

УДК 681.785:681.7.068

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**Ксенофонтов М.А.¹, Поляков А.В.²**¹*НИИ прикладных физических проблем БГУ
Минск, Республика Беларусь*²*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

В условиях современных энергонасыщенных производств предъявление жестких требований к метрологическим параметрам электрических датчиков часто наталкивается на трудноразрешимые проблемы защиты их от различного рода электромагнитных помех, что особенно важно при значительном удалении датчиков от пунктов сбора информации. Поэтому оптические методы в области электрических измерений в энергетике и промышленности все чаще рассматриваются как перспективная альтернатива уже существующим электрическим, так как они обладают рядом преимуществ: более широкими полосой частот и динамическим диапазоном, хорошими диэлектрическими свойствами в сочетании с высокой пожарной безопасностью и коррозионной стойкостью и т.д. Это обуславливает актуальность задачи разработки новых методов регистрации и обработки оптических сигналов и построения волоконно-оптических измерительных систем, сочетающих в себе основные принципы надежности и дешевизны с многофункциональностью и высокой точностью измерений.

По своему назначению высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП) делятся на:

- Сверхдальние высоковольтные линии напряжением 500 кВ и выше (предназначены для связи отдельных энергосистем).
- Магистральные высоковольтные линии напряжением 220 и 330 кВ (предназначены для передачи энергии от мощных электростанций, а также для связи энергосистем и объединения электростанций внутри энергосистем – к примеру, соединяют электростанции с распределительными пунктами).
- Распределительные высоковольтные линии напряжением 35, 110 и 150 кВ (предназначены для электроснабжения предприятий и населенных пунктов крупных районов)
- Высоковольтные линии 20 кВ и ниже, подводящие электроэнергию к потребителям.

В связи с наибольшей распространенностью практический интерес представляют последние два класса ВЛЭП.

Волоконно-оптические датчики электрического напряжения в основном предназначены для удаленного контроля параметров высоковольтных линий электропередач и трансформаторных подстанций. Разработаны несколько типов оптических датчиков напряжения, основанных на электрооптическом эффекте [1, 2], яв-

лении электрострикции [3], а также с использованием пьезоэлектрических материалов [4,5]. Из всех перечисленных конструкций наиболее удачной по своим метрологическим характеристикам представляется волоконно-оптический датчик на основе интерферометра Маха-Цендера с использованием пьезоэлектрической трубки [5]. Однако на успешную работу таких датчиков влияет ряд факторов, связанных с интерферометрическими методами измерений, что ограничивает их широкое практическое применение. Во-первых, это ошибка измерений, возникающая из-за относительного изменения длин плеч интерферометра при флуктуациях температуры и давления. Во-вторых, необходимо постоянно контролировать поляризацию излучения, чтобы уменьшить связанное с этим затухание. В-третьих, по сравнению с многомодовыми волокнами используемые одномодовые волоконные световоды требуют более сложных устройств стыковки с другими оптоэлектронными компонентами и являются менее прочными. В-четвертых, наблюдается высокая чувствительность интерференционной картины к вибрациям и другим механическим воздействиям.

Улучшение эксплуатационных характеристик в волоконно-оптических датчиках связано с переходом от аналоговых измерений к использованию частотного метода измерений. Для контроля напряжения предлагается использовать волоконно-оптический датчик (ВОДН), принцип действия которого основан на регистрации изменения частоты рециркуляции одиночного импульса. Измерение электрического напряжения осуществляются на основе последовательного отслеживания изменения разности частот рециркуляции на соседних участках на соседних длинах волн: $\Delta f_i(U) = f_{i-1}(\lambda_{i-1}) - f_i(\lambda_i)$. Изменение частоты рециркуляции можно регистрировать с высокой точностью при относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции в пределах $(2-6) \cdot 10^{-6}$ (в зависимости от длины волоконного световода) при времени измерения 1 с. Чувствительным элементом является пьезокерамическая трубка (ПЗТ), на которую намотан волоконный световод и жестко на ней зафиксированный с помощью эпоксидных смол. В качестве пьезоэлемента используется пьезокерамика – поликристаллические сегнетоэлектрические твердые растворы, подвергнутые после синтеза поляризации в постоянном электри-

ческом поле. Они обладают сильным пьезоэффектом, большой стабильностью, большой механической прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, сравнительной простотой и невысокой стоимостью изготовления. К ПЗТ прикладывается измеряемое напряжение. В данном устройстве используется обратный поперечный пьезоэффект, при котором приложенное к диску напряжение приводит к изменению его размеров, что влечет за собой изменение длины волоконного световода (ВС), его показателя преломления и, следовательно, частоты рециркуляции. В результате радиальных механических напряжений изменение радиуса диска Δr под влиянием приложенного напряжения U записывается следующим образом: $\Delta r / r = 2\beta \frac{U}{h}$ [6], где β – пьезоэлектрическая постоянная, h – толщина диска.

