

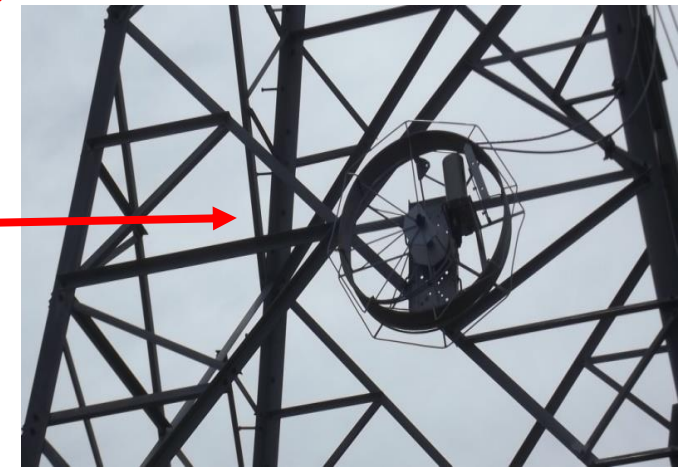
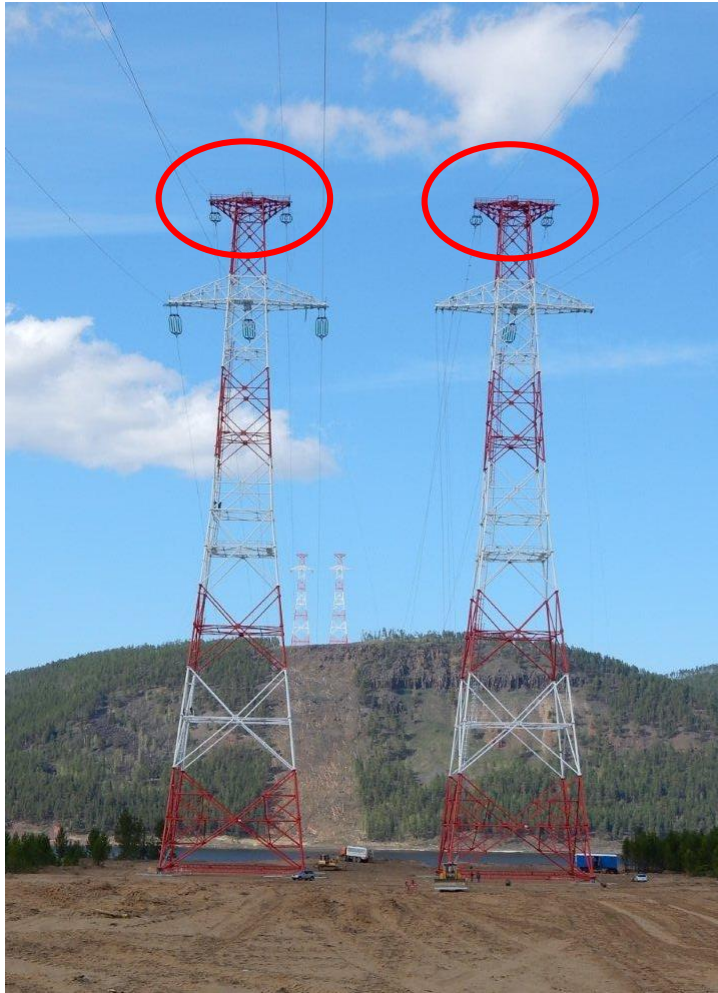
Оптический кабель в грозотросе, нечувствительный к помехам от молний

Акопов Сергей Георгиевич
г. Москва
akopovsg@yandex.ru

Фролов Игорь Вячеславович
ООО «Саранскакабель-Оптика» (г. Саранск)
frolov@sarko.ru

ОКГТ – применение и размещение

Для зонавых и магистральных ВОЛС

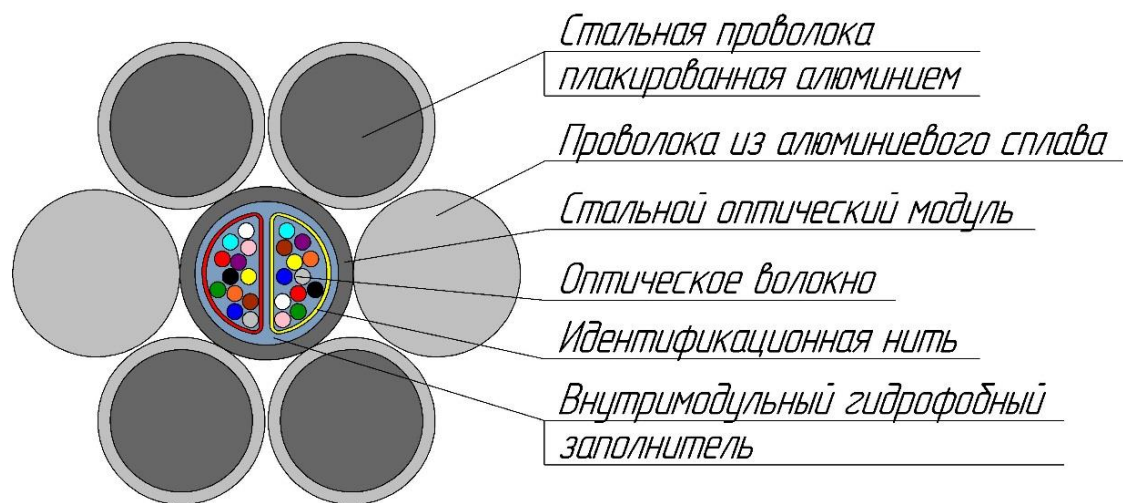


- **ВОЛС ВЛ**

ВЛ 110 кВ и выше, включая спецпереходы

ОКГТ – типичные конструкции и их применение

- ВЛ 35 кВ (редко) – 9 -11 мм с центральной трубкой
- ВЛ 110 ... 750 кВ – 11-16 мм с центральной трубкой и трубкой в повиве
- ВЛ 110 ... 750 кВ спецпереходы – 13-30 мм с трубкой в повиве



ОКГТ-ц – центральная трубка
Более компактная (один повив)

