

Дятлов, И. Я. Система поддержки принятия решений для управления производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля / И. Я. Дятлов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2023. – № 2. – С. 61–71. DOI 10.15593/2499-9873/2023.2.06

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Дятлов, И. Я. Система поддержки принятия решений для управления производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля / И. Я. Дятлов. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2023.2.06 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2023. – № 2. – С. 61–71.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 2, 2023

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.06

УДК 51-74



Система поддержки принятия решений для управления производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля

И.Я. Дятлов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июня 2023

Одобрена: 22 июня 2023

Принята к публикации:
22 июня 2023

Финансирование

Работа подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-31-90045).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора

100 %.

Ключевые слова:

система поддержки принятия решений, алгоритм управления, технологический процесс, вулканизация, шивка, линия непрерывной вулканизации, изоляция, кабель, полимер, резина, математическое моделирование, теплообмен.

АННОТАЦИЯ

Предложена структурная модель системы поддержки принятия решения (СППР) для управления линией непрерывной вулканизации изоляции кабеля. СППР базируется на математической модели технологического процесса непрерывной вулканизации изоляции кабеля, базы данных, алгоритма коррекции режима. СППР позволит оперативно разработать новый режим в случае применения новых материалов или конструкций, а также корректировать текущий режим при внеплановых изменениях в ходе процесса производства.

Ядром СППР является предложенная математическая модель, которая основана на законах сохранения и представлена в виде системы дифференциальных уравнений, замкнутых граничными условиями. Процесс вулканизации описан с учетом температурно-временной зависимости кинетических параметров, что позволило учесть неравномерность нагрева заготовки как в радиальном направлении, так и по длине.

Численная реализация дифференциальной математической модели позволила провести системный анализ характера процессов в вулканизационной трубе и оценить влияние различных технологических, конструктивных и материальных параметров на степень завершенности вулканизации изоляции кабеля. В результате анализа выделены значимые параметры, существенно влияющие на степень завершенности процесса вулканизации. На основе полученных численных результатов построены технологические поверхности зависимости технологических параметров от геометрии изделия и свойств используемых материалов, предложена регрессионная математическая модель, которая позволяет определить значения управляющих параметров процесса, не прибегая к использованию математической модели.

На основе результатов анализа предложен алгоритм коррекции технологического режима, учитывающий лишь значимые параметры процесса. Предложенный алгоритм позволяет корректировать величину скорости изолирования в зависимости от внешних воздействий и отклонений от заданных параметров.

Результаты исследования могут быть использованы при производстве кабельно-проводниковой продукции с вулканизируемой изоляцией, когда необходимо оперативно выбрать технологический режим с учетом изменения в конструкции кабеля, свойств материала изоляции, а также возможные отклонения давления внутри вулканизационной трубы.

© ПНИПУ

© Дятлов Илья Яковлевич – аспирант, кафедра «Конструирование и технологии в электротехнике», e-mail: d.i.994@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-5909-8850.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Dyatlov I.Ya. Decision support system for power cable insulation vulcanization production line management. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2023, no. 2, pp. 61–71. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.06

MDPI and ACS Style: Dyatlov, I.Ya. Decision support system for power cable insulation vulcanization production line management. *Appl. Math. Control Sci.* **2023**, 2, 61–71. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.2.06>

Chicago/Turabian Style: Dyatlov, Ilya Ya. 2023. “Decision support system for power cable insulation vulcanization production line management”. *Appl. Math. Control Sci.* no. 2: 61–71. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.2.06>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES

№ 2, 2023

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.06

UDK 51-74



Decision support system for power cable insulation vulcanization production line management

I.Ya. Dyatlov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 June 2023
Approved: 22 June 2023
Accepted for publication:
22 June 2023

Funding

The work was prepared with the financial support of the RFBR grant (project No. 20-31-90045).

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest.

Author Contributions

100 %.

Keywords:

decision support system, control algorithm, technological process, vulcanization, crosslinking, continuous vulcanization line, insulation, cable, polymer, rubber, mathematical modeling, heat transfer.

ABSTRACT

The paper proposes a structural model of a decision support system for controlling a cable insulation continuous vulcanization line. The proposed decision support system is based on a mathematical model of the cable insulation continuous vulcanization technological process, a database, and a mode correction algorithm. The DSS will make it possible to quickly develop a new regime in case of using new materials or structures, as well as to correct the current regime in case of unplanned changes during the production process.

