

2.4.3 Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.314.224.8

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.3>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОКА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА НА ОСНОВЕ PYTHON

Александр Александрович Ладыгин^{1*}, Макар Дмитриевич Красько², Дмитрий Алексеевич Турченко³, Александр Витальевич Овчаренко⁴, Павел Константинович Черников⁵

¹⁻⁵ Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ aladygin2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1823-757X>

² kraskomakar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3022-7309>

³ turchenko_20@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6141-9094>

⁴ sania.ova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7831-4202>

⁵ pkchernikov9785@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1568-7621>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Современные оптические технологии широко применяются в телекоммуникациях, лазерных системах и научных исследованиях. Измерители на основе оптических эффектов нашли активное применение в области электроэнергетики. Так, оптические измерительные трансформаторы являются перспективным направлением развития интеллектуальных энергетических систем, способствуя улучшению наблюдаемости сетей и повышая их надежность за счет избавления от ряда существенных недостатков традиционных трансформаторов. Однако повсеместному применению новых измерителей препятствует дороговизна компонентов и отсутствие крупного налаженного производства. На текущем этапе продолжается исследование и развитие оптических измерителей тока. В связи с этим особую значимость приобретает математическое моделирование оптических схем, позволяющее на ранних этапах разработки оптимизировать состав и расположение элементов. **Цель.** Разработка программного решения, позволяющего моделировать оптические схемы компонентов поляризметрического датчика тока, что, в свою очередь, позволит оптимизировать подбор и пространственное расположение элементов оптического тракта измерителя и тем самым упростить процесс разработки оптических трансформаторов тока. **Материалы и методы.** Программа реализована на языке Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Расчет основан на формализме Джонса для описания преобразований поляризации в последовательности элементов (поляризаторы, призмы, вращатели Фарадея и др.). Принцип измерения тока моделируется через эффект Фарадея с учетом параметров магнитного поля и характеристик чувствительного материала (длина активного элемента, постоянная Верде). **Результаты и обсуждение.** В ходе работы была реализована модель полного оптического тракта и выполнено сопоставление расчетного и экспериментального выходных сигналов. Получено качественное совпадение формы сигналов. Показано, что разработанное ПО корректно воспроизводит влияние ключевых параметров (азимутальные углы поляризаторов, длина активного элемента, постоянная Верде) на частоту и амплитуду выходного сигнала, что подтверждает адекватность выбранной математической модели для задач предварительного проектирования. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что разработанная программа является эффективным инструментом для моделирования и оптимизации оптического тракта измерителя тока и может быть использована при разработке новых конструкций оптических трансформаторов тока, снижая потребность в дорогостоящих физических прототипах на ранних этапах проектирования.

Ключевые слова: эффект Фарадея, формализм Джонса, оптический измеритель, PyQt6, NumPy, поляризация света, тербий-галлиевый гранат

Для цитирования: Моделирование оптического тракта измерителя тока с помощью программного пакета на основе Python / А. А. Ладыгин [и др.] // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 6(111). С. 28–35. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.3>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.09.2025;

одобрена после рецензирования 14.10.2025;

принята к публикации 20.10.2025.

Research article

SIMULATION OF THE OPTICAL PATH OF A CURRENT METER USING A PYTHON-BASED SOFTWARE PACKAGE

Alexander A. Ladygin^{1*}, Makar D. Krasko², Dmitry A. Turchenko³,
Alexander V. Ovcharenko⁴, Pavel K. Chernikov⁵

¹⁻⁵ North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ aladygin2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1823-757X>

