

**Заключение.** В результате проведённого исследования выполнен сравнительный анализ трёх ключевых методов моделирования гистерезиса в сегнетоэлектриках. Установлено, что выбор оптимального метода определяется спецификой научной или инженерной задачи и представляет собой компромисс между точностью, вычислительными затратами и уровнем детализации (микро- или макроскопический). Показано, что для всестороннего понимания свойств сегнетоэлектрических материалов необходим многометодный подход. Интеграция различных моделей в единую программную платформу, такую как FerroSim, является эффективным решением, позволяющим гибко выбирать инструмент в зависимости от цели исследования.

1. Доменные границы и топологические дефекты в слоистых сегнетоэлектрических кристаллах / А. Л. Толстихина, Р. В. Гайнутдинов, А. К. Лашкова [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике [Электронный ресурс] : материалы 76-й Регион. науч.-практ. конф. преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 1 марта 2024 г. – Витебск : ВГУ имени П. М. Машерова, 2024. – С. 47–50. – URL: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/42168> (дата обращения: 15.08.2025).

2. Ramesh, R. Enabling ultra-low-voltage switching in BaTiO<sub>3</sub> / R. Ramesh, L. W. Martin // Nature Materials. – 2022. – Vol. 21, № 7. – P. 779–785.

3. Ferroelectric properties of BaTiO<sub>3</sub> thin films co-doped with Mn and Nb [Электронный ресурс] / D. Phuyal, S. Mukherjee, S. Jana, F. Denoel, M. Venkata Kamalakar, S. M. Butorin, A. Kalaboukhov, H. Rensmo, O. Karis // Digitala Vetenskapliga Arkivet. – 2019. – URL: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1351267> (дата обращения: 15.08.2025).

4. Kinetic Monte Carlo simulations of organic ferroelectrics. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/329768494\\_Kinetic\\_Monte\\_Carlo\\_simulations\\_of\\_organic\\_ferroelectrics](https://www.researchgate.net/publication/329768494_Kinetic_Monte_Carlo_simulations_of_organic_ferroelectrics) (дата обращения: 15.08.2025).

## ОЦЕНКА МЕТОДА ЛАНДАУ–ХАЛАТНИКОВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ ПЕТЛИ ТИТАНАТА БАРИЯ

*Хотьков В.Е.<sup>1</sup>, Супаков И.Е.<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>студент 2 курса, <sup>2</sup>выпускник ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь  
Научный руководитель – Кашевич И.Ф., канд. физ.-мат. наук, доцент*

Ключевые слова. Сегнетоэлектрик, поляризация, гистерезис, коэрцитивное поле, метод Ландау–Халатникова.

Keywords. Ferroelectric, polarization, hysteresis, coercive field, Landau – Khalatnikov method.

Титанат бария (BaTiO<sub>3</sub>) является одним из наиболее изученных сегнетоэлектриков, чьи уникальные поляризационные свойства находят широкое применение в современной электронике. Ключевой характеристикой таких материалов является гистерезисная зависимость поляризации от внешнего электрического поля. Для точного понимания и прогнозирования этого поведения необходимо применение численных методов. Феноменологический подход, основанный на теории Ландау, позволяет эффективно анализировать термодинамические свойства и фазовые переходы в однородных системах [1].

Адаптация этого подхода через уравнение Ландау–Халатникова предоставляет мощный инструмент для динамического моделирования поляризации. Однако точность и адекватность модели напрямую зависят от корректного выбора феноменологических коэффициентов и учёта влияния внешних факторов, таких как температура и структурные дефекты материала [2].

Цель работы – программная реализация и оценка эффективности метода Ландау – Халатникова для численного моделирования и анализа гистерезисных петель в титанате бария при различных физических условиях.

