

Prof. dr hab. inż. Zabolotna Natalia,

Wydział Inżynierii Biomedycznej i Systemów Optyczno-Elektronicznych
Winnicki Narodowy Uniwersytet Techniczny, Winnica

РЕЦЕНЗИЯ

**докторской диссертации Муссабекова Каната
на тему: «ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ И УДЛИНЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ»**

1. Основание для подготовки рецензии.

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Politechniki Lubelskiej z dnia 25/10/2023 roku, Uchwała nr AEiE/37_3.11b/20-24;
- rozprawa doktorska **msc inż. Kanata Mussabekova pt. „Оптычна метода рѳвночасного помiarу температуры и выдлужения линии энергетычной”**
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r., poz. 85);
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).
- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Politechniki Lubelskiej z dnia 21 czerwca 2023 roku, uchwałą o sygnaturze

2. Характеристика работы.

Представленная на рассмотрение докторская диссертация написана на русском языке, имеет 108 страниц общего текста, из которых 98 страниц основного печатного текста и список литературы в количестве 112 наименований. Библиография отражает современное состояние знаний в области измерения температуры и удлинения линий электропередачи и способы их мониторинга с целью разработки метода параллельного измерения температуры и удлинения линий с помощью волоконно-оптических датчиков с брэгговскими решетками.

Подбор литературы целенаправленный и правильный.

Диссертация разделена на 9 основных глав, включая введение, выводы, литературу. Иллюстративный материал, представленный в работе, нагляден и отражает достижения Муссабекова Каната в решении задачи разработки концепции одновременного измерения температуры и удлинения ЛЭП с помощью волоконно-оптических брэгговских решеток. Задачи, поставленные в диссертации есть правильным и четким, а используемая терминология верна и понятна.

3. Актуальность темы диссертации.

За последние годы волоконно-оптические датчики физических величин продемонстрировали значительный потенциал для проведения физических измерений и других практических применений. Это во многом обусловлено их чувствительностью к широкому кругу физических величин, химической устойчивостью, долговечностью, простотой сопряжения с высокоскоростными и помехозащищенными волоконно-оптическими линиями связи, пожаро- и взрывобезопасностью. Последнее особенно важно для применений в отраслях, связанных с горючими и взрывоопасными материалами, например, в угле-, нефте-, газодобыче и пр.

Кроме этого, сенсоры на основе оптоволокна достаточно компактны, не требуют систематического обслуживания и очень устойчивы к химическому воздействию. В угле-, нефте- и газодобыче волоконные датчики используются, в первую очередь, для измерения температуры (обычно методом комбинационного рассеяния) и давления (ВБР, интерферометры) в скважинах, а также для мониторинга трубопроводов. Волоконные датчики температуры также могут применяться в системах пожарной сигнализации различных сооружений, а также в энергетике (контроль нагрева элементов турбогенераторов, линий электропередач, трансформаторов и т.д.).

В энергетике также используются датчики деформаций и вибраций на основе ВБР. В атомной энергетике используются радиационно-стойкие датчики. Датчики деформаций и вибраций используются также для мониторинга элементов конструкций в капитальном строительстве (мосты, тоннели, дамбы, плотины, морские нефтедобывающие платформы, фундаменты, крыши, высотные здания и т.д.). В последнее время активно развиваются технологии внедрения датчиков в композитные материалы (т.е. «умные» материалы) для онлайн мониторинга состояния изделий из этих материалов (в объектах инфраструктуры, авиастроении, космической технике и т.д.). Однако масштабы практического использования волоконных сенсорных систем ограничены достаточно высокой стоимостью оптоэлектронного устройства опроса волоконных датчиков, как в случае точечных датчиков (ВБР), так и в случае распределенных (в первую очередь, датчиков температуры на основе комбинационного рассеяния света).

Необходимым свойством волоконной сенсорной системы является ее надежность и долговременная стабильность работы, что в свою очередь требует полностью волоконной схемы системы, включая устройство опроса. С этой точки зрения создание новых эффективных и недорогих устройств опроса является актуальной и важной задачей.

4. Предметный анализ и оценка работы.

Первая глава диссертации, является введением и содержит описание актуальности темы работы. Эта глава представляет собой обзор мировых источников литературы по вопросам, касающимся темы исследований.

