



ОСТРОВ ВАЛААМ

Электросвязь с материком

18 декабря 2009 года на острове Валаам Республики Карелия официально запущен объект под названием «Внешнее электроснабжение острова Валаам». Население архипелага, расположенного в Ладожском озере, стало получать электроэнергию из российских магистральных сетей, отменены ограничения потребления, связанные с малой мощностью дизельных генераторов. Новая надежная схема электроснабжения будет способствовать возрождению и развитию как Спасо-Преображенского Валаамского монастыря, так и острова в целом.

Заказчиком строительства стали Магистральные электрические сети (МЭС) Северо-Запада, а генеральным подрядчиком проекта – компания «Комплексные Энергетические Решения». Объект был построен и введен в очень сжатые сроки. Городок строителей начал возводиться только в июне 2009 года, а уже через полгода линия электроснабжения острова была введена в эксплуатацию.

Объем выполненных работ довольно широк:

- построена новая ПС 49 Валаам 35/6 кВ (на острове);
- реконструирована ПС 92 Ляскеля 220/110/10 кВ и введено в строй ЗРУ 35 кВ;
- построены две цепи воздушно-кабельной линии 35 кВ протяженностью 20 км от ПС 92 Ляскеля до переходного пункта на берегу Ладоги;
- проложены две цепи подводной кабельной линии 35 кВ длиной по 25 км по дну Ладоги;
- введена в действие двухцепная воздушно-кабельная линия 35 кВ протяженностью 4 км от переходного пункта на берегу Ладоги до ПС 49 Валаам.
 - На ПС 92 Ляскеля:
 - выполнено расширение ОРУ 110 кВ на две новые ячейки 110 кВ с использованием элегазовых выключателей (поставщики ячеек, выключателей, разъединителей, терминалов релейных защит – УЭТМ, AREVA, «Электрощит-ТМ-Самара», «ЭКРА»); установка двух силовых масляных трансформаторов 110/35/10 кВ мощностью 16 МВА производства УЭТМ с заземленной нейтралью через низкоомное сопротивление («ПНП Бolid»); строительство ЗРУ 35 кВ и ЗРУ 10 кВ (AREVA); установка средств компенсации реактивной мощности на стороне 10 кВ («Энерком-Сервис»).

- На ПС 49 Валаам:

- осуществлено строительство ЗРУ 35 кВ и ЗРУ 6 кВ; установка двух силовых сухих трансформаторов 35/6 кВ мощностью 6,3 МВА («НТТ-Электро»), а также средств компенсации реактивной мощности на стороне 6 кВ.

- На воздушных кабельных линиях:

- применен универсальный кабель MULTI-WISKI 35 кВ сечением алюминиевых жил 120 мм² и экраном из алюмополимерной фольги 16 мм². Фазные кабели скручены вокруг стального оцинкованного троса в полиэтиленовой изоляции, за который и подвешивается весь кабель на деревянных опорах («Первый деревопропиточный завод»). Строительная длина – 1 км. Заземления экранов организованы на каждой соединительной муфте (арматура линий изготовлена компанией Ensto, муфты – Prysmian).

- На подводной кабельной линии:

- применен подводный трехфазный кабель 35 кВ производства Prysmian с медными жилами сечением 95 мм² и свинцовым экраном, который электрически не изолирован от воды. Кабель имеет стальную круглую броню из проволоки. В него также встроены оптоволоконный кабель для передачи сигналов телефонии, РЗ и ПА (аппаратура ВЧ-связи производства АББ). Кабель имеет более высокую герметичность и механическую защищенность по сравнению с допускающей подводную прокладку универсальным кабелем MULTI-WISKI.

При проектировании схемы электроснабжения острова Валаам пришлось искать решения по многим вопросам, среди которых и способ заземления нейтрали сети, и выбор средств регулирования напряжения, и другие. Необходимость их диктовалась уникальностью самой линии – начиная с прокладки подводного участка кабеля на глубине 120 м и заканчивая совершенно новыми для России используемыми технологиями строительства.