² kraskomakar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3022-7309>

³ turchenko_20@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6141-9094>

⁴ sania.ova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7831-4202>

⁵ pkchernikov9785@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1568-7621>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. Modern optical technologies are widely used in telecommunications, laser systems and scientific research. Optical effect-based meters have found active application in the field of electric power engineering. Thus, optical measuring transformers are a promising

area for the development of intelligent energy systems, contributing to improving the observability of networks and increasing their reliability by eliminating a number of significant disadvantages of traditional transformers. However, the widespread use of new meters is hampered by the high cost of components and the lack of large-scale production facilities. Research and development of optical current meters is ongoing at the current stage. In this regard, mathematical modeling of optical circuits is of particular importance, which makes it possible to optimize the composition and arrangement of elements at the early stages of development. **Goal.** To develop a software solution that makes it possible to simulate the optical circuits of the components of a polarimetric current sensor, which in turn will optimize the selection and spatial arrangement of the elements of the optical path of the meter and thereby simplify the development process of optical current transformers. **Materials and methods.** The program is implemented in Python using the NumPy and Matplotlib libraries. The calculation is based on the Jones formalism for describing polarization transformations in a sequence of elements (polarizers, prisms, Faraday rotators, etc.). The principle of current measurement is modeled through the Faraday effect, taking into account the parameters of the magnetic field and the characteristics of the sensitive material (length of the active element, Verdet constant). **Results and discussion.** In the course of the work, a model of the complete optical path was implemented and a comparison of the calculated and experimental output signals was performed. A qualitative match of the waveform was obtained. It is shown that the developed software correctly reproduces the influence of key parameters (azimuthal angles of polarizers, length of the active element, Verdet constant) on the frequency and amplitude of the output signal, which confirms the adequacy of the chosen mathematical model for preliminary design tasks. **Conclusion.** Based on the results of the study, it can be concluded that the developed program is an effective tool for modeling and optimizing the optical path of a current meter and can be used in the development of new designs of optical current transformers, reducing the need for expensive physical prototypes at the early stages of design.

Keywords: Faraday effect, Jones formalism, optical meter, PyQt6, NumPy, light polarization, terbium-gallium garnet

For citation: Ladygin AA, Krasko MD, Turchenko DA, Ovcharenko AV, Chernikov PK. Simulation of the optical path of a current meter using a Python-based software package. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;6(111):28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.3>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 08.09.2025;

approved after reviewing 14.10.2025;

accepted for publication 20.10.2025.

Введение / Introduction. Разворачивание интеллектуальных сетей Smart Grid поставило перед энергетической отраслью новые вызовы, в частности, необходимость более точного, надёжного и оперативного измерения электрических параметров сети непосредственно на подстанциях [1]. Применяемые на сегодняшний день традиционные электромагнитные трансформаторы тока, несмотря на широкое распространение, характеризуются существенными недостатками, ограничивающими их эффективность в современных условиях [2]. К таким недостаткам относят узкий частотный диапазон передаточной характеристики, ограниченный динамический диапазон измеряемых токов, выраженную зависимость амплитудно-фазовых передаточных характеристик от нагрузки вторичных цепей, а также проявление эффекта насыщения магнитного сердечника при высоких значениях токов, что приводит к потере точности измерений и ограничению оперативного реагирования систем защиты и контроля сети [2–4]. Эти факторы актуализировали задачу поиска и разработки альтернативных способов измерения тока, способных преодолеть указанные ограничения.

Перспективным решением стали оптические трансформаторы тока, обладающие принципиально иными физическими принципами измерения и свободные от перечисленных недостатков [5–7]. Однако создание эффективного оптического измерителя напрямую зависит от качества проектирования его оптической схемы [8, 9]. Корректный подбор оптических элементов, а также оптимальная их компоновка не только определяют функциональные характеристики устройства, такие как чувствительность, точность и динамический диапазон, но и оказывают значительное влияние на итоговую стоимость и технологичность его производства. В связи с этим особую значимость приобретает математическое моделирование оптических схем, позволяющее на ранних этапах разработки оптимизировать состав и расположение элементов. В предлагаемой работе описаны метод математического моделирования оптических схем с использованием формализма Джонса и реализованная на его основе программа на языке Python. Данная программа позволяет обеспечить высокую точность расчёта и оперативность моделирования, что способствует повышению качества проектируемых оптических измерительных систем и ускорению их внедрения в инфраструктуру современных интеллектуальных сетей.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Оптические элементы по-разному воздействуют на компоненты проходящей волны [10]. Влияние каждого отдельного элемента на поляризацию света можно описать аналитически без использования матричных методов. Однако, если система содержит множество компонентов с разными азимутальными углами, для расчета применяют особый матричный метод – исчисление (формализм) Джонса [11]. Любой пассивный оптический компонент, не превращающий линейный свет в эллиптически-поляризованный, описывается квадратной матрицей 2×2 . Так, линейный поляризатор с пропускной осью вдоль x имеет матрицу (1)