Наведено размышления автора относительно преимуществ использования оптических параметров решеток Брэгга для использования в измерительной технике. Оптоволоконные технологии измерения физических параметров являются одной из наиболее быстроразвивающихся областей прикладной оптики. Оптоволоконные датчики обладают малым весом и размером, отсутствием тока в измерительном тракте, нечувствительностью к электромагнитным помехам и воздействию агрессивных сред, а также возможностью мультиплексирования и объединения большого количества датчиков в распределённые информационно-измерительные системы. Благодаря этим уникальным свойствам они широко используются в решении различных научных и практических задач, в которых необходимо измерять температуру, деформации и другие параметры протяжённых объектов. Из приведенного в этой главе материала следует, что автор диссертации ориентируется в рассматриваемой теме и умеет качественно обрабатывать источники литературы.

Вторая глава посвящена формированию основного тезиса, цели и объема необходимой работы. В главе сформулирован тезис, который звучит так: Использование оптоволоконных датчиков позволит разработать метод одновременного измерения температуры и удлинения электроэнергетической линии.

Для доказательства тезиса необходимо решить ряд задач, которые автор перечислил в этой главе. Автором сформированы научная новизна, объект и предмет исследований.

В третьей главе автор проводит анализ литературных источников в области исследований и показывает, что отсутствие молниезащитных тросов на ВЛ 35 кВ (кроме подходов к подстанциям) приводит к увеличению доли грозовых отключений, в то же время хорошая грозозащита ВЛ 330 и 500 кВ сдвигает центр тяжести автоматических устойчивых отключений в сторону «невыясненных причин». Относительное увеличение механической прочности опор и проводов ВЛЭП 330 и 500 кВ – снижает их чувствительность к гололедным, гололедно-ветровым нагрузкам. Распределение отключений ВЛЭП разного напряжения по причинам, приведенное в табл. 1.2, позволяет подойти к выбору методов и средств повышения надежности линий дифференцированно в зависимости от свойств и конструктивных особенностей данной группы линий. Среди невыясненных причин находится удлинение линии вызвано температурой. Из-за этого появляется проблема датчиков, которые позволяют одновременно измерять температуру и удлинение.

В четвертой главе автор показывает, что потребность в увеличении энергии вынуждает энергосистемы использовать силовые кабели на пределе их физических возможностей, а интересы безопасности и эффективности имеют огромное значение для операторов, которым важно знать, какие процессы происходят вдоль кабельной трассы (локальный нагрев, критическая раскочка проводов, критический провес, обледенение). Системы мониторинга воздушных электросетей ЛЭП обеспечивают дополнительные функции,

позволяя повысить эффективность передачи электроэнергии и уменьшить потери. Мониторинг не только обеспечивает повышение надежности транспорта электроэнергии, но и способствует уменьшению расходов на обслуживание линий электропередачи за счет более оперативных и точных данных при локализации аварийных сегментов, а также прогнозирования проблемных ситуаций на трассе. Использование перспективных систем мониторинга воздушных электросетей в последнее время стало особенно актуальным, поскольку, во-первых, существенно возросла стоимость ущерба при крупных авариях, а во-вторых – в связи с уменьшением надежности энергосистем вследствие сильного износа как используемого оборудова- ния, так и проводных линий. Из-за этого интересным становится использование оптоволоконных датчиков, которые позволяют измерять одновременно температуру и удлинение проводов.

Пятая глава посвящена выбору оптоэлектронной элементной базы. Использование лавинных фотодиодов вместо р-і-n позволит существенно улучшить точность измерения температуры. Простран- ственное разрешение составляет ~10 м. Оно ограничено полосой пропускания фотодетектора (10 МГц) и может быть улучшено до значений единиц метров, определяющихся длительностью импульса зондирующего излучения импульсного волоконного лазера. На основе проведенных исследований были разработаны приборные варианты распределенных датчиков для использования на практике. Функциональная схема блока обработки распределенного датчика температуры. В состав лазерного модуля входит токовый драйвер, который обеспечивает питание, термостабилизацию и управление импульсным лазером, который создает первичный зондирующий импульс длиной 10–40 нс. Токовый драйвер имеет цифро-аналоговый преобразователь для преобразования цифрового сигнала синхронизации в аналоговый сигнал, управляющий генерацией лазерного импульса, а также величиной силы тока, подаваемой на лазер, и аналого-цифровой преобразователь для обратной связи, управления.