В журнале мы планируем рассказать о некоторых наиболее значимых решениях осуществленного проекта.

В первую очередь хотелось бы остановиться на специфике воздушно-кабельной линии 35 кВ, выполненной универсальным самонесущим кабелем. Впервые в России была построена линия такого напряжения длиной около 50 км.

Необходимость в универсальном кабеле была обусловлена сжатыми сроками строительства, желанием отказаться от вырубке просеки и максимально сохранить карельский лес на материке и острове, возможностью перехода от воздушного участка линии в подводный трехфазный кабель без строительства на берегу Ладожского озера специальных переходных пунктов. О решении вопросов заземления этой линии мы расскажем подробнее на следующих страницах журнала.

Проект «Внешнее электроснабжение острова Валаам» стал полигоном для внедрения универсальных самонесущих кабелей (УСК), поскольку удаленность архипелага от материка предъявляла к проекту повышенные требования к надежности электрообеспечения. А наличие лесов первой категории и статус историко-архитектурного памятника явились безоговорочным условием применения УСК.

Сейчас в российской нормативной базе отсутствуют внятные критерии, позволяющие при проектировании воздушно-кабельных линий (ВКЛ) с УСК рассчитать необходимые условия заземления экранов и тросов при прокладке. О методиках, разработанных в процессе реализации проекта для о. Валаам, рассказывают специалисты, принимавшие непосредственное участие в его осуществлении.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ САМОНЕСУЩИЙ КАБЕЛЬ

Заземление экранов и троса

Георгий Евдокунин, д.т.н., СПбГПУ
Михаил Дмитриев, к.т.н., ЗАО «ЗЭУ»,
г. Санкт-Петербург

КОНСТРУКЦИЯ УСК

Современный УСК среднего напряжения – это три однофазных кабеля, которые скручены вокруг несущего троса, покрытого (или нет) слоем изоляции.

Исторически первым на европейском рынке среднего напряжения появился финский кабель SAXKA производства NOKIA Cables, имеющий голый трос. Затем финская компания PRYSMIAN стала выпускать кабель MULTI-WISKI (который и использовался в проекте электроснабжения острова Валаам), а французская фирма NEXANS – кабель TORSADA.

Кабели MULTI-WISKI и TORSADA, в отличие от предшественника, получили трос, покрытый изоляцией, что позволило прокладывать их в том числе и в земле, а при прокладке на воздухе – снизить риск повреждения оболочки фаз кабеля при трении о трос, возникающем во время ветровых нагрузок.

В последнее время и российские предприятия наладили производство УСК, назвав его «кабель системы «вода-земля-воздух» и маркируя АПвПгТ (с голым тросом) или АПвПгТп (с тросом в оболочке).

На рис. 1 показана принципиальная конструкция УСК. Имеются небольшие отличия MULTI-WISKI (MW), TORSADA (TRS) и кабеля «вода-земля-воздух» (ВЗВ):

- у MW сечение троса составляет 62 мм^2 (усилие на разрыв не менее 76 кН), у TRS – 50 мм^2 ($64,7 \text{ кН}$), у ВЗВ – 62 мм^2 (75 кН) или 100 мм^2 (130 кН); немного разная жесткость троса;
- у MW и TRS экраны сделаны из Al-ленты толщиной 0,1–0,2 мм (для кабелей напряжением 10 кВ сечение экрана $F_{\text{э}} \approx 12 \text{ мм}^2$, для 35 кВ – $F_{\text{э}} \approx 19 \text{ мм}^2$); у ВЗВ экраны сделаны из Cu-проволок суммарным сечением $F_{\text{э}} \approx 16$ или 25 мм^2 ;
- у MW и ВЗВ оболочка фаз выполнена из полиэтилена, а у TRS – из поливинилхлорида (ПВХ).

Поскольку УСК является трехфазной группой однофазных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, то, принимая во внимание материалы [1, 2], интерес представляют токи и напряжения в экранах фаз, а именно:

- допустимость простого заземления экранов фаз по концам;

- термическая стойкость экранов (соответствие их сечения токам короткого замыкания и времени их отключения);
- напряжение на оболочке фаз и вероятность ее пробоя.