ОКГТ-с – трубка в повиве
Больше ОВ,
большие нагрузки

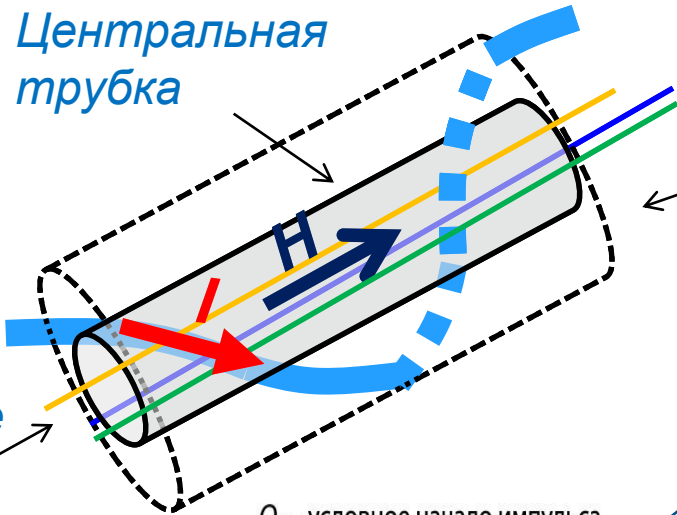


Механизм воздействия молнии на вращение оси поляризации

Центральная трубка

Проволока повиза троса

Оптическое волокно



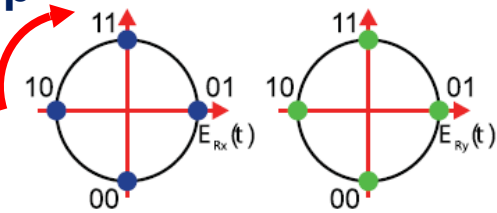
ОКГТ

~ 100 м

V_{sop}

Сигнал

Волокно



DP-QPSK

Эффект Фарадея в оптическом волокне

Угол поворота оси поляризации $\Delta\varphi = VHI$

H - напряженность магнитного поля, I - длина ОВ, V - константа Верде

Скорость вращения оси поляризации для соленоида:

$$V_{sop} = V \cdot N \cdot dI/dt \text{ (rad/s)}$$

- Число витков соленоида $N = 100 \text{ м} / 10 \text{ см} = 1000$

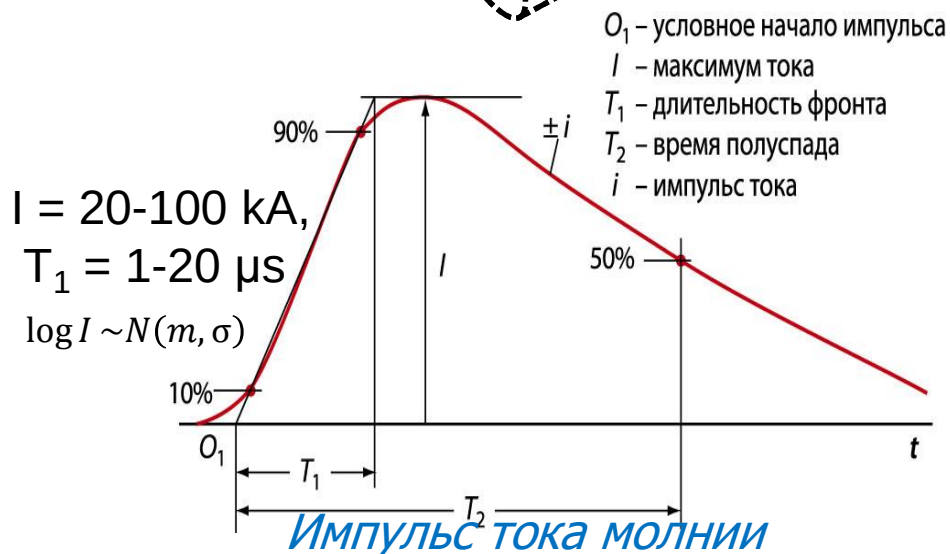
- Константа Верде в SMF

$$V = 0,7 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$$

- Принятые для расчета параметры молнии:

$$I = 100 \text{ кА, время фронта } T_1 = 10 \text{ мкс}$$

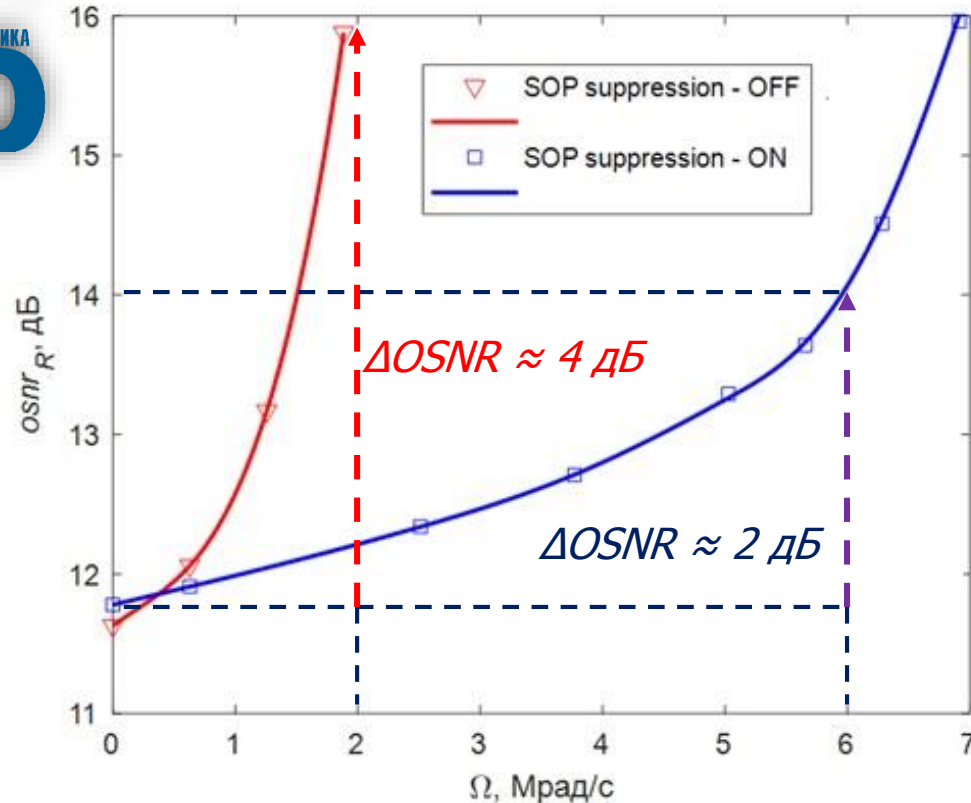
$$V_{sop} = 10^7 \text{ rad/s}$$



Акопов С.Г. и др. Влияние молний на работу когерентных ВОЛС. //Первая Миля.-2021-№4

При ударе молнии ось поляризации вращается с большой скоростью, что приводит к сбоям в линиях связи!