The core of the DSS is the proposed mathematical model, which is based on conservation laws and is presented as a system of differential equations closed by boundary conditions. The vulcanization process is described taking into account the temperature-time dependence of the kinetic parameters, which made it possible to take into account the uneven heating of the cable, both in the radial direction and along the length.

The numerical implementation of the differential mathematical model made it possible to carry out a systematic analysis of the nature of the processes in the vulcanization pipe and to evaluate the influence of various technological, structural and material parameters on the cable insulation vulcanization completion degree. As a result of the analysis, significant parameters were identified that significantly affect the vulcanization process completion degree. Based on the obtained numerical results, technological parameters dependence technological surfaces on the geometry of the product and the properties of the materials used were constructed, a regression mathematical model was proposed that allows determining the values of the process control parameters without resorting to the use of a differential mathematical model.

Based on the results of the analysis, an algorithm for correcting the technological regime is proposed, taking into account only significant process parameters. The proposed algorithm allows you to adjust the value of the isolation rate, depending on external influences and deviations from the specified parameters.

The results of the study can be used in the production of cable and wire products with vulcanizable insulation, when it is necessary to quickly select the optimal technological mode, take into account changes in the cable design, properties of the insulation material, as well as possible pressure deviations inside the vulcanization pipe.

© PNRPU

© Ilya Ya. Dyatlov – Ph.D. Student, Department of Design and Technology in Electrical Engineering, e-mail: d.i.994@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-5909-8850.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

В связи с развитием строительной, машиностроительной и энергетической отраслей промышленности возрастает потребность в кабелях с вулканизированной резиновой изоляцией [1]. Такие изделия применяются для электроснабжения подвижных составов железнодорожного транспорта, горнодобывающих агрегатов, строительной техники, а также для зарядки электротранспорта.

Процесс вулканизации является фундаментальным этапом при изготовлении резиновых изделий. Он играет важную роль в достижении точной формы с низким допуском, а также необходимых электротехнических и физико-механических свойств конечного продукта. Качество вулканизации изоляции имеет решающее значение для надежности и безопасности электрических систем и оборудования [2].

Поскольку получение качественного изделия зависит от многих параметров: геометрических, физических, кинетических, технологических, то необходимо провести системный анализ связи каждого из них с величиной степени сшивки и определить значимость параметров.

В процессе производства кабелей с резиновой изоляцией все вышеперечисленные параметры могут значительно изменяться и приводить к существенным отклонениям в температурных полях и степени вулканизации [3; 4]. В настоящее время управление осуществляется по проектному решению, не учитывающему возможные изменения (например, изменение состава резины). Очевидно, что необходимо сформировать базу данных, разработать математические модели, описывающие процесс вулканизации и тепломассообмена в вулканизационной трубе и позволяющие определить необходимые управляющие воздействия, на основе которых реализовать системы поддержки принятия решения (СППР) для управления агрегатом непрерывной вулканизации кабельной изоляции.

Внедрение СППР для управления установкой непрерывной вулканизации имеет несколько преимуществ. Прежде всего, система позволит значительно повысить точность и согласованность решений по управлению, снизить риск дефектов продукции и сократить количество брака, при этом определить причины технологических отклонений, что позволяет принимать более быстрые и эффективные меры.

Благодаря использованию разработанной СППР анализ больших объемов данных и предоставление необходимой информации могут осуществляться в короткие промежутки времени непосредственно в процессе производства, что поможет оптимизировать производственные процессы и сократить количество отходов, тем самым повысит эффективность производства.

Так как скорость процесса вулканизации зависит от температуры и времени пребывания материала при данной температуре, то для описания кинетического процесса необходимо рассматривать изменение температуры внутри исследуемой области во времени. В работах [5–13] предложен широкий класс математических моделей тепломассопереноса при исследовании процесса вулканизации для крупногабаритных изделий, в которых рассматриваемые процессы являются дискретными и протекают по иным законам.

Вулканизация, или сшивка изоляции проходит внутри вулканизационной трубы, где заготовка перемещается с заданной скоростью, а среда внутри трубы (пар или азот) нагревается до заданных температур [14; 15]. Слои изоляции прогреваются неравномерно, отчего сшивка происходит с разной скоростью. Поэтому степень завершенности вулканизации неравномерна в радиальном и продольном направлении.