Необходимость детального рассмотрения отмеченных вопросов применения УСК также вызвана документом [3] (перевод на русский язык французского руководства по монтажу TORSADA), где в п. 3.6.1 «Экраны фаз и несущий трос» сказано, что заземление экранов фаз УСК осуществляется не только по концам кабеля, но и как минимум на каждом километре трассы; заземление несущего троса – только по концам кабеля. Постараемся разобраться, откуда появилось это неудобное для практической реализации требование к экранам.

Система TRS применяется не только в сетях среднего напряжения, но и в сетях до 1 кВ, где несущий трос дополнительно выполняет функции нулевого проводника, а в соответствии с нормативными документами (в России – это ПУЭ) нулевые рабочие провода ВЛ (ВКЛ) должны подвергаться периодическому повторному заземлению. Если бы такой подход к строительству TRS низкого напряжения действительно был распространен на среднее напряжение (ошибочно или обоснованно), то руководство [3] требовало бы периодического заземления троса, а оно требует заземления фазных экранов.

В [4], где из всех УСК рассмотрен только SAXKA с голым тросом, сказано, что на протяженных трассах трос необходимо заземлять не реже, чем через каждый километр. Это требование обосновывается только лишь словами «на практике установлено». Но при этом оно представляется разумным, так как у SAXKA трос голый, и каждое его повторное заземление повышает безопасность линии. Про повторное заземление экранов в [4] нет ни слова.

Итак, анализ немногих материалов, которые нам удалось найти, позволяет хоть как-то понять необходимость периодического заземления троса УСК, но вот с причинами для периодического заземления экранов фаз, по-прежнему, никакой ясности нет. Поэтому обратимся к [1, 2].

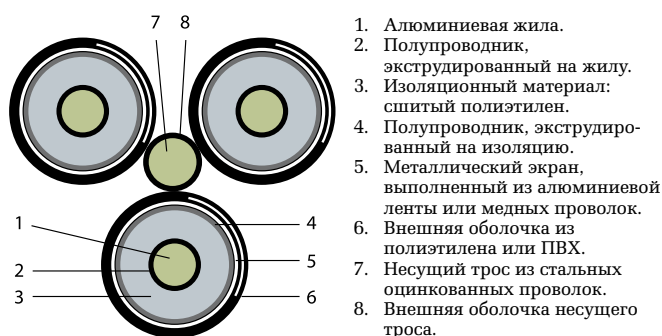
ТОКИ И ПОТЕРИ В ЭКРАНАХ УСК В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Заземление экранов одновременно в обоих концах кабеля (рис. 2) приводит к проявлению специфической особенности: наведению в экранах продольных токов промышленной частоты, связанных со взаимной индуктивностью между жилой и экраном. Потери мощности, создаваемые токами в экранах, снижают пропускную способность кабеля, существенно зависят от сечения экрана и поэтому должны учитываться при проектировании.

Соотношение $P_{\text{э}} / P_{\text{ж}}$ (потерь мощности в экране и в жиле) позволяет оценить вклад паразитных потерь экранов в нагрев кабеля. Наличие несущего троса, вокруг которого скручены фазы УСК, в нормальном установившемся режиме работы в силу симметрии никак не влияет на величину $P_{\text{э}} / P_{\text{ж}}$.

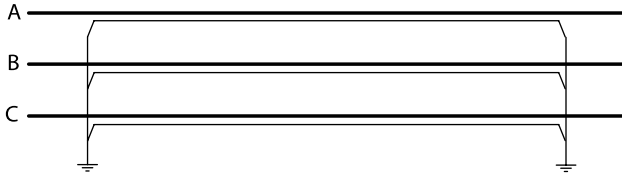
Расчеты по формулам [2] показывают, что для УСК всех типов характерны неопасные потери, что объясняется малым сечением применяемых экранов фаз, а также близким расположением фаз кабеля (они скручены).