Влияние вращения оси поляризации



- Вводится улучшенный компенсатор вращения*, который обеспечивает работоспособность системы до 6-10 Мрад/с и позволяет снизить требования к ОСШ (Отношение Сигнал/Шум)
- Тем не менее, требуется существенное увеличение ОСШ при больших скоростях вращения (+2 дБ при скорости 6 Мрад/с)
- Увеличение ОСШ требует затрат** и они тем больше, чем больше скорость вращения и скорость передачи
- Требуется дополнительное снижение зависимости от скорости вращения не за счет цифровой обработки сигнала

Зависимость требуемого ОСШ (OSNR) от скорости вращения вектора поляризации при выключенном (SOP suppression - OFF) и включенном (SOP suppression - ON) алгоритме отслеживания состояния поляризации (транспондер MS-400E-Q100-01 T8)

*обычный компенсатор следит до 0,3 Мрад/с
 **штраф по OSNR в 2 дБ эквивалентен применению на 100 км участке усиления ОВ с уменьшенным затуханием (ULL), что увеличивает стоимость на 10-15%

Необходим компенсатор вращения, который требует увеличения ОСШ (бюджета) ВОЛС

С. Акопов, В. Конышев, О. Наний, В. Трещиков, Р.Убайдуллаев, И. Фролов.
 Влияние молний на работу когерентных ВОЛС. //Первая Миля.-2021-№4

Механизм компенсации воздействия молнии за счет выбора конструкции ОКГТ

Общее условие компенсации поля для
произвольного числа повивов троса

$$\sum_{k=1}^n \frac{(-1)^k}{Z_k \times m_k} \rightarrow \min,$$

Где:

n - количество повивов проволок; k - номер повива;

$\frac{(-1)^k}{Z_k \times m_k}$ - составляющая продольного магнитного поля k -ого повива;

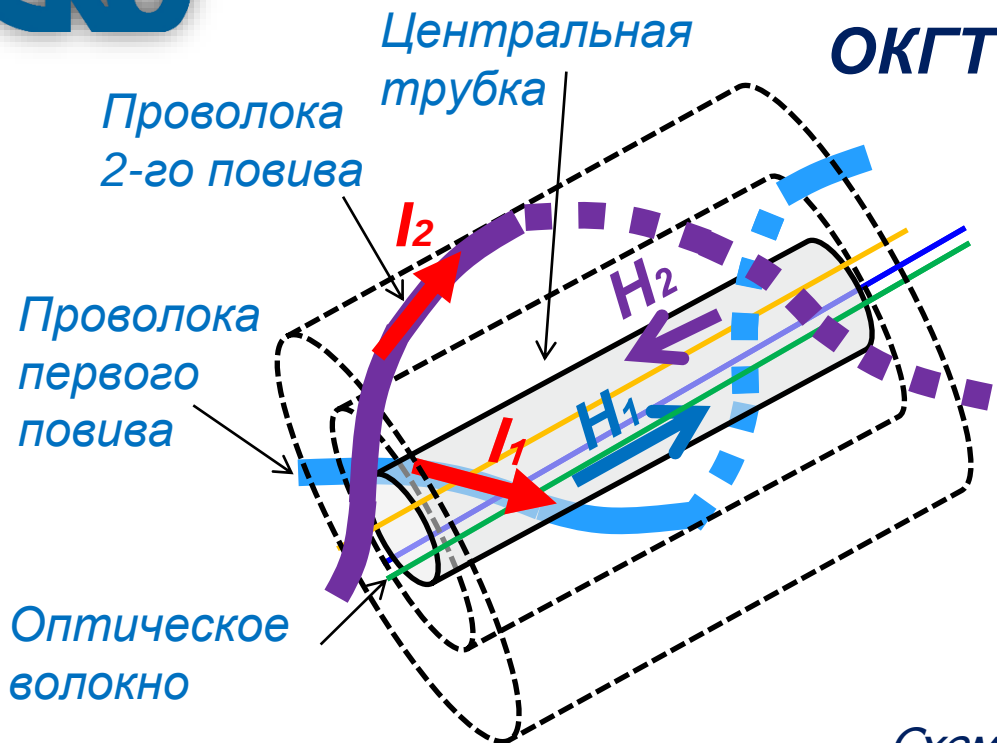
Z_k - сопротивление электрической схемы замещения для k -го повива

m_k - кратность шага скрутки k -го повива проволок,

$m_k = h_k / D_k$,

h_k - шаг скрутки k -го повива проволок,

D_k - диаметр окружности, описанной вокруг k -го повива проволок



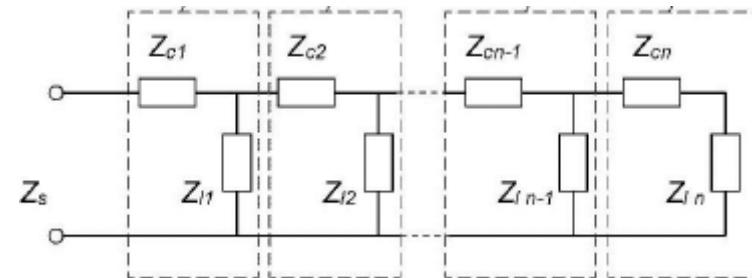
Условие минимума поля :

$$I_1 \times n_1 - I_2 \times n_2 \rightarrow \min$$

n_1, n_2 - число витков на единицу длины
для 1-го и 2-го повивов

Схема замещения кабеля
для токов молнии:

повив: Г-образный 4-х полюсник



При противоположной направленности повивов
происходит компенсация магнитного поля на оси !