Непрерывное управление вулканизационной установкой – это сложный процесс, включающий в себя множество переменных и параметров, которые необходимо тщательно

отслеживать и контролировать, чтобы обеспечить выпуск высококачественного продукта [16]. Использование СППР может значительно повысить эффективность и точность процесса управления.

Главная задача СППР – выработка рекомендаций для оператора линии по изменению технологических параметров, которые должны обеспечивать достижение и поддержание требуемых значений величины степени завершенности вулканизации.

В работе предложена следующая структурная модель СППР (рис. 1). Технолог разрабатывает технологическую карту для каждого маркоразмера кабеля. В систему анализа поступает запрос о геометрии и материале заготовки. Если отличия только в геометрии, то геометрические параметры заносятся в базу данных (база геометрии), и при переходе к решателю выбирается упрощенная модель, определяется новый технологический режим. Новый режим записывается в базу режимов. В случае, если применен новый материал, происходит перерасчет технологического режима при помощи дифференциальной математической модели (полная модель). База режимов пополняется.

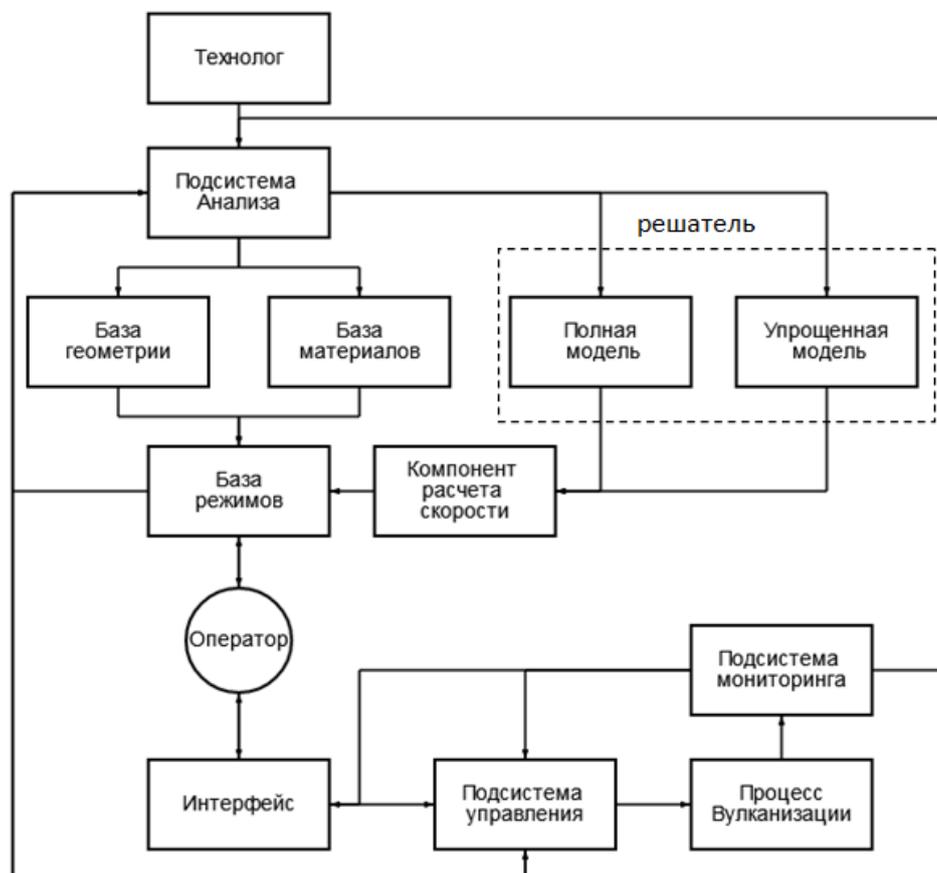


Рис. 1. Структурная модель СППР

Оператору на пульт управления поступает задание на изготовление кабеля с резиновой изоляцией, взаимодействие оператора с системой управления линией происходит через интерфейс. Информация поступает на интерфейс пульта оператора, где отображаются величины заданных параметров и текущие значения. Компонент пользовательского интерфейса обеспечивает удобный интерфейс, который позволяет операторам взаимодействовать с СППР и принимать решения на основе рекомендаций, предоставляемых системой. Интерфейс может включать в себя визуализацию данных в реальном времени, предупрежде-

дений и аварийных сигналов, а также интерактивные инструменты для настройки параметров процесса и задания целей управления.