$$P_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Результирующая поляризация света определяется как умножение входящего вектора поляризации на результирующую матрицу Джонса для оптической системы. Последовательность из N элементов под-считывается простым перемножением их матриц, причём порядок обратный прохождению (2):

$$M_{\text{системы}} = M_N M_{N-1} \cdots M_1. \quad (2)$$

Умножив $M_{\text{системы}}$ на входной вектор поляризации E_{in} , можно сразу получить выходной вектор E_{out} (3).

$$E_{\text{out}} = M_{\text{системы}} \times E_{\text{in}}. \quad (3)$$

Именно эта алгебраическая прозрачность сделала формализм Джонса основой расчета поляризационных схем в программных пакетах вроде MATLAB, Python / NumPy, Zemax, OpticStudio или VDM.

Для практической реализации исчисления Джонса было разработано специализированное программное обеспечение, предназначенное для моделирования поляризационных оптических схем на языке программирования Python. Данное решение позволит сочетать строгость математического описания с возможностью интерактивного конструирования и анализа цепочек оптических элементов в удобной пользовательской среде. Выбор Python обусловлен не только его лаконичным синтаксисом, но и наличием развитой экосистемы научных библиотек (NumPy, matplotlib), обеспечивающих высокоточную численную обработку и наглядную визуализацию результатов. Для построения графического интерфейса использована библиотека PyQt6, что позволило реализовать комплексный инструмент с поддержкой параметрического ввода исходных данных (частота, постоянная Верде, геометрические параметры кристалла) и интуитивным управлением последовательностью элементов схемы.

Ключевым отличием созданного решения является интеграция физических свойств оптических элементов в единую программную модель. Каждый компонент представлен как строгое математическое преобразование, описываемое матрицей Джонса, а их последовательное действие формируется через процедуру матричного умножения. Такой подход обеспечивает возможность свободного комбинирования и упорядочивания устройств, что позволяет воспроизводить сложные поляризационные схемы различной конфигурации.

Результаты моделирования визуализируются средствами библиотеки matplotlib, что включает построение временных зависимостей интенсивности, угла вращения поляризации, электрического сигнала, а также отображение траектории вектора Джонса на плоскости. Тем самым реализованный программный продукт может рассматриваться как оригинальный вычислительно-визуализационный комплекс, позволяющий исследователю не только формализовать, но и наглядно проанализировать поведение поляризационных систем.

Графический интерфейс программы представлен на рисунке 1.