Источником излучения является набор полупроводниковых инжекционных лазеров, генерирующих в диапазоне длин волн 1530–1610 нм и мощностью излучения 3–5 мВт. Далее излучение на различных длинах волн с помощью мультиплексора собирается в один световод и направляется к чувствительным элементам. В качестве чувствительного элемента используется пьезоэлектрическая трубка типа PZT-4. Выбор данного типа ПЗТ обусловлен его линейной характеристикой в широком диапазоне измеряемых напряжений и отсутствием петли гистерезиса. Диаметр диска выбирается согласно следующим условиям. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волоконно изогнуто столь сильно, что поверхностные напряжения превысят 0,2%, то весьма вероятно, что в процессе эксплуатации в нем могут возникнуть значительные трещины. Для того, чтобы этого не произошло, должно выполняться следующее условие: $d > 500D_{\text{ан}} - 2h_1$, где $D_{\text{вс}}$ – диаметр оболочки ВС (125 мкм), h_1 – толщина слоя защитного покрытия ($h_1=62,5$ мкм, диаметр ВС вместе с полимерным покрытием 250 мкм), т.е. $d > 6,2$ см ($r > 3,1$ см). Для действующего значения переменного напряжения для PZT-4 $\beta = 1,3 \cdot 10^{-10}$ м/В, максимальная измеряемая напряженность электрического поля составляет $E=14,4$ кВ/см, поэтому чтобы измерять напряжения, например, до 20 кВ, толщина диска должна быть не менее 1,5 см.

Спектральная селекция излучения осуществляется с помощью волоконных брэгговских решеток (ВБР) с различным периодом, при этом каждая решетка настроена на отражение определенной длины волны $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Отраженная волна проходит через направленный ответвитель и усиливается волоконным эрбиевым усилителем (ВЭУ). ВЭУ позволяет одновременно усиливать излучение во всем рабочем спектральном диапазоне, при этом коэффициент усиления зависит от мощности входного сигнала. В связи с тем, что

при увеличении входного сигнала коэффициент усиления нелинейно падает, то на выходе ВЭУ нет необходимости применять аттенуаторы для ослабления отраженного сигнала от близлежащих секций. Если использовать волоконный эрбиевый усилитель со спектральной полосой усиления 35 нм и применять лазерные источники, излучающие на длинах волн, разнесенных на 200 ГГц (1,6 нм) в окрестностях длины волны 1550 нм, в этом случае с помощью разработанной схемы ВОДН можно организовать одновременный мониторинг до 10 электрических линий.

Сигналы на различных длинах волн с выхода ВЭУ пространственно разделяются с помощью оптического демультиплексора и поступают на фотоприемник. Фотоприемником является быстродействующий InGaAs лавинный фотодиод (ЛФД) Mutsubishi PD893D2 со спектральной полосой 1000–1600 нм, имевший при коэффициенте лавинного умножения $M=10$, сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}=50$ Ом и $\lambda=1300$ нм полосу частот 2,5 ГГц и чувствительность $S_{\lambda}=0,8$ А/Вт при $M=1$. Использование ЛФД позволяет не применять электронные усилители на их выходе и обеспечить необходимый уровень сигнала. Электрические сигналы с выхода ЛФД поступают на пороговые устройства (ПУ) с регулируемым порогом срабатывания, основу которого составляет компаратор Am685 и преобразователь уровня F100125. Уровень порога для каждого ПУ индивидуально задается блоком управления таким образом, чтобы с одной стороны, исключить срабатывание по шумам (минимизировать вероятность ложной тревоги), а с другой стороны – устойчиво срабатывать по уровню полезного сигнала (минимизировать вероятность пропуска сигнала). ПУ выдает стандартные по амплитуде и длительности электрические сигналы, который через блок управления поступают на блок регенерации (БР). БР формирует электрические импульсы требуемой амплитуды / формы / длительности, которые усиливаются модулятором тока (МТ) и поступают в виде импульсов тока накачки на полупроводниковые источники излучения. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается. Блок обработки и отображения информации (БО) совместно с двухканальным частотомером (ЧМ) регистрирует частоту рециркуляции на каждой длине волны и изменение разности этих частот по соответствующему алгоритму преобразуется в измеряемое напряжение, которое фиксируется и отображается на мониторе.

Погрешность датчика, т. е. минимальное изменение измеряемой физической величины, которое может быть однозначно и достоверно зафиксировано, во многом определяется стабильностью частоты рециркуляции. Частота рециркуляции определяется следующим образом:

$$f = [T_{\xi} + 2Ln/c]^{-1},$$

где L – длина секции ВС; n_0 – показатель преломления сердцевины волокна ($n=1,4655$); T_3 –

временная задержка распространения импульса в других элементах контура.