Оператор устанавливает на отдающее устройство барабан с указанной в техкарте заготовкой и загружает бункер экструдера заданной резиновой смесью. Происходит запуск линии, достигается установившийся режим изготовления.

В ходе производства система мониторинга отслеживает величины следующих параметров: скорость перемещения заготовки, температура и давление вулканизационной среды, диаметр жилы и диаметр изолированной жилы.

В системе управления происходит проверка отклонения полученных величин от заданных, в случае превышения допустимого отклонения осуществляется коррекция управляющих воздействий.

Для реализации компонента подсистемы анализа необходимо разработать подход к управлению линией непрерывной вулканизации, поэтому был предложен следующий алгоритм управления.

Необходимость в управлении процессом вулканизации обусловлена: во-первых, широким разнообразием номенклатуры выпускаемых кабельных изделий, для каждого из которых задается свой технологический режим; во-вторых, нештатными изменениями технологических параметров, например, при падении давления пара; в-третьих, разработкой новых конструкций кабеля и использованием альтернативных материалов.

Сформулирована следующая задача управления (1): получить заданные величины Y степени вулканизации и толщины изоляции с минимальными отклонениями за счет подбора значений управляющих параметров процесса U_i в рамках накладываемых ограничений на значения входных параметров X_j , возмущающих воздействий Z_k и управляющих воздействий U_i .

Вектор собственных параметров $X = \{L, D_{тр}, D_{ТПЖ}, D_{из}, \lambda, c, \rho, a, b, c, T_{ТПЖ}, T_{из}, P\}$ формируется совокупностью параметров изолированной жилы, геометрических параметров вулканизационной линии и параметров процесса вулканизации: диаметр ТПЖ ($D_{ТПЖ}$), диаметр по изоляции ($D_{из}$), теплофизические свойства материалов ТПЖ и изоляции (теплопроводность (λ), удельная теплоемкость (c), плотность (ρ)), кинетические коэффициенты a, b, c ; длина вулканизационной трубы (L) и ее диаметр ($D_{тр}$); температура ТПЖ ($T_{ТПЖ}$) и изоляции ($T_{из}$) на входе в вулканизационную трубу, давление пара в вулканизационной трубе (P).

Вектор управляющих воздействий $U = \{V, Q\}$ формируется из скорости движения изолированной жилы (V) и расхода экструдера (Q).

Совокупность всех параметров и воздействий формирует вектор выходного состояния $Y = \{\Delta_{из}, \phi\}$, состоящий из толщины изоляции ($\Delta_{из}$) и степени завершенности процесса вулканизации (ϕ).

На систему воздействует вектор возмущающих воздействий $Z = \{\Delta P, \Delta \phi, \Delta X\}$, состоящий из величины отклонения давления ΔP , заданной степени вулканизации $\Delta \phi$, входных параметров ΔX .

$$\left(\begin{array}{l} Y = \{\phi, \Delta_{из}\} \\ Y(t) = F_Y[U(t), X(t), Z(t)] \\ U_i \in (U_i^{\min}; U_i^{\max}), i = \overline{1, I} \\ X_j \in (X_j^{\min}; X_j^{\max}), j = \overline{1, J} \\ Z_k \in (Z_k^{\min}; Z_k^{\max}), k = \overline{1, K} \end{array} \right) \quad (1)$$

Управление процессом вулканизации осуществляется изменением величины линейной скорости перемещения кабеля, величина которой определяет время пребывания кабеля в вулканизационной трубе, следовательно, степень сшивки на выходе из трубы. Регулирование скорости движения связано с изменением производительности экструдера (Q), что обеспечивает получение изоляции заданной толщины. Таким образом, вектор управляющих воздействий может быть сформирован следующим образом $U = \{V, Q\}$.

На управляющие параметры накладываются следующие ограничения:

1. Скорость линии должна находиться в диапазоне от минимальной до максимально допустимой скорости для конкретной производственной линии: $V_{\min} < V < V_{\max}$.
2. Температура вулканизационной среды не должна превышать максимальную.
3. Должен обеспечиваться такой расход экструдера, при котором толщина изоляции находилась бы в заданном диапазоне $\Delta_{\text{из}} \pm 10\%$.

