrical tree in DGE-BA/MDA/nitrile system // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2000. V. 6. № 1. P. 13-18.
18. Cho H.G., Lee U.Y., Kang S.H. Electrical property of polymer insulator with end-fitting design // Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN (19-22 sept. 2004 yr.). Indianapolis, IN, 2004. P. 296-299.
19. Wang L.M., Guan Z.C., Dai H.Q., Jiang X.B. Development of a humidity controllable insulator leakage current intelligent monitoring and controllable system // High Voltage Engineering. 2010. V. 36. № 8. P. 1950-1956.
20. Varivodov V.N., Kovalev D.I., Golubev D.V. Selection of methods and standards for high-voltage testing of polymer insulators // Electrical stations. 2023. № 8 (1105). P. 38-44.

References