Общее описание экспериментальной установки

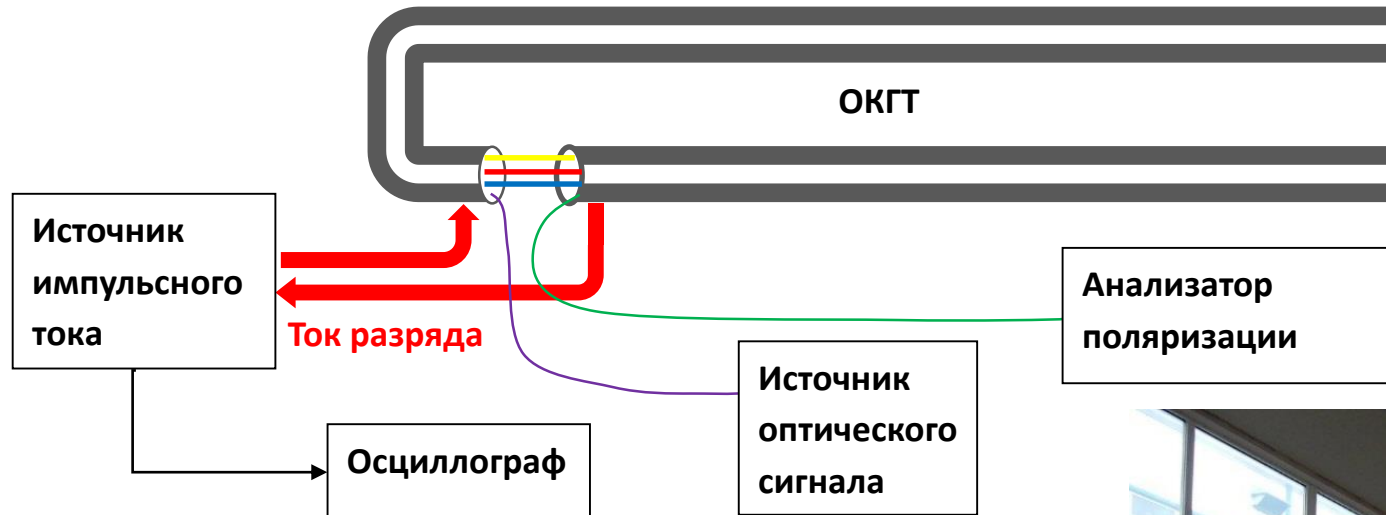


Схема установки

Испытываем два образца ОКГТ:

- с одним повивом проволоки
- с двумя повивами проволоки

Пролет между опорами- 50м



Измерительный стенд

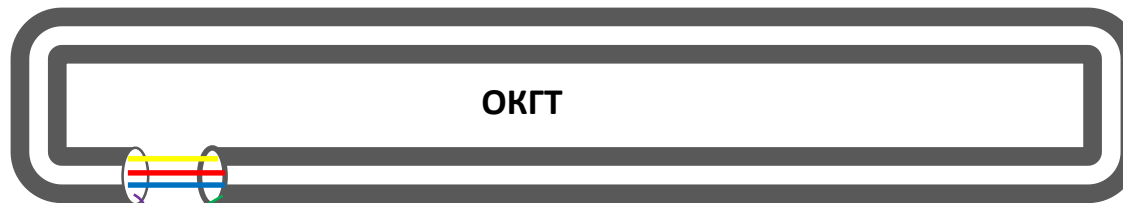
Акопов С.Г. и др. Влияние молний на работу когерентных ВОЛС. //Первая Миля.-2021-№4



Испытательный стенд проводов и тросов

Описание экспериментальной установки. Детали

Схема установки



$I=20..100\text{ A}$

Источник
импульсного
тока

$U=24\text{ В};$
 $C=0,1\text{ Ф};$
 $R=0,1..1\text{ Ом}$

Сварка ОВ «в кольцо»

Ток разряда

Анализатор
поляризации

Источник
оптического
сигнала

Keysight N7781B

Осциллограф

USB-осцилл.

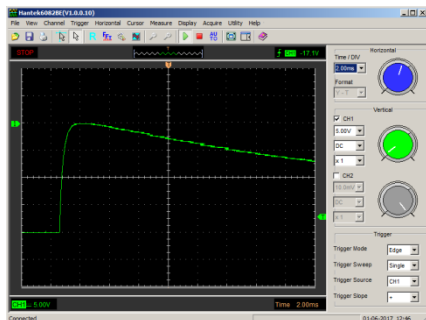
Exfo FOT600

$\lambda=1550\text{ нм}$

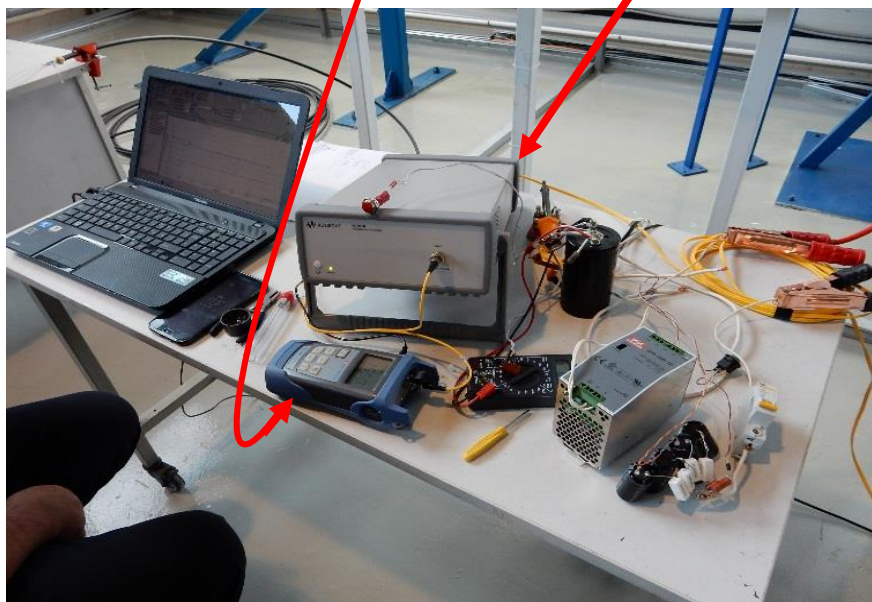
12 ОВ G.652, $L_{\text{каб}}=100\text{ м},$
 $L_{\text{опт}}\approx 1200\text{ м}$