Именно флуктуации T_3 и определяют величину нестабильности частоты рециркуляции. Наиболее существенное влияние на изменение f оказывают следующие факторы: временной джиттер в инжекционном лазере, возникающий из-за случайных изменений времени задержки между импульсом тока накачки и излучением лазера; нестабильность времени отклика лавинного фото диода; временной разброс моментов срабатывания порогового устройства, который связан как с изменением амплитуды входного сигнала, так и с флуктуациями самого порога срабатывания. Из приведенных в [7] результатов исследований стабильности частоты рециркуляции следует, что для минимизации влияния перечисленных факторов необходимо выполнять следующие условия. Для уменьшения временного джиттера в ИЛ нужно, чтобы в процессе протекания тока накачки происходило минимальное нагревание активной области лазера, т.е. длительность импульса тока накачки не должна превышать 10 нс. Наименьшее значение нестабильности времени распространения сигнала в контуре достигается при коэффициенте лавинного умножения ЛФД $M \approx 10$, когда отношение сигнал/шум близко к максимальному значению [8]. Показано [9], что при комнатной температуре для анализируемой системы оптимальный коэффициент лавинного умножения для таких ЛФД лежит в пределах 8–12 и практически не зависит от мощности излучения ИЛ или длины ВС. Увеличение тока постоянного смещения I_0 ведет к уменьшению амплитудных флуктуаций интенсивности излучения и минимизирует временной джиттер ИЛ. Данный эффект будет наблюдаться до $I_0=0,9-0,95 I_{th}$, далее в предпороговом режиме излучение лазера становится нестабильным. Во всех случаях минимальные флуктуации наблюдались, когда величина порога блока регенерации соответствовала линейному участку фронта импульса. При этом, чем больше крутизна этого участка, тем в меньшей степени на величину

флуктуаций T_3 будут влиять случайные изменения порогового напряжения. Поэтому с учетом пусть и незначительной временной дисперсии ВС значение переднего фронта импульса тока накачки ИЛ должно быть 10 нс и менее. В этом случае величина T_3 оценивается в пределах 50–60 нс.

Показано, что зависимость изменения частоты рециркуляции от приложенного измеряемого электрического напряжения носит линейный характер, и чувствительность метода для ПЗТ радиусом 12 см составляет 4,2 Гц/кВ. Установлено, что с точки зрения достижения минимальной погрешности измерений чувствительные элементы следует располагать в порядке возрастания максимальных действующих напряжений в измеряемых линиях и в зависимости от радиуса и толщины ПЗТ, длины волоконной секции, не подвергающейся деформации, относительная методическая погрешность составляет 0,8–1,2% в диапазоне напряжений от 20 кВ до 150 кВ.

1. Optically controlled fiber voltage sensor / V. N. Fillipov [et. al] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2000. – Vol. 12, № 7. – P. 870 – 872.
2. An optical AC voltage sensor based on the transverse pockels effect / Pan Feng [et. al] // Sensors.–2011. – № 11. – P. 6593 – 6602.
3. Bohnert K. Fiber-optic sensing of voltages by line interrogation of the electric field / K. Bohnert, J. Nehring // Opt. Lett. – 1989. – Vol. 14, № 5. – P. 290–292.
4. Bohnert K. Fiber-optic voltage sensor for 420 kV electric power systems / K. Bohnert, J. Kostovic, and P. Pequignot // Opt. Eng. – 2000. – Vol. 39. –P. 3060–3067.
5. Frequency-output fiber-optic voltage sensor for high-voltage lines / L. Martinez-leon [et. al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2001. – Vol. 13, № 9. – P. 996–998.
6. Piezoelectric-modulated optical fibre Bragg grating high-voltage sensor / M. Pacheco [et. al] // Meas. Sci. Technol. – 1999. – P. 777 – 782.
7. Поляков, А.В. Стабильность частоты рециркуляции в кольцевых структурах с волоконно-оптической линией задержки / А.В. Поляков, С.И. Чубаров // Изв. вузов. Приборостроение.– 2003.–Т.46, №5.– С.49 – 55.
8. Поляков, А.В. Температурная зависимость шумовых характеристик оптоволоконных информационно-измерительных систем / А.В. Поляков // Изв. вузов. Приборостроение.– 2006.– Т. 49, № 8.– С. 33 – 37.
9. Ксенофонтов, М.А. Стабильность частоты рециркуляции в замкнутых оптоэлектронных системах регенеративного типа / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // Электроника-инфо. – 2010. – №5. – С.76 – 80.

УДК 535.2:616-71

НЕИНВАЗИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ГЛЮКОМЕТР С ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМИ РЕФЛЕКТОРАМИ

Куприй А.И., Безуглый М.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина

Проблема сахарного диабета очень остро стоит в современном обществе, а значит есть необходимость в создании приборов для контроля глюкозы. Большинство современных приборов используют инвазивный принцип диагностики, но для удобства возможно создание устройств, в

основу работы которых положено неинвазивный метод определения концентрации.

На сегодняшний день существуют такие типы глюкометров:

– фотометрические; уровень глюкозы в крови человека определяется в зависимости от