• Рис. 1 Принципиальная конструкция УСК



Простое двустороннее заземление экранов группы из трех однофазных кабелей

Рис. 2 •



Для УСК коэффициент использования пропускной способности по току $K_{\Pi} = 1 / \sqrt{1 + P_{\text{э}} / P_{\text{ж}}} > 0,98$, т.е. паразитные потери мощности в экранах практически не снижают допустимые токовые нагрузки на кабель. Нет никаких оснований для одно-стороннего заземления или транспозиции экранов УСК.

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЭКРАНОВ УСК

С точки зрения снижения паразитных потерь в экранах лучше склоняться к использованию кабелей с малым сечением $F_{\text{э}}$. Однако применению таких кабелей мешает необходимость обеспечения термической стойкости в различных аварийных режимах при протекании в экранах больших токов:

- при КЗ непосредственно в кабеле (в таком случае ток в экране оказывается равным току в жиле);
- при КЗ в сети за кабелем (в таком случае ток в заземленном по концам экране индуцируется из-за тока жилы, т.е. оказывается по величине меньше тока жилы).

Разумеется, наибольшие токи в экранах появляются именно при КЗ в самом кабеле. При внутреннем повреждении изоляции «жила-экран» кабеля ток КЗ $I_{\text{к}}$ из жилы попадает в экран и далее в заземляющее устройство экрана, т.е. протекает по экрану. Если сечение экрана $F_{\text{э}}$ не соответствует величине тока $I_{\text{к}}$ и длительности его протекания, то возможно термическое разрушение экрана на значительном по длине L отрезке кабеля [2].

В сетях 6–35 кВ расчетным при выборе $F_{\text{э}}$ является:

- однофазное замыкание К(1) при заземлении нейтрали сети через низкоомное сопротивление $R_{\text{н}}$; ток в месте повреждения $I_{\text{к(1)}} = U_{\text{ном}} / (\sqrt{3} \cdot R_{\text{н}})$, где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети;
- двойное короткое замыкание К(1,1) для изолированной (компенсированной) нейтрали, причем наиболее вероятным будет повреждение изоляции двух фаз различных присоединений; ток в месте повреждения $I_{\text{к(1,1)}} = 0,87 \cdot I_{\text{к(3)}}$, где $I_{\text{к(3)}}$ – ток трехфазного КЗ, информация по которому есть всегда.

В каталогах на однофазные кабели приводится ток термической стойкости экранов $I_{\text{т1}}$ – так называемый односекундный ток КЗ – ток, который допустим для экрана при времени воздействия $t_{\text{к}} = 1$ с. При других временах $t_{\text{к}}$ ток термической стойкости оценивают как $I_{\text{т}} = I_{\text{т1}} / \sqrt{t_{\text{к}}}$.

Экраны MW и TRS выполнены из тонкой алюминиевой ленты толщиной 0,1–0,2 мм вне зависимости от их номинального напряжения и сечения жилы. С ростом $U_{\text{ном}}$ и $F_{\text{ж}}$ увеличивается средний диаметр экрана, а значит и его сечение $F_{\text{э}}$.

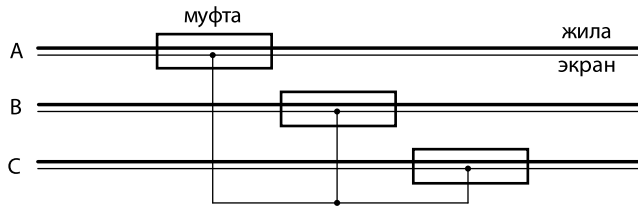
Так, согласно каталогу на TRS при толщине Al ленты 0,1 мм:

- наименьшие токи $I_{\text{т1}} \approx 1,5$ кА характерны для кабеля 10 кВ, $F_{\text{ж}} = 50$ мм²;
- наибольшие токи $I_{\text{т1}} \approx 3$ кА характерны для кабеля 35 кВ, $F_{\text{ж}} = 240$ мм².