Для адаптивного управления линией вулканизации изоляции кабеля предлагается использовать следующую схему (рис. 2).

В решатель передаются данные о параметрах объекта управления X , начальные величины управляющих воздействий U_0 , возможные отклонения от параметров изолированной жилы Z . Происходит поиск управляющего воздействия U в базе данных, если текущий вариант не обнаружен, то происходит расчет управляющих воздействий при помощи математической модели.

В ходе производства возникают отклонения Z параметров изолированной жилы и давления в вулканизационной трубе, вследствие чего меняются выходные параметры Y .

В ходе производства контролируются следующие величины: диаметр ТПЖ, входная температура ТПЖ, температура резиновой смеси и формующего инструмента, давление пара P , рассчитываются выходные параметры Y . Определяется разница величин выходных параметров Y и эталонных $Y_{\text{эт}}$.

Величина отклонения ΔY поступает в адаптер, где сравнивается с допустимой величиной отклонения. В случае превышения отклонения от нормы, происходит пересчет управляющих воздействий U^* .

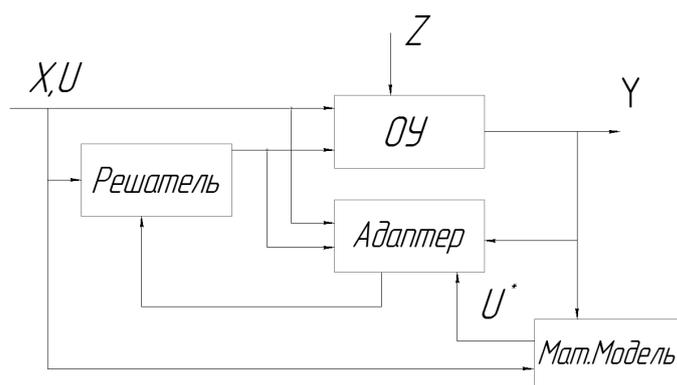


Рис. 2. Схема адаптивного управления

Адаптер представлен в виде алгоритма коррекции скорости изолирования (рис. 3). Алгоритм основан на работе с табличной базой данных, полученной ранее и для наглядности представленной в виде поверхностей.

На первом этапе проверяется наличие марки материала в базе данных. Поскольку значения величин теплофизических и кинетических характеристик материала данной марки

могут изменяться (замена компонентов наполнителя смеси, для отечественных и зарубежных производителей), производится сравнение величины коэффициента теплопроводности и кинетического параметра вулканизации b с имеющимися в БД. При отсутствии в базе материала или несоответствии параметров происходит перерасчет всего технологического процесса при помощи математической модели.

Далее происходит опрос датчиков диаметра ТПЖ и изоляции, а также давления (температуры) пара, при обнаружении несоответствий с заданными величинами. В случае удовлетворения условия выбирается режим из БД, в ином случае происходит перерасчет параметров технологического режима при помощи регрессионных выражений, результаты расчета заносятся в БД.