В шестой главе показано, что исходя из методики применения и результатов срабатывания, все производившиеся ранее и современные средства ОМП разделяются на дистанционные и топографические. Ограниченная точность дистанционных указателей продиктована отсутствием возможности для автоматического изменения их параметров функционирования в соответствии с текущим состоянием линии. Более того, как отмечается в, в качестве исходных вычислительных данных нередко задаются справочные значения характеристик ВЛЭП, несмотря на то, что параметры даже исправной линии, находящейся в долговременной эксплуатации, могут в значительной мере изменяться по мере накопления дефектов, износа, усталостных повреждений, строительства параллельных или пересекающихся линий и т.д. Всё это позволяет прийти к выводу о том, что дистанционные искатели определяют лишь предполагаемую зону места повреждения, в то время как точность ОМП топографическими средствами напрямую зависит от их количества и частоты размещения на линии.

Сделан вывод, что исходя из анализа публикаций, посвящённых тематике исследования, следует, что задачи диагностики гололёдообразования и определения мест повреждений на ВЛЭП рассматриваются изолированно, несмотря на их однозначную взаимосвязь. Вероятность возникновения аварий на различных участках ВЛЭП определяется распределением климатического воздействия по трассе линии, следовательно, контроль гололёдно-ветровых нагрузок на всём протяжении ВЛЭП позволяет спрогнозировать не только аварии, но и возможные места повреждения, что сократит процедуру ОМП. Иными словами, объединение средств мониторинга климатического воздействия и ОМП делает возможным построение адаптивной информационно-измерительной системы для прогнозирования и высокоточного определения мест неисправностей на ВЛЭП.

В главе семь показано, что для разработки метода одновременного измерения температуры и удлинения ЛЭП необходимо определить ее математическую модель и возможную изменчивость условий, в которых она сможет работать. Это позволит с помощью оптоволоконных технологий разработать необходимые датчики для одновременного измерения как рабочей температуры линии, так и ее удлинения. Фотонные оптические волокна и брэгговские решетки, записанные как на обычных волоконных, так и на фотонных оптических волокнах, могут использоваться для одновременного измерения температуры и удлинения.

Сделан вывод, что в связи с большей доступностью и доработанной технологией записи брэгговских решеток на классических оптических волокнах для дальнейшего рассмотрения были приняты простые равномерные брэгговские решетки. 4. Принятые допущения относительно диапазона изменения рабочей температуры ЛЭП и ее напряжений позволили провести анализ необходимой изменчивости параметров сети, на основании чего были спроектированы и изготовлены брэгговские решетки, соответствующие этим параметрам.

В восьмой главе показано, что для одновременного измерения температуры и напряжения необходим метод, в котором будут использоваться две брэгговские решетки – одна для температуры, другая для напряжения и температуры. Для измерения температуры будет использоваться решетка, свободно закрепленная на линии электропередачи, которая одновременно используется в качестве эталона для определения влияния температуры на удлинение кабеля (определяется второй брэгговской решеткой).

В девятой главе сделаны общие выводы по анализу работы энергетической линии в меняющихся условиях окружающей среды (от льда до работы с высокой температурой), а также показано, что разработка оптоволоконного датчика, который позволит одновременно измерять температуру линии и ее удлинение. Это связано с возможностью появления аварийных ситуаций в связи с чрезмерной нагрузкой, которая появляется при низких температурах (меньших чем 10°C) и чрезмерным провисом линии, появляющимся в последствии удлинения линии под влиянием высокой температуры. Это повлияло на выбор температур с -50°C по $+180^{\circ}\text{C}$.

Анализ литературы, которая состоит из 112 источников, которые полностью коррелируются с темой диссертационных исследований.

5. Подробные комментарии.

Тезис, цель и задачи работы были сформулированы четко и корректно, не вызывая никаких сомнений и недомолвок. Работа в согласованном порядке проводится согласно намеченной цели, что привело к доказательству выдвинутого тезиса. Принятая методика доказательства логична, так как осуществляется от определения потребностей и требований через анализ, разработку математической модели, проведения экспериментов и сравнения полученных результатов с результатами моделирования.

Работа состоит из анализа теоретических сведений, математического моделирования и экспериментальных исследований. Представлены результаты лабораторных испытаний оптических датчиков температуры и удлинения с однородными брэгговскими решетками. Проведенные испытания охватывают характерные диапазоны изменения измеряемых величин для воздушных линий электропередачи. Это позволило предложить концепцию двухканального оптоволоконного датчика, позволяющего одновременно измерять температуру и деформацию ЛЭП.