**Материал и методы.** В качестве объекта исследования выбран титанат бария (BaTiO<sub>3</sub>). В основе модели лежит численное решение уравнения динамики поляризации Ландау – Халатникова. Для интегрирования этого нелинейного дифференциального уравнения был применён численный метод Рунге – Кутты четвёртого порядка, который обеспечивает высокую точность расчёта [3].

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 1 представлен результат моделирования гистерезисной петли для идеального кристалла BaTiO<sub>3</sub> (плотность дефектов  $\rho = 0$ ) при температуре  $T = 335$  К (ниже точки Кюри  $T_c = 345$  К).

Петля демонстрирует классическое сегнетоэлектрическое поведение. При нулевом внешнем поле материал обладает спонтанной поляризацией около  $0.28$  Кл/м<sup>2</sup>, что обусловлено отрицательным значением коэффициента  $\alpha$  и формированием двух устойчивых состояний в потенциальной яме свободной энергии. Переключение поляризации происходит резко при достижении коэрцитивного поля  $E_c \approx 1.2 \times 10^6$  В/м, что характерно для фазовых переходов первого рода. Идеальная симметрия петли относительно обеих осей является следствием отсутствия дефектов в модели [4].

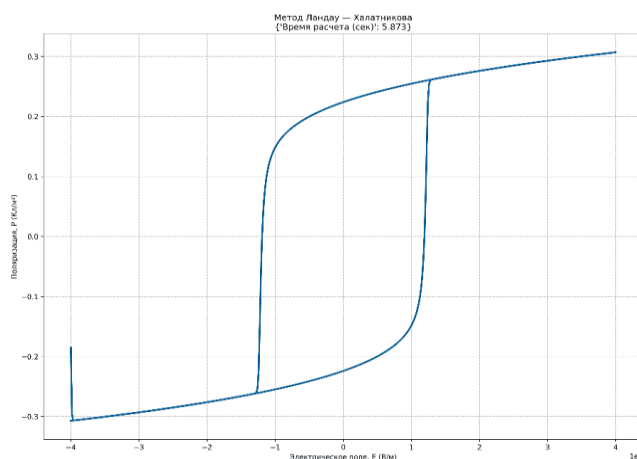


Рисунок 1 – Петля гистерезиса BaTiO<sub>3</sub>, смоделированная при параметрах:  
 $\rho = 0$  и  $T = 335$  К

Для оценки влияния структурных несовершенств и температуры было проведено моделирование с учётом плотности дефектов  $\rho = 0.1$  при температуре  $T = 340$  К, приближенной к точке Кюри. Результат показан на рисунке 2.

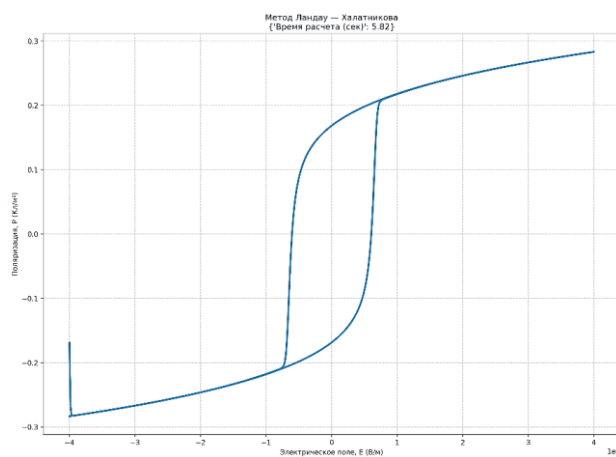


Рисунок 2 – Петля гистерезиса BaTiO<sub>3</sub>, смоделированная при параметрах:  
 $\rho = 0.1$  и  $T = 340$  К

Анализ графика показывает заметные изменения. Спонтанная поляризация при  $E = 0$  снизилась до  $\approx 0.21$  Кл/м<sup>2</sup>. Форма петли стала менее прямоугольной, а её общая площадь уменьшилась. Сужение петли и снижение коэрцитивного поля до  $\approx 0.7 \times 10^6$  В/м в первую очередь связаны с приближением к точке Кюри, что ослабляет сегнетоэлектрические свойства и облегчает процесс реполяризации. Влияние дефектов ( $\rho = 0.1$ ), кото-

рое могло бы расширить петлю за счет закрепления доменных стенок, в данном случае оказывается менее значимым по сравнению с доминирующим термическим эффектом.