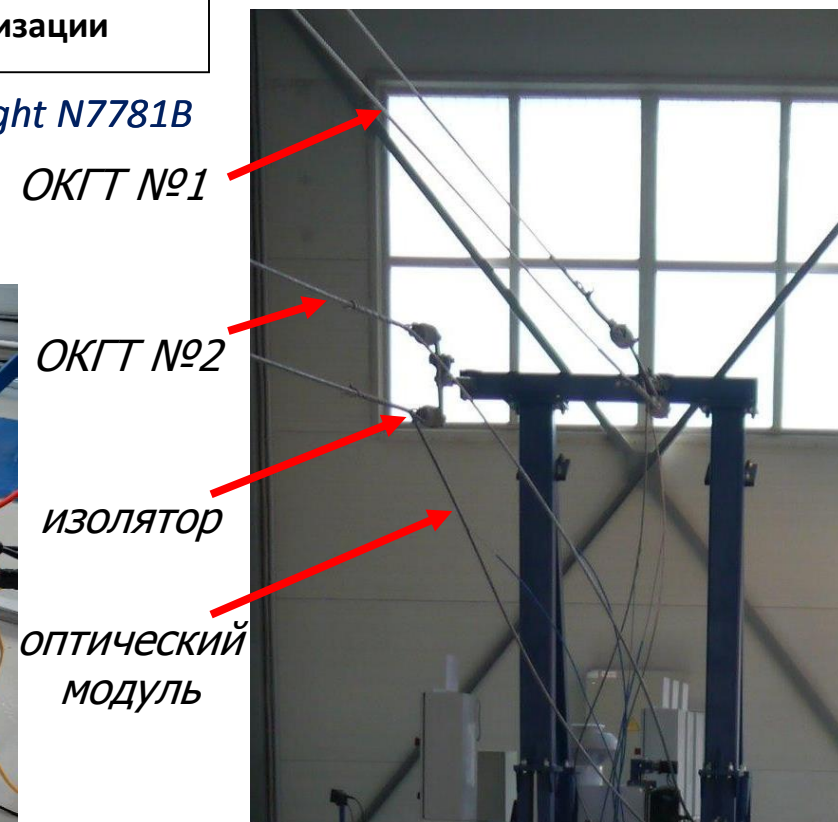
Источник импульсного тока



Измерение имп. тока

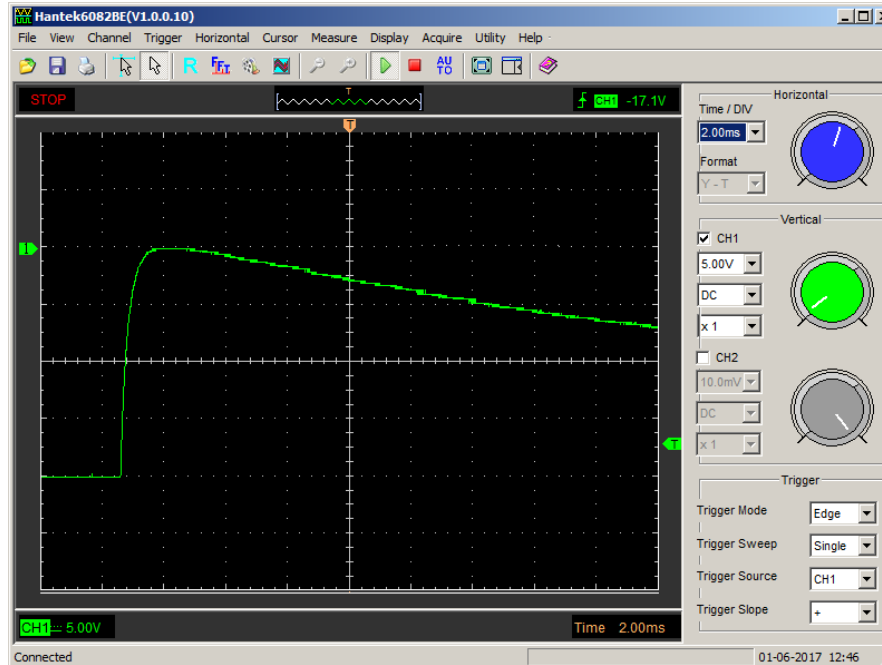


Приборы измерительного стенда



Два образца ОКГТ на стенде

Ход эксперимента

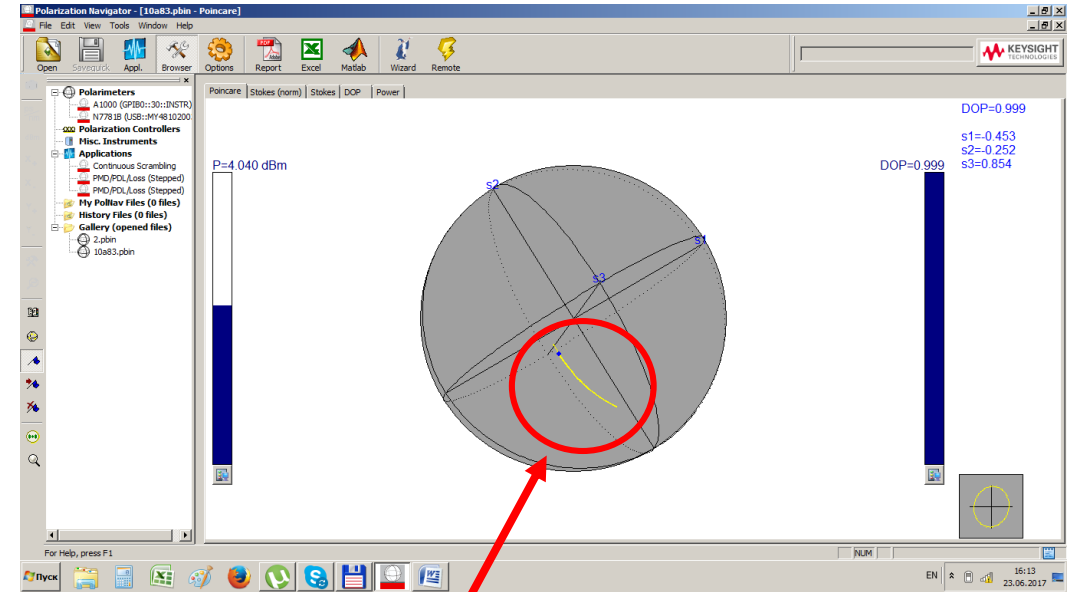


1. Фиксируем параметры импульсного тока

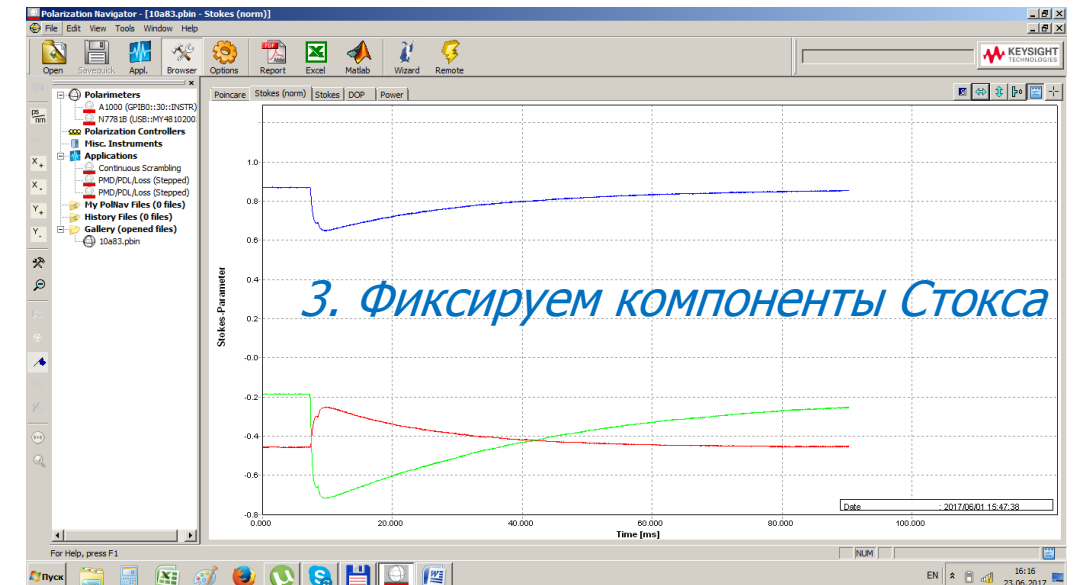
$$\varphi_H = \frac{\tan^{-1}(S_{2H}/S_{1H})}{2}; \quad \varphi_K = \frac{\tan^{-1}(S_{2K}/S_{1K})}{2}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_K - \varphi_H$$