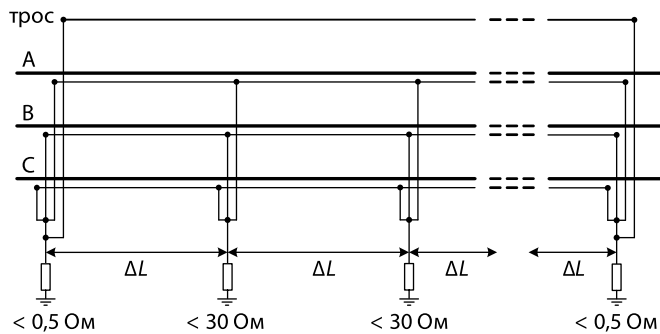
Экраны ВЗВ сделаны из медных проволок общим сечением 16 или 25 мм², что увеличивает вес кабеля по сравнению с MW и TRS. Зато для таких экранов ток $I_{\text{т1}}$ составляет 3,3 кА (для 16 мм²) и 5,1 кА (для 25 мм²) вне зависимости от $U_{\text{ном}}$ и $F_{\text{ж}}$.

УСК может потребоваться в различных схемах электроснабжения и, в частности, там, где токи $I_{\text{к(1)}}$ или $I_{\text{к(1,1)}}$ превосходят допустимый для стандартного экрана уровень $I_{\text{т}}$. В таких случаях для повышения термической стойкости экранов можно выполнять периодическое объединение экранов фаз кабеля (рис. 3) – так называемую «скрутку экранов». Ее работоспособность связана с тем, что при возникновении в кабеле КЗ на большей части трассы кабеля токи протекают не только в экране поврежденной фазы, но и в экранах фаз, не затронутых повреждением. Согласно [2] по-настоящему «скрутка» эффективна только для «тонких» однофазных кабелей, проложенных сомкнутым треугольником. Именно таким является УСК.

• **Рис. 3** Объединение экранов однофазных кабелей в соединительных муфтах (без заземления общей точки) с целью снижения термической нагрузки на экраны при коротких замыканиях



• **Рис. 4** Периодическое объединение и заземление экранов УСК



Соединение экранов друг с другом целесообразно выполнять через расстояние, соответствующее строительной длине проложенного кабеля (около 1 км), так как в этом случае даже при значительных токах КЗ замены потребует лишь участок кабеля от места возникновения замыкания до места ближайшего объединения, т.е. участок L не более одной строительной длины.

НАПРЯЖЕНИЕ НА ОБОЛОЧКЕ ФАЗ УСК

Рассмотрим напряжение «экран-земля» на оболочке входящих в состав УСК однофазных кабелей. Оно интересно только при повреждении изоляции «жила-экран» самого кабеля, так как:

- при повреждении изоляции сети вне кабеля напряжение «экран-земля» опасно лишь в случае одностороннего заземления экранов или их транспозиции;
- в нормальном режиме напряжение во всех точках экрана относительно земли мало отличается от напряжения «экран-земля» по концам кабеля, т.е. практически отсутствует вне зависимости от конкретной длины кабеля.

Ток I_K (в зависимости от состояния нейтрали это или $I_{K(1)}$, или $I_{K(1,1)}$) из жилы через место повреждения изоляции кабеля попадает в экран и далее в заземляющее устройство. Если допустить самый неблагоприятный случай, когда весь ток КЗ протекает по экрану только в сторону «начала» кабеля (в сторону питающих шин), то напряжение промышленной частоты на экране относительно земли в месте повреждения составит:

$$U_3 = I_K / \sqrt{(R_{3y} + R_3)^2 + X_3^2},$$

где $R_{3y} = 0,5 \div 30 \text{ Ом}$ – сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединены экраны;

$R_3 = \rho_3 / F_3 \cdot L$ – активное сопротивление экрана по [1, 2];

$X_3 = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_3}{r_2} \right) \cdot L$ – индуктивное сопротивление экрана по [1, 2];

L – расстояние от «начала» кабеля до места повреждения.