**Заключение.** Программная реализация метода Ландау–Халатникова показала высокую эффективность для качественного и количественного анализа гистерезисных петель в титанате бария. Модель адекватно описывает ключевые характеристики сегнетоэлектрика, включая спонтанную поляризацию и коэрцитивное поле. Установлено, что программа гибко адаптируется к изменениям температуры и плотности дефектов, позволяя достоверно воспроизводить физические эффекты, такие как «размягчение» материала и сужение петли гистерезиса при приближении к точке Кюри. Таким образом, реализованный подход является удобным и надёжным инструментом для исследования термодинамики и динамики поляризации в однородных сегнетоэлектрических системах.

1. Струков, Б. А. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах / Б. А. Струков, А. П. Леванюк. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 237 с.

2. Шут, В. Н. Сегнетоэлектрические кристаллы триглицинсульфата с профильным распределением примеси ионов хрома / В. Н. Шут, И. Ф. Кашевич, С. Е. Мозжаров, Ю. А. Шиенок // Кристаллография. – 2010. – Т. 55, № 3. – С. 495–498 – URL: <https://ger.vsu.by/handle/123456789/43486> – (дата обращения: 20.08.2025).

3. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 7-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 636 с.

4. Thermodynamic theory of the lead zirconate-titanate solid solution system: Part V: Theoretical calculations / M. J. Haun, E. Furman, S. J. Jang, L. E. Cross // Ferroelectrics. – 1989. – Vol. 99, Iss. 1. – P. 63–86.

## **ОЦЕНКА РОЛИ ЦВЕТОВЫХ СХЕМ ВЕБ-СТРАНИЦ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЭМОЦИОНАЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**

**Чернышёва М.В.,**

*студентка 3 курса ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель – Булгакова Н.В., ст. преподаватель*

Цвет является одним из ключевых элементов веб-дизайна, оказывающим значительное влияние на оценку пользователей, их эмоциональное состояние и поведение. В условиях современной цифровой среды, где конкуренция за внимание пользователей особенно высока, правильное использование цветовых решений становится стратегически важным для повышения эффективности взаимодействия с аудиторией. Цвет задаёт эмоциональный фон, формирует первое впечатление и является одной из первых точек контакта пользователя с веб-ресурсом.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что цветовые решения не только влияют на эстетическое восприятие сайта пользователем, но и способны формировать доверие к бренду, повышать уровень вовлеченности и стимулировать целевое поведение пользователей. Согласно данным исследований, до 90% первых впечатлений о продукте или компании формируются на основе цвета, а гармоничная цветовая схема повышает узнаваемость бренда до 80% [1]. Недооценка значения цвета в веб-дизайне может приводить к снижению конверсии, уменьшению лояльности пользователей и ухудшению общего восприятия бренда, что подчёркивает практическую важность изучения этого вопроса. В современных условиях исследование влияния цветовых схем на эмоциональный отклик, когнитивные процессы и поведение пользователей становится особенно актуальным, поскольку эффективность веб-ресурсов напрямую зависит от качества визуальной коммуникации и гармонии цветового оформления.

Цель исследования – изучение влияния цветовых схем на эмоциональное состояние пользователей, их когнитивные реакции и поведение при взаимодействии с веб-страницами. Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи: проведение анализа психологического воздействия цвета на восприятие и эмоции пользователей, изучение предпочтений пользователей различных цветовых схем; выявление стратегических принципов использования цвета для оптимизации интерфейсов и повышения показателей конверсии. Выполнение этих задач позволяет не только выявить