4. Вычисляем угол поворота оси поляризации



2. Наблюдаем след на сфере Пуанкаре



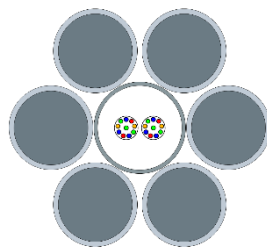
3. Фиксируем компоненты Стокса

Результаты эксперимента

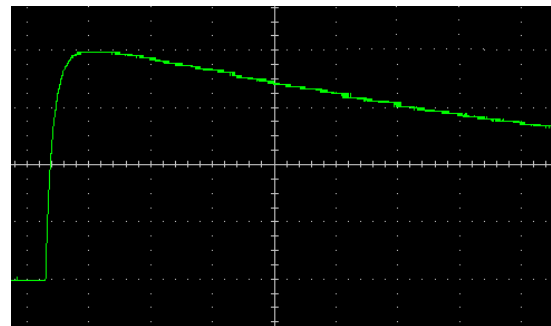
ОКГТ с одним повивом проволоки

ОКГТ с двумя повивами проволоки

Трубка – сталь $d = 3,2$ мм
Проволока 6 шт
сталь+алюмин $d = 3$ мм
Шаг скрутки – 90 мм

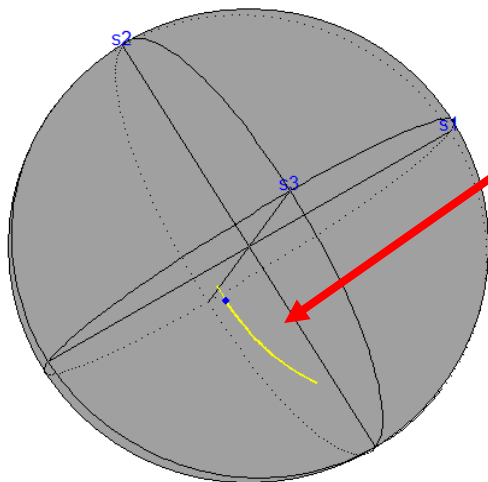


$I_{\text{имп}} = 83 \text{ А}$



$t_{\text{фр}} < 1 \text{ мс}$

Наблюдаемый след на
сфере Пуанкаре

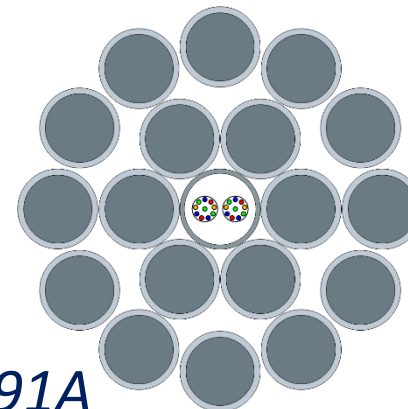


$\Delta\varphi_1 = 0,43 \text{ рад}$

Угол поворота оси поляризации

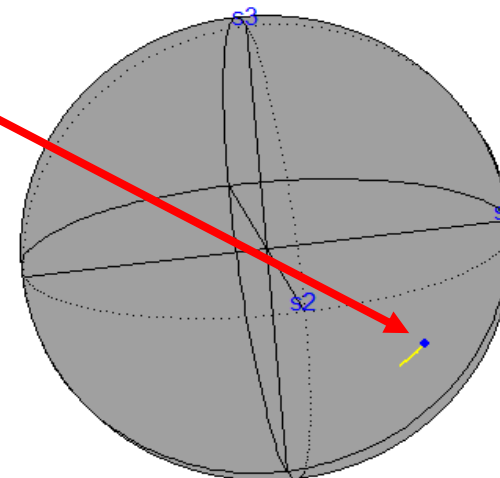


Компонента Стокса



Внутренняя часть –
такая же. Наружный
повив – 12 таких же
проволок,
 $\text{шаг} = 160 \text{ мм}$