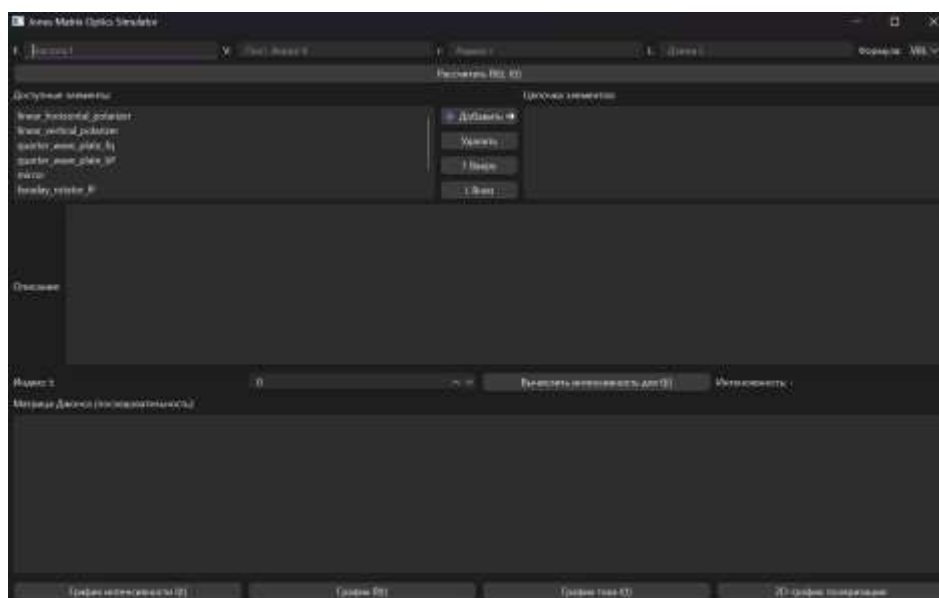


Рис. 1. Графический интерфейс программного обеспечения для моделирования оптических схем /

Fig. 1. Graphical interface of software for modeling optical circuits

Для проверки разработанной модели оптической схемы была собрана установка, представленная на рисунке 2.

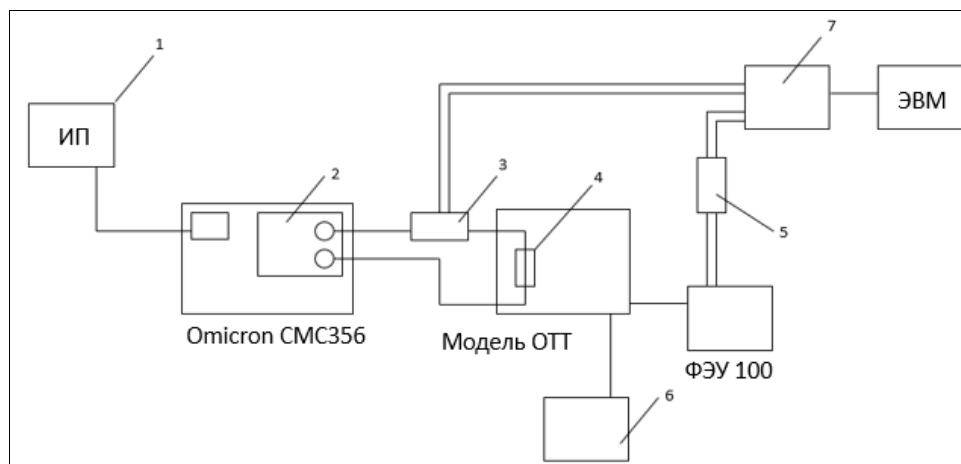


Рис. 2. Установка для испытания образца: 1 – источник питания (220 В), 2 – источник переменного тока, 3 – шунт, 4 – магниточувствительный элемент, 5 – магазин сопротивлений, 6 – полупроводниковый лазер (632 нм), 7 – устройство сбора данных / Fig. 2. Sample testing facility: 1 – power supply (220 V), 2 – AC power source, 3 – shunt, 4 – magnetically sensitive element, 5 – resistance magazine, 6 – semiconductor laser (632 nm), 7 – data acquisition device

В качестве объекта для измерения использовалась медная шина, через которую пропусклся переменный ток. Источником тока выступил многофункциональный испытательный стенд Omicron CMC356, позволяющий подавать на проводник ток синусоидальной формы с амплитудным значением до 700 А. Отличительной особенностью комплекса Omicron является возможность подачи синусоидального тока с малой величиной искажений, а также плавная регулировка и поддержание амплитуды. Для регистрации тока последовательно к шине подключался шунт сопротивлением 75 Ом. В качестве магниточувствительного элемента использовался кристалл TGG.

В качестве приемника излучения использовался высокостабильный, быстродействующий и чувствительный ФЭУ-100 с источником питания, характеризующимся низкими пульсациями. Токовый сигнал ФЭУ через магазин сопротивлений преобразовывался в падение напряжения. Далее электрический сигнал с оптической (ФЭУ с магазином сопротивлений) и электрической части подавался для одновременной записи на ЭВМ на многофункциональное устройство сбора данных USB6008, которое через USB-кабель подключалось к ЭВМ. На ЭВМ проводилась визуализация сигналов с возможности их записи в виде массива данных для дальнейшей обработки.