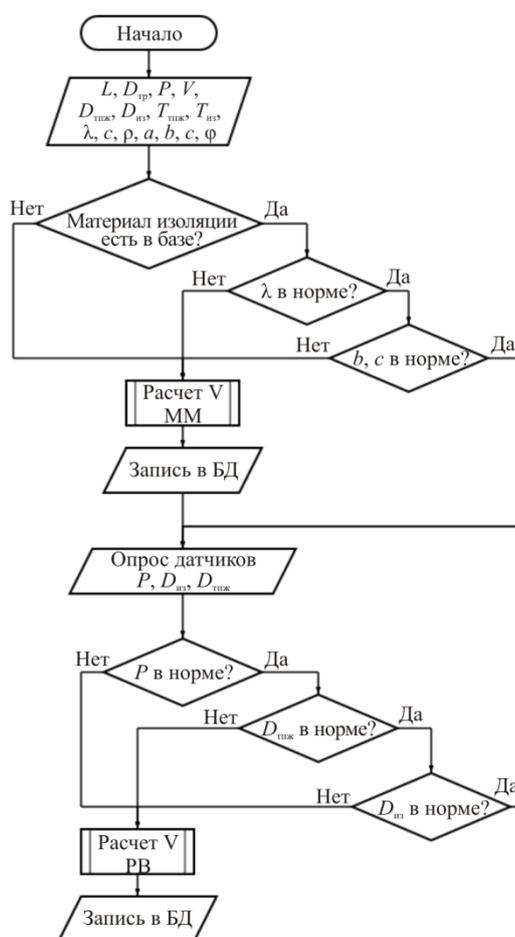


Рис. 3. Алгоритм корректировки технологического режима

Математическая модель

Для анализа процесса вулканизации и тепломассопереноса была предложена осесимметричная математическая модель, основанная на законах сохранения энергии, импульса, массы [17].

Разработанная математическая модель позволяет оценить влияние на степень завершенности вулканизации различных факторов: конструктивные размеры кабеля, температура среды вулканизации (давление в вулканизационной трубе), теплофизические характеристики жилы и изоляции кабеля, вулканизационные параметры материала изоляции, линейная скорость кабеля.

В результате численной реализации математической модели и системного анализа полученных результатов определено влияние на величину степени завершенности различных физических, геометрических и кинетических параметров, что позволило построить ряд технологических поверхностей. На рис. 4 представлена одна из них, определяющая связь между величиной скорости изолирования и геометрическими параметрами кабеля при заданной величине степени сшивки.

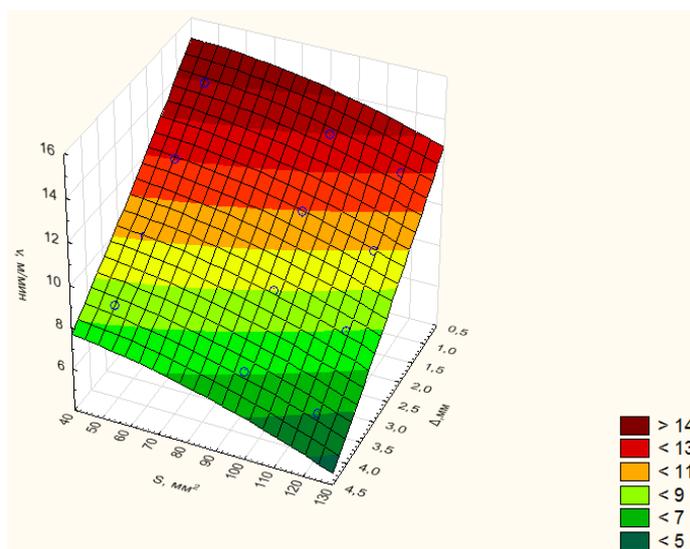


Рис. 4. Зависимость скорости, при которой степень завершенности составит 90 % от толщины и площади ТПЖ

Из данных рис. 4 видно, что на величину степени завершенности вулканизации в большей степени влияет толщина изоляции: так, при увеличении толщины на 1 мм необходимо снизить скорость на 16 %, а при изменении сечения в 1,6 раза – на 9 %.

Для каждой из полученных поверхностей построены регрессионные выражения, описывающие взаимосвязь различных параметров процесса.

Для представленной технологической поверхности (см. рис. 4) предложено регрессионное выражение

$$V = 15,9359 - 1,9565\Delta + 0,0118S + 0,0417\Delta^2 - 0,0023\Delta S - 0,0002S^2 \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой квадратичный полином зависимости скорости изолирования от геометрии заготовки, позволяющий определить величину скорости изолирования для степени сшивки 90 %.

Для проверки адекватности регрессионной модели произведено сравнение величин скорости изолирования, рассчитанной при помощи дифференциальной математической модели и регрессионной модели при различных значениях геометрических параметров. Расхождение результатов составило 4 %.

Таким образом, для некоторого диапазона возможных ситуаций можно применять предложенные регрессионные выражения, не прибегая к решению полной дифференциальной математической модели процесса теплопереноса с кинетикой, использование которой необходимо только в тех случаях, когда предлагается новый материал или заметно отличающаяся конструкция кабеля.

