

КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

¹Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета.

²Белорусский государственный университет.

Минск, Республика Беларусь. polyakov@bsu.by

Представлена структура и принцип действия квазираспределенной рециркуляционной оптоволоконной системы мониторинга высоковольтных напряжений. Чувствительным элементом является комбинация пьезокерамической трубки с намотанным на нее волоконным световодом. В устройстве используется обратный поперечный пьезоэффект. Принцип измерения основан на регистрации изменения частоты рециркуляции под воздействием приложенного напряжения.

В связи с быстрым развитием автоматизированных систем контроля и управления во всех областях промышленности возрастает потребность в датчиках физических величин – температуры, давления, ускорения, перемещения, тока. Помимо высоких метрологических характеристик, датчики должны обладать большой надежностью, стабильностью, помехоустойчивостью, долговечностью и простотой интегрирования с микроконтроллерными системами управления. Особенно это относится к таким отраслям, как авионика, металлургия, автоэлектроника, теплотехника и энергетика, медицинская техника, высокоточные системы вооружений. Перечисленным требованиям в значительной степени удовлетворяют волоконно-оптические датчики (ВОД).

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.

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], явлении 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 стабильную работу таких датчиков влияет ряд факторов, связанных с интерферометрическими методами измерений.

Улучшение эксплуатационных характеристик в волоконно-оптических датчиках связано с использованием частотного метода измерений. Для контроля напряжения предлагается использовать волоконно-оптический датчик (ВОДН), принцип действия которого основан на регистрации изменения частоты рециркуляции одиночного импульса (рисунок 1). 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 $2 \cdot 6 \cdot 10^{-6}$ (в зависимости от длины волоконного световода) при времени измерения 1 с. Чувствительным элементом является пьезокеламическая трубка (ПЗТ), на которую намотан волоконный световод и жестко на ней зафиксированный с помощью эпоксидных смол. 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.

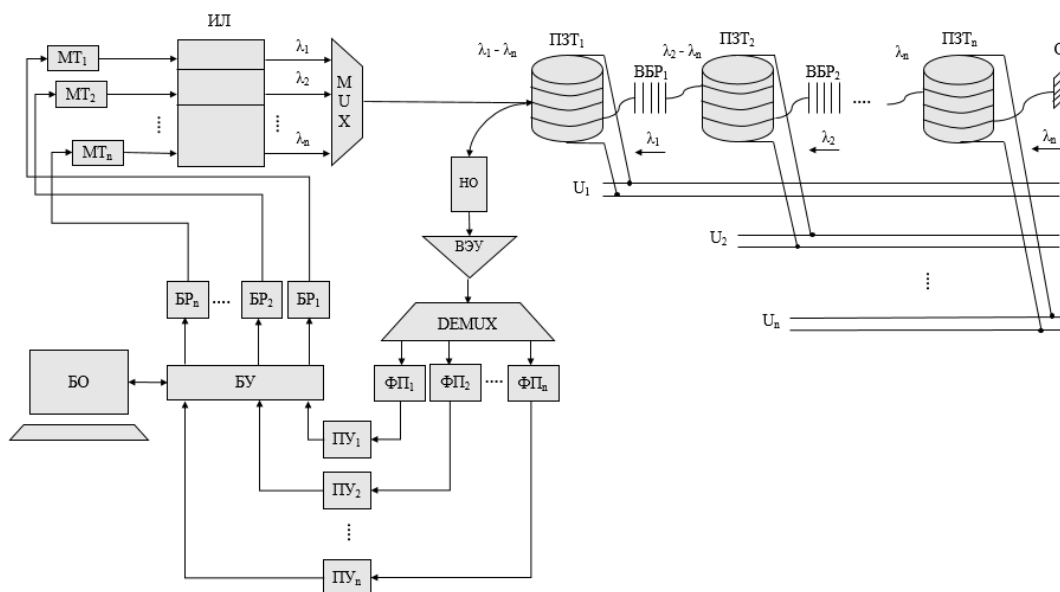


Рисунок 1 – Структурная схема квазираспределенной волоконно-оптической системы измерения электрического напряжения рециркуляционного типа, где ИЛ - линейка инжекционных лазеров; ПЗТ - пьезокеламическая трубка; ВЭУ - волоконный эрбиевый усилитель; ВБР - волоконная брэгговская решетка; О - отражатель; НО - направленный ответвитель; ФП - фотоприемники; ПУ - пороговое устройство; БУ - блок управления; БО - блок обработки и отображения данных; МТ - модулятор тока; БР - блок регенерации; MUX - мультиплексор; DEMUX - демультиплексор; $U_1, U_2 \dots U_n$ - измеряемое напряжение

Источником излучения является линейка полупроводниковых инжекционных лазеров, генерирующих импульсы 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 которых используется пьезокеламическая трубка. В качестве пьезоэлемента используется пьезокеламика - поликристаллические сегнетоэлектрические твердые растворы, подвергнутые после синтеза поляризации в постоянном электрическом поле. Они обладают сильным пьезоэффектом, большой стабильностью, большой механической прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, сравнительной простотой и невысокой стоимостью изготовления. Наиболее часто используется пьезокеламика на основе титана и цирконата свинца, имеющих точку Кюри 305°C типа PZT-4 [6]. Выбор данного типа ПЗТ обусловлен его линейной характеристикой в широком диапазоне измеряемых напряжений и отсутствием петли гистерезиса. Диаметр диска выбирался согласно следующим условиям. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волокно 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: $d > 500D_{\text{об}} - 2h_1$, где $D_{\text{об}}$ - диаметр оболочки ВС (125 мкм), h_1 - толщина слоя защитного покрытия ($h_1=62,5$ мкм, диаметр полимерного покрытия 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 напряженность электрического поля составляет $E=14,4$ кВ/см, поэтому чтобы измерять напряжения 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 аттенюаторы для ослабления отраженного сигнала от близлежащих секций. Если использовать волоконный эрбиевый усилитель со спектральной полосой усиления 35 нм и применять лазерные источники с шагом перестройки длины волны излучения 100 ГГц (0,8 нм) в окрестностях длины волны 1550 нм, в этом случае с помощью разработанной схемы ВОДН можно организовать до 40 точек измерения.

Сигналы на различных длинах волн с выхода ВЭУ пространственно разделяются с помощью оптического демультиплексора и поступают на фотоприемник, в качестве которого используются лавинные фотодиоды (ЛФД), позволяющие 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. Уровень порога для каждого ПУ индивидуально задается блоком управления таким образом, чтобы исключить срабатывание по шумам (минимизировать вероятность ложной тревоги), а с другой стороны - устойчиво срабатывать по уровню полезного сигнала (минимизировать вероятность пропуска сигнала). Сигналы с выхода ПУ с помощью блока регенерации (БР) преобразовываются в электрические импульсы требуемой амплитуды, формы и длительности, которые усиливаются модулятором тока (МТ) и поступают в виде импульсов тока накачки на полупроводниковые источники излучения. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается. БУ совместно с блоком обработки и отображения информации (БО) регистрирует частоту рециркуляции на каждой длине волны и изменение данной частоты по соответствующему алгоритму преобразуется в измеряемое напряжение, которое фиксируется и отображается на мониторе.

Список литературы

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. Vol.10, № 9. P. 777-782.