С использованием разработанного программного обеспечения была проведена моделирование схемы оптического трансформатора тока. В качестве базовой топологии рассмотрена конфигурация, включающая лазерный источник, поляризационную призму, магнитооптический кристалл и разделительную призму. На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования: временные зависимости электрического тока для разработанной схемы, а также результаты расчёта, полученные для реальной экспериментальной модели.

Сравнение сигнала, полученного в результате моделирования, с данными, зарегистрированными при проведении физического эксперимента, показало их полное согласование по форме, частоте и амплитуде. Оценка погрешностей была проведена по относительной величине отклонения амплитуды смоделированного сигнала от полученных экспериментальных значений реального устройства (рисунок 5), а также по относительной величине отклонения фазы (рисунок 6). В результате моделирования установлено, что в диапазоне токов от 5 до 30 А максимальная погрешность не превышает 2%, что подтверждает корректность используемой физико-математической модели на основе формализма Джонса. Такая величина погрешности обусловлена рядом внешних факторов, не учтенными при моделировании: влиянии температуры, вибраций, воздействия помех на электронные компоненты экспериментального устройства. От части негативных воздействий можно избавиться за счет конструктивного изменения оптического тракта устройства: благодаря свойству не возвратности эффекта Фарадея можно добиться компенсации температурных воздействий путем обратного прохождения луча света через активный элемент. В диапа-

зоне от 0 до 5 А наблюдается резкий рост погрешности, связанный с ограниченным динамическим диапазоном применяемого оптического измерителя.

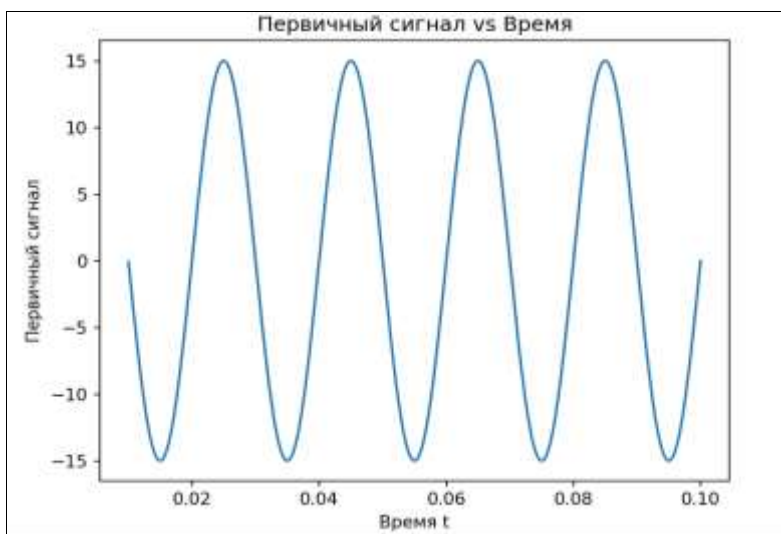


Рис. 3. График зависимости величины тока от времени для разработанной схемы, полученный в результате моделирования / Fig. 3. Graph of the dependence of the current value on time for the developed circuit obtained as a result of the simulation