Заключение

В работе предложена структурная модель СППР для управления технологическим процессом непрерывной вулканизации изоляции кабеля. Для реализации подсистемы решателя разработаны полная дифференциальная математическая модель и упрощенная регрессионная модель. На основе системного анализа полученных результатов построен алгоритм коррекции технологического режима, учитывающий лишь значимые параметры процесса. Алгоритм позволяет корректировать величину скорости изолирования в зависимости от внешних воздействий и отклонений от заданных параметров.

Система поддержки принятия решений для управления непрерывной вулканизационной установкой может значительно повысить эффективность и результативность процесса вулканизации. Предоставляя рекомендации в режиме реального времени и оптимизируя параметры процесса, система может сократить количество отходов, улучшить качество продукции и повысить общую эффективность.

Список литературы

1. Смеси резиновые. определение вулканизационных характеристик с использованием безторных реометров / ГОСТ Р 54547-2011. – М.: Стандартиформ, 2018. – 19 с.
2. Митрохин А.А., Гусев К.Ю., Бурковский В.Л. Модели прогнозирования качества продукции потенциально опасного процесса вулканизации автомобильных шин // Вестник ВГТУ. – 2017. – № 3. – С. 28–33.
3. Ghoreishy M.H.R. A state-of-the-art review on the mathematical modeling and computer simulation of rubber vulcanization process // Iranian Polymer Journal. – 2016. – Vol. 25. – P. 89–109. DOI:10.1007/s13726-015-0405-5
4. Моделирование кинетики неизотермической вулканизации массивных резиновых изделий / В.И. Молчанов, О.В. Карманова, С.Г.Тихомиров, Ю.В. Пятаков, А.В. Касперович // Труды БГТУ. – 2011. – №4. – С.100–104.
5. Иванов С.Д., Гоппе Г.Г., Киргин Д.С. Математическое моделирование технологического процесса вулканизации // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 9. – С. 219–224.
6. Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота // Научно–Технический Вестник Поволжья. – 2019. – № 7. – С. 111–114.
7. Rafei M., Ghoreishy M.H.R, Naderi G. Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process // Computational Materials Science. – 2009. – Vol. 47. – P. 539–547. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.09.022.
8. Erfanian M.R., Anbarsooz M., Moghiman M. Three dimensional simulation of a rubber curing process considering variable order of reaction // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – Vol. 40. – P. 8592–8604. DOI: 10.1016/j.apm.2016.05.024
9. Труфанова Н.М., Пасынков Д.П. Математическая модель и численный анализ процесса вулканизации резиновой изоляции кабелей // Научно–технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 304–307.
10. Mechanistic modeling of reversion phenomenon in sulphur cured natural rubber vulcanization kinetics / G. Milani, F. Leroy, F.D. Milani, R. Deterre // Polymer Testing. – 2013. – Vol. 32. – P. 1052–1063. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.06.002.
11. Milani G., Milani F. Iterative robust numerical procedure for the determination of kinetic constants in Han's model for NR cured with sulphur // Journal of Mathematical Chemistry. – 2015. – Vol. 53. – P.1363–1379. DOI: 10.1007/s10910-015-0493-7.

12. Milani G., Milani F. Curing degree prediction for S–TBBS–DPG natural rubber by means of a simple numerical model accounting for reversion and linear interaction // *Polymer Testing*. – 2016. – Vol. 52. – P. 9–23. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.03.015
13. Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. Математические модели реограмм состояния в программах tablecurve 2d/3d как основа интеллектуальной системы управления процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов // Программные продукты и системы. – 2017. – № 4(30). – С. 770–777.
14. Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование процесса вулканизации резиновой смеси при помощи ротационного реометра // Научно–Технический Вестник Поволжья. – 2018. – № 7. – С. 91–94.
15. Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Описание вулканизационных кривых при помощи трехпараметрического уравнения // *Электротехника*. – 2020. – № 11. – С. 34–38.
16. Milani G., Milani F. Genetic algorithm for the optimization of rubber insulated high voltage power cables production lines // *Computers and Chemical Engineering*. – 2008. – Vol. 32. – P. 3198–3212
17. Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Управление производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля // Прикладная математика и вопросы управления. – 2021. – № 3. – С. 81–94.