$I_{\text{имп}} = 91 \text{ А}$

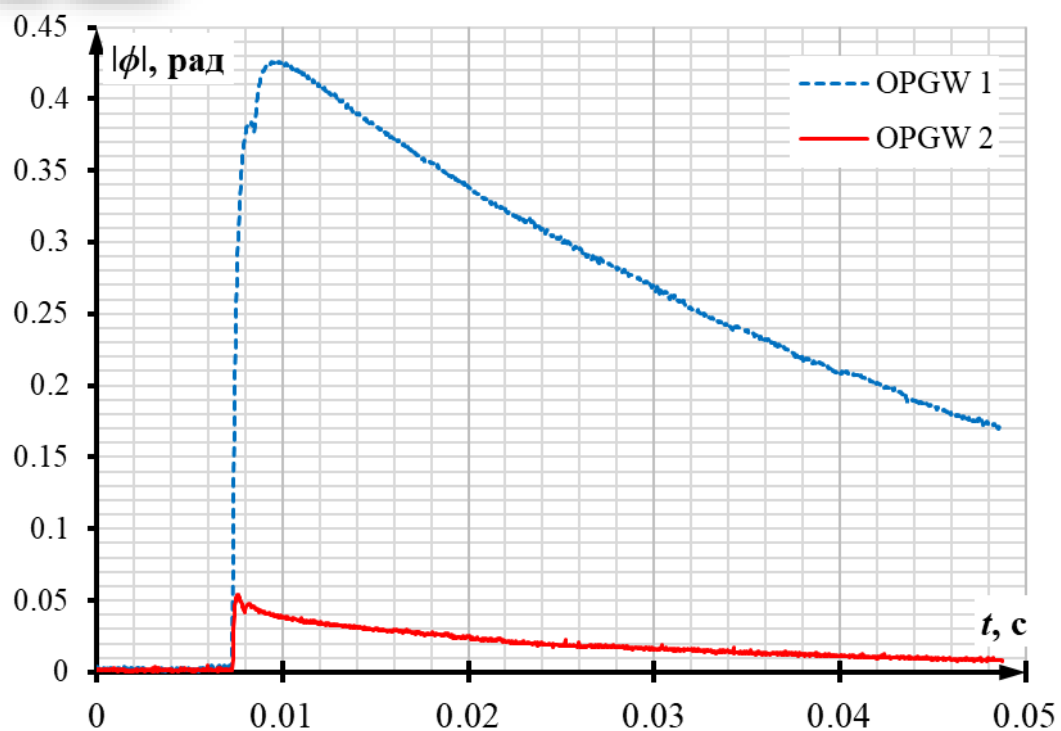


$\Delta\varphi_2 = 0,047 \text{ рад}$

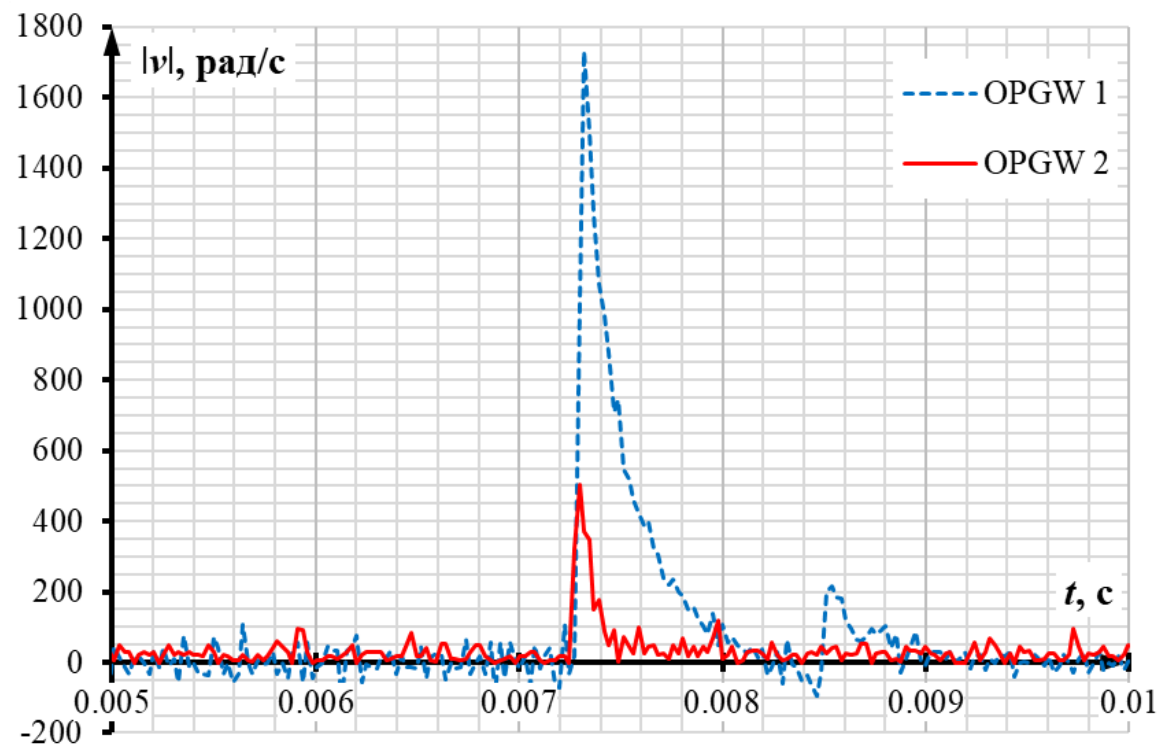
В 9 раз меньше !

Результаты эксперимента

Угол поворота и скорость вращения оси поляризации в волокне ОКГТ под действием импульса тока для двух конструкций кабеля.



Угол поворота оси поляризации



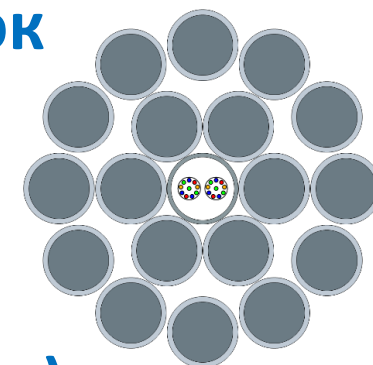
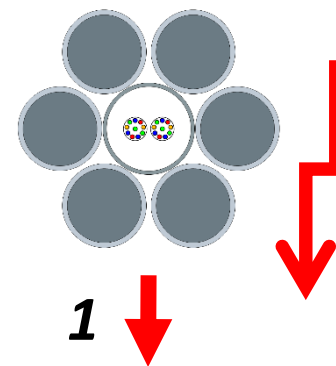
Скорость вращения оси поляризации

OPGW1 –с одним повивом проволоки; OPGW2 –с двумя повивами проволоки

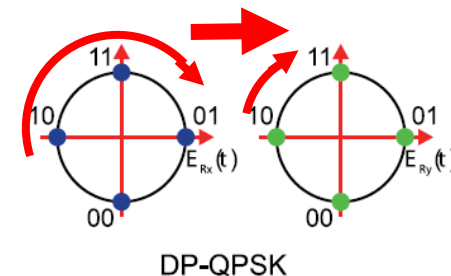
ОКГТ с 2-мя повивами проволоки значительно ослабляет вращение плоскости поляризации

Результаты исследований

- Установлена возможность снижения (примерно на порядок) скорости вращения оси поляризации сигнала в конструкциях ОКГТ, имеющих более 2-х повивов проволок
- Такие конструкции ОКГТ рекомендуется применять для построения современных магистральных линий связи (они также более стойкие ко всем остальным факторам)
- Степень снижения может быть улучшена и оптимизирована за счет изменения конструкции ОКГТ (материал, диаметр и количество проволок, шаги повивов)