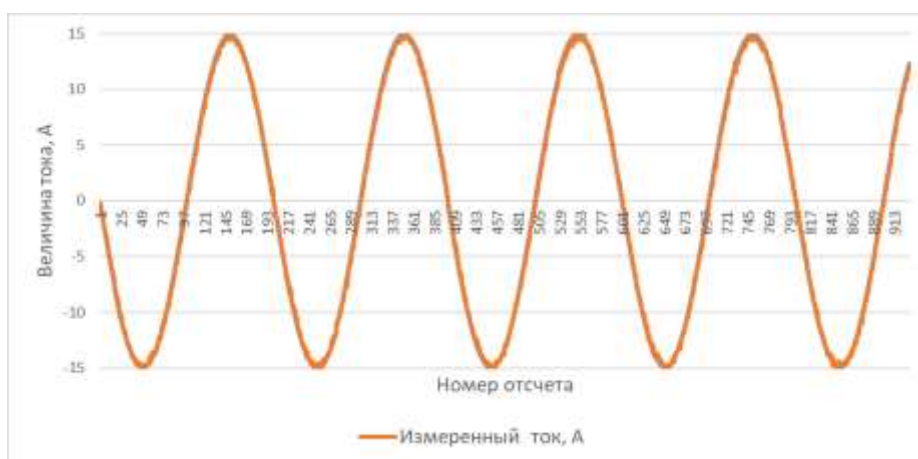


Рис. 4. График зависимости величины тока от времени для реальной экспериментальной модели / Fig. 4. Graph of the dependence of the current value on time for a real experimental model

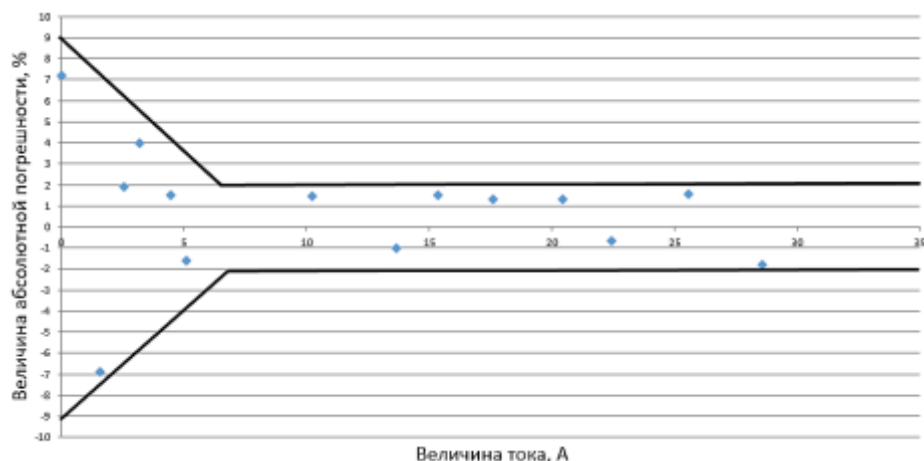


Рис. 5. Оценка относительной погрешности модели оптического измерителя тока по амплитуде / Fig. 5. Estimation of the relative error of the optical current meter model by amplitude

Фазовая погрешность во всем исследуемом интервале от 5 до 30 А не превышает 3 %, что указывает на то, что модель достоверно воспроизводит временную характеристику прохождения сигнала через оптическую часть измерительного канала.