References

1. Smesi rezinovyh. opredelenie vulkanizacionnyh harakteristik s ispol'zovaniem bezrotornyh reometrov GOST R 54547–2011 [Rubber compounds. determination of vulcanisation characteristics using rotorless rheometers GOST R 54547–2011]. Moscow, Standartinform, 2018, 19 p.
2. Mitrokhin A.A., Gusev K.Iu., Burkovskii V.L. Modeli prognozirovaniia kachestva produktsii potentsial'no opasnogo protsessa vulkanizatsii avtomobil'nykh shin [Product Quality Prediction Models for a Potentially Hazardous Car Tire Vulcanization Process]. *Vestnik VGTU*. 2017, no. 3, pp. 28–33.
3. Ghoreishy, M.H.R. A state–of–the–art review on the mathematical modeling and computer simulation of rubber vulcanization process. *Iranian Polymer Journal*, 2016, no. 25, pp.89–109.
4. Molchanov V.I., Karmanova O.V., Tikhomirov S.G., Piatakov Iu.V., Kasperovich A.V. Modelirovanie kinetiki neizotermicheskoy vulkanizatsii massivnyh rezinovyh izdelij [Modeling the kinetics of non-isothermal vulcanization of massive rubber products]. *Trudy BGTU*, 2014, no.4, pp.100–104.
5. Ivanov S.D., Goppe G.G., Kirgin D.S. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskogo processa vulkanizatsii [Mathematical modeling of the technological process of vulcanization]. *VESTNIK IrGTU*. 2012, no. 9, pp. 219–224.
6. Korelin A.A., Dyatlov I.YA., Trufanova N.M. *CHislennoe issledovanie processa sshivki polietilena v vulkanizacionnoj trube v srede azota* [Numerical study of the process of cross-linking polyethylene in a vulcanization pipe in a nitrogen]. *Nauchno–Tekhnicheskij Vestnik Povolzh'ya*, 2019, no. 7, pp. 111–114.
7. Rafei M., Ghoreishy M.H.R, Naderi G. Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process. *Computational Materials Science*, 2009, Vol. 47, pp.539–547
8. Erfanian M.R., Anbarsooz M., Moghiman M. Three dimensional simulation of a rubber curing process considering variable order of reaction. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, Vol.40, pp. 8592–8604.

9. Trufanova N.M., Pasyukov D.P. Matematicheskaya model' i chislennyj analiz processa vulkanizacii rezinovej izoljacii kabelej [Mathematical model and numerical analysis of the process of vulcanization of rubber cable insulation]. *Nauchno–tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 5, pp. 304–307.
10. Milani, G., Leroy, F., Milani, F.D., & Deterre, R. Mechanistic modeling of reversion phenomenon in sulphur cured natural rubber vulcanization kinetics. *Polymer Testing*, 2013, vol. 32, pp. 1052–1063.
11. Milani G., Milani F. Iterative robust numerical procedure for the determination of kinetic constants in Han's model for NR cured with sulphur. *Journal of Mathematical Chemistry*, 2015, vol. 53, pp.1363–1379.
12. Milani G., Milani F. Curing degree prediction for S–TBBS–DPG natural rubber by means of a simple numerical model accounting for reversion and linear interaction. *Polymer Testing*, 2016, vol. 52, pp. 9–23.
13. Kuznecov A.S., Korniyushko V.F. Matematicheskie modeli reogramm sostoyaniya v programmah tablecurve 2d/3d kak osnova intellektual'noj sistemy upravleniya processami strukturirovaniya mnogokomponentnyh elastomernyh kompozitov [Mathematical models of state rheograms in tablecurve 2d/3d programs as the basis of an intelligent control system for the processes of structuring multicomponent elastomeric composites]. *Software&Systems*, 2017, no. 4 (30), pp. 770–777
14. Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. Issledovanie processa vulkanizacii rezinovej smesi pri pomoshchi rotacionnogo reometra [Rotary rheometer study of the rubber compound vulcanization process]. *Nauchno–Tekhnicheskij Vestnik Povolzh'ya*, 2018, no. 7, pp. 91–94.
15. Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. A three-parameter equation for describing vulcanization curves. *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 11, pp 681-685.
16. Milani G., Milani F. Genetic algorithm for the optimization of rubber insulated high voltage power cables production lines. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, vol. 32, pp. 3198–3212.
17. Diatlov I.Ya., Trufanova N.M. Upravlenie proizvodstvennoj liniej vulkanizacii izoljacii silovogo kabelya [Power cable insulation vulcanization production line management]. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2021, no. 3, pp. 81–94.