Напряжение экрана U_3 воздействует на изоляцию экрана (она же оболочка кабеля) относительно заземленных частей, в качестве которых может выступать, например, склонившееся к трассе дерево или прикоснувшийся к кабелю человек. Хотя такие события возможны, они маловероятны на момент существования в сети К(1) или К(1,1). Гораздо более важным фактором является то, что вдоль всей трассы универсального кабеля имеется несущий трос, заземленный по концам, а потому имеющий потенциал, близкий к потенциалу земли. Именно между экраном и заземленным тросом будет приложено напряжение U_3 .

Толщина оболочки экрана УСК составляет 3 мм, а толщина оболочки троса – 1 мм. Таким образом, напряжение U_3 будет приложено между экраном и тросом, отделенными изоляцией около 4 мм (в случае механических повреждений оболочек экрана и троса эта толщина может быть меньше).

Даже при малых сопротивлении заземления R_{3y} и токе I_K напряжение U_3 , возникающее на оболочке УСК, может составлять несколько киловольт, что способно привести к ее повреждению в непредсказуемом месте. Для снижения напряжения U_3 на оболочке УСК может потребоваться периодическое заземление экранов что связано:

- с уменьшением эквивалентного сопротивления заземления экрана R_{3y} ;
- с уменьшением погонного сопротивления экрана от R_3^* до значения $R_3^* / 3$.

Снижение погонного сопротивления экрана вызвано тем, что периодически заземлять надо экраны всех трех фаз, для чего их объединяют, а затем общим спуском соединяют с заземляющим устройством опоры (рис. 4).

В схеме электроснабжения острова Валаам подробные компьютерные расчеты показали, что при периодическом заземлении экранов через каждые $\Delta L = 2 \text{ км}$ напряжение не превысит $U_3 = 3 \text{ кВ}$, а при $\Delta L = 1 \text{ км}$ не превысит $U_3 = 2 \text{ кВ}$.

Для снижения напряжения, возникающего между экраном и тросом, было бы достаточно выполнить периодическое объединение экранов и несущего троса (без организации по трассе промежуточных заземляющих устройств). Однако, учитывая малую толщину оболочки троса, выносить на него потенциал экрана представляется нежелательным.

Для соединения друг с другом соседних строительных длин однофазных кабелей, входящих в состав УСК, используют соединительные муфты. Необходимость периодического заземления экранов потребует применения специальных муфт, предполагающих вывод экранов из муфт наружу. Поскольку строительная длина УСК составляет около 1 км, то удобной для практической реализации будет периодичность заземления экранов «каждый 1 км», «каждые 2 км», и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы, проведенной в рамках реализации проекта «Внешнее электроснабжение острова Валаам», можно сделать некоторые выводы, касающиеся применения УСК.

1. Экраны УСК должны быть заземлены в его концах, что в силу малого сечения экрана и близости фаз друг к другу не приводит к появлению в экранах заметных паразитных потерь мощности.

2. Для снижения напряжения на оболочке фаз УСК, которое возникнет при повреждении его изоляции, в ряде случаев может потребоваться периодическое заземление экранов по трассе (в дополнение к имеющему по концам заземлению экранов и троса). Необходимость и периодичность такого «повторного» заземления экранов определяется в результате компьютерных расчетов. Может потребоваться заземление на каждой соединительной муфте.

3. Решение п. 2 также может использоваться для повышения термической стойкости экранов при протекании по ним токов КЗ, ограничивая (до одной строительной длины) длину участка трассы, на которой возможно повреждение экрана.

Следует отметить, что вопросы заземления экранов и троса универсального самонесущего кабеля необходимо рассматривать, принимая также во внимание вопросы молниезащиты и ограничения грозových перенапряжений, чему планируется посвятить отдельный материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 2(44).
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во ЗЭУ, 2008.
3. Практическое руководство по применению самонесущего кабеля «Торсада СН». Перевод на русский язык ВНИИКИ Госстандарта России, Москва, 2002.
4. Магазинник Л.Т. Монтаж линий электропередач самонесущими изолированными проводами. Учебное пособие. – Ульяновск: УЛГТУ, 2005 г.