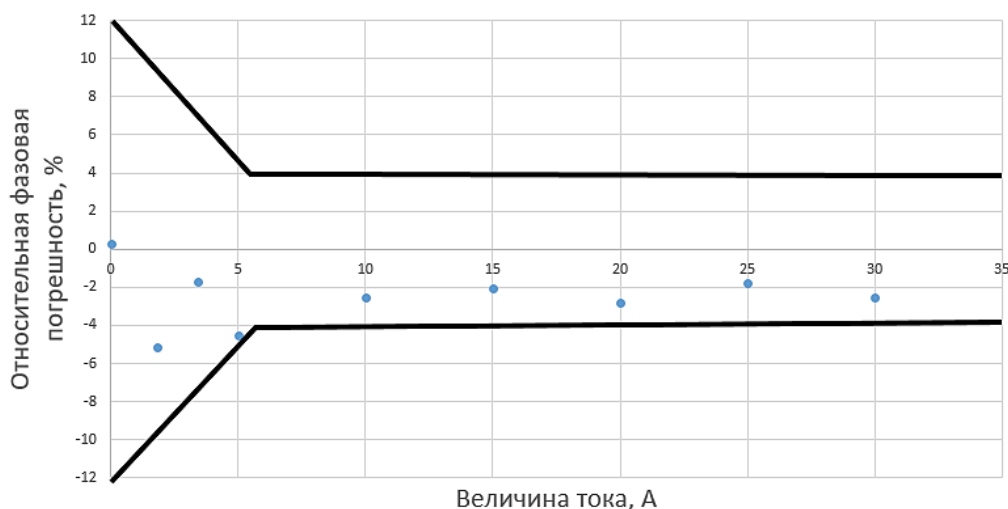


Рис. 6. Оценка относительной погрешности модели оптического измерителя тока по фазе /
Fig. 6. Estimation of the relative error of the optical phase current meter model

Таким образом, можно утверждать, что реализованная математическая модель и соответствующее программное обеспечение адекватно описывают поведение оптической системы измерителя тока, включая взаимодействие поляризованных волн с магнитооптическим кристаллом. Это подтверждает возможность использования предложенного инструмента на этапе инженерного проектирования и предварительной оптимизации компоновки элементов оптического тракта.

Заключение / Conclusion. В результате проведённых исследований разработано программное обеспечение для моделирования оптических схем, реализованное на языке Python с использованием матричного формализма Джонса и библиотек NumPy, matplotlib и PyQt6. Данное решение позволяет эффективно моделировать оптический тракт трансформатора тока на основе ряда магнитооптических элементов. Выполненные расчёты показали высокую точность и наглядность полученных зависимостей, например, величины тока от времени, что подтверждается сравнением с данными экспериментальной реальной модели. Использование разработанного программного продукта способствует оптимизации конфигурации оптических элементов на ранних этапах проектирования и позволяет повысить надёжность и точность измерений, что особенно актуально для применения в цифровых интеллектуальных сетях Smart Grid.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности внедрения интеллектуальных энергосетей Smart Grid / Гришин Д. С. [и др.] // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 1(21). С. 109–116.
2. Янин М. А., Шеметов А. С., Козырев А. В. и др. Текущие результаты опытной эксплуатации электронных ТТ и ТН 500 кВ // Энергоэксперт. 2020. № 1. С. 62–67.
3. Янин М. А., Канафеев Р. И., Иванов Н. А. и др. Сравнение работы цифровых и аналоговых ТТ и ТН при опытах однофазного КЗ на ЦПС 500 кВ ТОБОЛ // Релейщик. 2020. № 3. С. 26–35.
4. Kucuksari S., Karady G. Experimental Comparison of Conventional and Optical Current Transformers. Power Delivery // IEEE Transactions on. 25. 2010. P. 2455-2463.
5. Mihailovic P. Fiber Optic Sensors Based on the Faraday Effect // Sensors. 2021. V. 21. P. 6564-6591.
6. Ingwill U. R. Application of Optical Current Transformers in Digital Substations // Master's Thesis in Energy and Environmental Engineering. Trondheim, 2017. 146 p.
7. Svensson K. B. Fiber Optic Current Sensors // Master's Thesis in Photonics Engineering. Gothenburg, 2014. 41 p.
8. Klaus B. Fiber-Optic Current Sensor Tolerant to Imperfections of Polarization-Maintaining Fiber Connectors // IEEE. 2018. V. 36. P. 2161-2165.
9. Klaus B. Polarimetric Fiber-Optic Current Sensor with Integrated-Optic Polarization Splitter // IEEE. 2019. V. 37. P. 3672-3678.

10. Pan F., Xiao X., Xu Y., Ren S. An Optical AC Voltage Sensor Based on the Transverse Pockels Effect // *Sensors*. 2011. V. 11. P. 6593-6602.
11. Темкина В. С., Лиокумович Л. Б. и др. Волоконные световоды spun-типа и их описание в рамках формализма матриц Джонса при анализе практических оптоволоконных схем // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2023. Т. 16. С. 198–214.