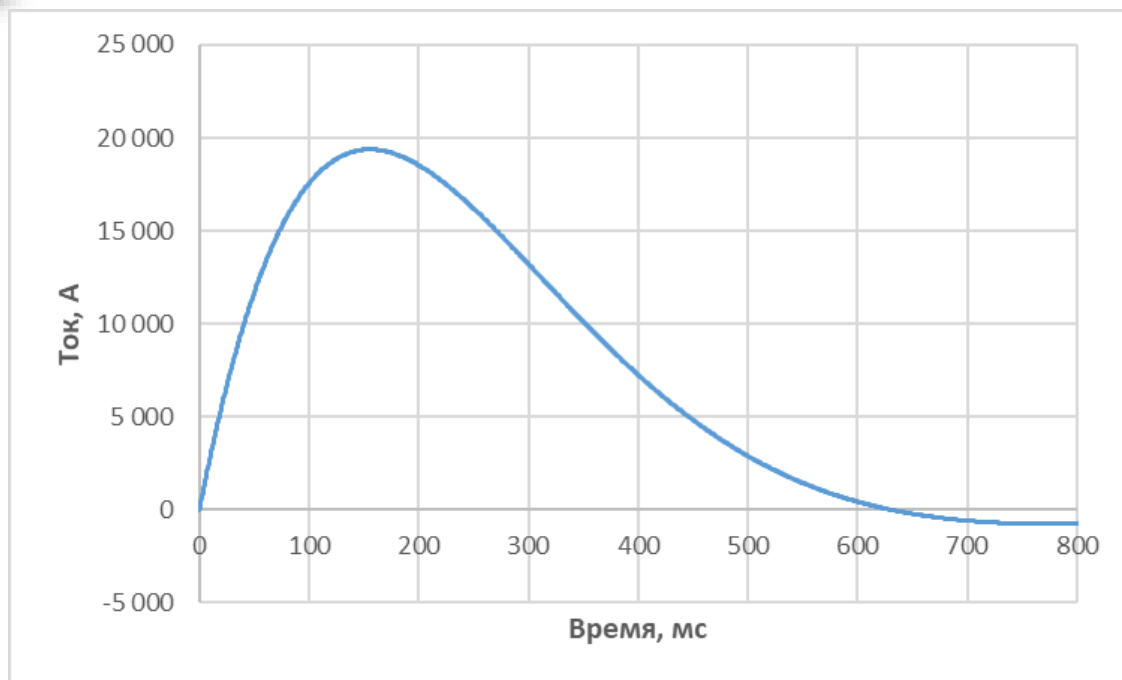
2 Vsop



Получен патент на
изобретение RU 2688 897

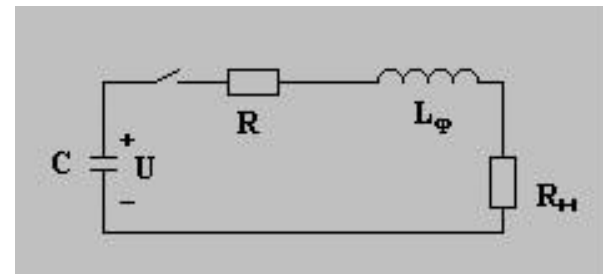
Дальнейшее направление исследований

С целью проверки конструкции, необходимо произвести испытание ОКГТ при воздействии высоковольтных импульсов тока на ОКГТ в полете >50м



Импульс тока в высоковольтной испытательной установке (расчет)

Параметры импульса тока зависят как от параметров ОКГТ (R , $L_{\text{собств}}$), так и установки (C , $L_{\text{внешн}}$)



Ток разряда конденсатора в RLC- цепи в автоколебательном режиме:

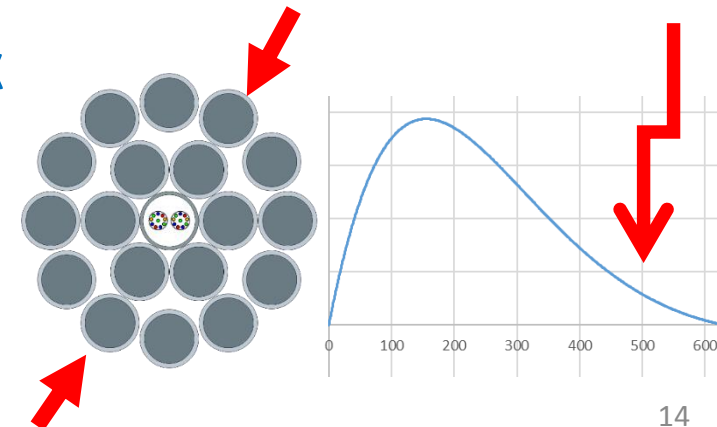
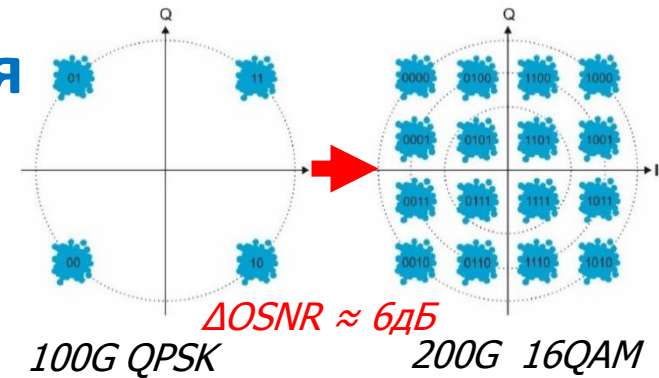
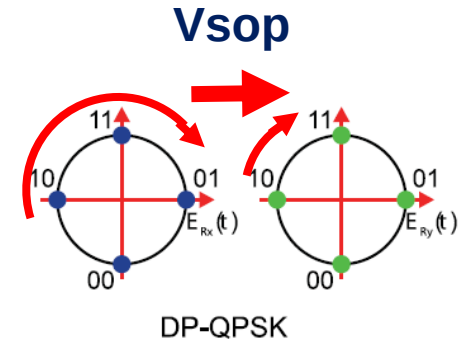
$$i = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\sin \omega_c t}{\sin \varphi} e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}};$$

$$\sin \varphi = \frac{\omega_c}{\omega_0} = \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

Форма тока в испытательной установке отличается от формы импульса молнии и зависит от параметров ОКГТ и установки

Выводы

- ОКГТ нечувствительный к помехам от ударов молний существенно снижает скорость вращения оси поляризации сигнала и снижает требования к необходимому оптическому бюджету ВОЛС
- С учетом увеличения скорости и усложнения форматов модуляции в линиях связи, объем сэкономленных ресурсов за счет применения ОКГТ будет возрастать
- С целью практического воплощения оптимизированных по нечувствительности к молниям конструкций ОКГТ, требуется проведение дальнейших исследований и испытаний



**Оптический кабель в грозотросе,
нечувствительный к помехам от молний**

Спасибо за внимание !

Акопов Сергей Георгиевич
г. Москва
akopovsg@yandex.ru

Фролов Игорь Вячеславович
ООО «Саранскабель-Оптика» (г. Саранск)
frolov@sarko.ru