Результаты моделирования сопоставлены с результатами экспериментальных исследований. Исследования показали высокую сходимость полученных результатов. Это подтверждает выполнения всех поставленных во второй главе задач исследований.

Собственными достижениями автора считаю:

- Основной частью работы является разработка концепции одновременного измерения температуры и удлинения ЛЭП с помощью волоконно-оптических брэгговских решеток. Для этого была определена температурная зависимость напряжения в проводе линии и его удлинения. Представлены возможные решения по определению необходимых величин с помощью оптических датчиков.
- Разработанная математическая модель позволяет определить теоретический объем изменений параметров линии электропередачи, который способствует подбору необходимых параметров датчиков. Для одновременного измерения температуры и удлинения проводов можно использовать двулучепреломляющие оптоволокна, фотонные волокна или брэгговские решетки.
- Представлены результаты лабораторных испытаний оптических датчиков температуры и удлинения с однородными брэгговскими решетками. П
- Проведенные испытания охватывают характерные диапазоны изменения измеряемых величин для воздушных линий электропередачи. Это позволило предложить концепцию двухканального оптоволоконного

датчика, позволяющего одновременно измерять температуру и деформацию ЛЭП.

- Возможность комплексно проводить обширный исследовательский эксперимент, анализировать современную литературу, моделировать поставленные задачи исследования в современных вычислительных приложениях, самостоятельно выполнять исследования и сравнивать полученные результаты с результатами моделирования.

К недостаткам работы, которые должен объяснить докторант, относятся:

- в седьмом разделе автором разработана математическая модель и осуществлено моделирование, однако с текста не понятно, почему моделирование осуществлялось в диапазоне длин волн от 1515 до 1570 нм, с чем связан выбор именно таких значений длин волн и проводились ли исследования на других длинах волн?

- в восьмом разделе автором осуществлены лабораторные испытания волоконно-оптических датчиков температуры и удлинения. Отмечено, что при предполагаемом изменении температуры от -50°C до 180°C датчик в виде брэгговской решетки работает в линейном диапазоне, однако с текста диссертации не понятно, какая точность измерений может быть достигнута (гарантирована) при использовании датчиков температуры и деформаций, построенных на основании брэгговских решеток;

- после проведения экспериментальных исследований автор сопоставляет результаты экспериментов с результатами моделирования и делает вывод о высокой сходимости полученных результатов. Поэтому возникает вопрос, какое численное значение погрешности (разности) результатов моделирования с результатами экспериментов?

- чем подтверждается адекватность разработанной автором математической модели для анализа брэгговских решеток?

- во втором разделе диссертации определены тезисы, задачи и научная новизна, которые направлены на создания возможностей разработки датчиков растяжения на основании косых решеток Брэгга, но расчетов погрешности или среднеквадратических отклонений в выводах диссертации не наводится. Поэтому возникает вопрос на сколько ваш метод измерения деформаций и температуры точнее (лучше) по сравнению с существующими методами?

- по тексту диссертации встречаются синтаксические ошибки.

Перечисленные недостатки не влияют на общее восприятие работы, которое я считаю положительным.

6. Резюме и заключение.

При ознакомлении с представленной на оценку докторской диссертацией констатирую, что:

- доказан тезис диссертации, изложенный во второй главе: Использование оптоволоконных датчиков позволит разработать метод одновременного измерения температуры и удлинения электроэнергетической линии.
- тема диссертации актуальна и хорошо скомбинированы как теоретические сведения и результаты математического моделирования, так и результаты экспериментальных исследований;
- в диссертации указаны необходимость и перспективы будущих исследований, направлены на решение вопросов, связанных с разработкой метода параллельного измерения температуры и удлинения линии электропередач при использовании оптоволоконных датчиков с решетками Брегга.

Из вышеизложенного следует, что докторант обладает компетенцией для самостоятельного проведения научных исследований и характеризуется значительными знаниями по научной дисциплине, на которую распространяются вопросы, освещаемые в диссертации. На мой взгляд, докторант показал умение сформулировать задачу, решить ее самостоятельно и проверить ее полезность, подтвердив правильность принятой теории и инструментария для ее реализации. Намеченная работа была выполнена и тезис доказан.

Reasumując uważam, że rozprawa mgr Kanata Mussabekova pt. „Оптическая метода одновременного измерения температуры и удлинения линии энергетической” spełnia wymagania stawiane pracom promocyjnym na stopień doktora nauk technicznych w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.



/recenzent/

prof. dr hab. inż. Natalia Zabolotna