REFERENCES

1. Grishin DS, Pashchenko DV, Sinev MP, Trokoz DA, Yarovaya MV. Features of the introduction of Smart Grid intelligent power grids. Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. 2017;1(21):109-116. (In Russ.).
2. Yanin MA, Shemetov AS, Kozyrev AV. and others. Current results of trial operation of 500 kV electronic TT and TN. *Energexpert*. 2020;(1):62-67. (In Russ.).
3. Yanin MA, Kanafeev RI, Ivanov NA, et al. Comparison of the operation of digital and analog TT and TN during single-phase short-circuit experiments on a 500 kV TOBOL central heating system. *Relayshchik*, 2020;(3):26-35. (In Russ.).
4. Kucuksari S, Karady G. Experimental Comparison of Conventional and Optical Current Transformers. *Power Delivery, IEEE Transactions on*. 25. 2010:2455–2463.
5. Mihailovic P. Fiber Optic Sensors Based on the Faraday Effect. *Sensors*. 2021;(21):6564-6591.
6. Ingwill UR. Application of Optical Current Transformers in Digital Substations / Master's Thesis in Energy and Environmental Engineering. Trondheim; 2017. 146 p.
7. Svensson KB. Fiber Optic Current Sensors. Master's Thesis in Photonics Engineering. Gothenburg; 2014. 41 p.
8. Klaus B. Fiber-Optic Current Sensor Tolerant to Imperfections of Polarization-Maintaining Fiber Connectors // *IEEE*. 2018;(36):2161-2165.
9. Klaus B. Polarimetric Fiber-Optic Current Sensor with Integrated-Optic Polarization Splitter. *IEEE*. 2019;(37):3672-3678.
10. Pan F., Xiao X., Xu Y., Ren S. An Optical AC Voltage Sensor Based on the Transverse Pockels Effect. *Sensors*. 2011;(11):6593-6602.
11. Temkina VS, Liokumovich LB. and others. Spun-type fiber light guides and their description within the framework of the Jones matrix formalism in the analysis of practical fiber-optic circuits. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Physico-Mathematical Sciences*. 2023;(16):198-214. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Александрович Ладыгин – аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, факультет нефтегазовой инженерии, СКФУ, Researcher ID: OSI-0438-2025.

Макар Дмитриевич Красько – аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, факультет нефтегазовой инженерии, СКФУ, Researcher ID: OQK-6235-2025.

Дмитрий Алексеевич Турченко – магистр кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, факультет нефтегазовой инженерии, СКФУ, Researcher ID: LTD-8375-2024.

Александр Витальевич Овчаренко – магистр кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, факультет нефтегазовой инженерии, СКФУ, Researcher ID: OTG-8640-2025.

Павел Константинович Черников – бакалавр кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, факультет нефтегазовой инженерии, СКФУ, Researcher ID: OTH-2825-2025.

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Александрович Ладыгин

Сбор и анализ данных, разработка оптической схемы, проверка разработанной модели оптической схемы, участие в практическом эксперименте.

Дмитрий Алексеевич Турченко

Разработка программного обеспечения по моделированию оптической схемы.

Макар Дмитриевич Красько

Сборка установки для испытания образца и проведение практического эксперимента.

Александр Витальевич Овчаренко

Анализ полученных результатов, оформление материалов.

Павел Константинович Черников

Сбор и анализ данных, анализ полученных результатов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Ladygin – Postgraduate Student of the Department of AESiE, Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: OSI-0438-2025.

Makar D. Krasko – Postgraduate Student of the Department of AESiE, Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: OQK-6235-2025.

Dmitry A. Turchenko – Master of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: LTD-8375-2024.

Alexander V. Ovcharenko – Master of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: OTG-8640-2025.

Pavel K. Chernikov – Bachelor of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: OTH-2825-2025.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander A. Ladygin

Data collection and analysis, development of an optical circuit, verification of the developed optical circuit model, participation in a practical experiment.

Dmitry A. Turchenko

Software development for optical circuit modeling.

Makar D. Krasko

Assembling a sample testing facility and conducting a practical experiment.

Alexander V. Ovcharenko

Analysis of the results obtained, design of materials.

Pavel K. Chernikov

Data collection and analysis, analysis of the results obtained.