

А.В. Лобанов, канд. техн. наук, генеральный директор;
Н.Е. Молчанов, аспирант НИУ МЭИ, инженер-испытатель;
ООО НПП «Спецкабель»

Исследование зависимости параметров передачи судовых симметричных кабелей от гидростатического радиального давления

Аннотация. Представлены результаты исследований зависимости параметров передачи (коэффициента затухания и волнового сопротивления) двух типов герметизированных высокочастотных симметричных кабелей при воздействии гидростатического радиального давления воды до 15,2 МПа (150 кгс/см²). Дана оценка работы конструкций судовых кабелей при предельных гидростатических нагрузках.

Ключевые слова: судовой симметричный кабель; гидростатическое радиальное давление; волновое сопротивление; коэффициент затухания.

Abstract. The results of studies of transmission parameters (insertion loss and impedance) of two types of sealed high-frequency symmetrical cables under the influence of radial hydrostatic water pressure up to 15.2 MPa (150 kgf/cm²) are presented. Shipboard cables structures under extreme hydrostatic loads are assessed.

Keywords: ship balanced cable; hydrostatic radial pressure; impedance; insertion loss.

Материал поступил в редакцию 15.02.2017
Лобанов А.В. E-mail: Lobanov@spcable.ru
Молчанов Н.Е. E-mail: teilor2010@gmail.com

Кабели, используемые для забортной прокладки, подвергаются периодическому воздействию гидростатического радиального давления при погружении и всплытии подводного судна. На больших глубинах гидростатическое радиальное давление воды может вызывать деформации в конструктивных элементах проложенных за бортом кабелей и тем самым вызвать изменение их электрических параметров. Для высокочастотных симметричных кабелей такими параметрами являются волновое сопротивление и коэффициент затухания пары. Это так называемые параметры передачи, определяющие работоспособность кабелей в составе бортовой информационной сети.

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований воздействия радиального гидростатического давления на параметры передачи двух отличных по конструктивному исполнению марок судовых герметизированных симметричных кабелей: КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8 (ФЖТК.357400.056ТУ) и КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 (ФЖТК.357400.057ТУ). Указанные марки кабелей разработаны и серийно производятся ООО НПП «Спецкабель». Конструкции кабелей схематично представлены на рис. 1 с пояснением позиций, обозначенных на чертеже, в табл. 1. Нормируемые в ТУ значения параметров кабелей, исследуемых в данной работе, представлены в табл. 2.

Максимальное нормируемое значение гидростатического радиального давления, устанавливаемое в ТУ для рассматриваемых нами кабелей – 10,13 МПа (100 кгс/см²), при этом испытания кабелей, в соответствии с требованиями ГОСТ 20.57.406–81 [1], должно проводиться с превышением нормируемой величины на 50 %, в данном случае при давлении 15,2 МПа (150 кгс/см²). Такие испытания проводятся на стадии типовых испытаний (табл. 2). Допустимое увеличение коэффициента затухания и максимальное отклонение номинального волнового сопротивления в кабелях на период эксплуатации и хранения, гарантируемое поставщиком, не должно превышать 10 %. Эта величина установлена с учётом максимальной нагрузки при испытаниях, при этом гидростатическое радиальное давление, которое предположительно действует на забортную кабельную сеть в процессе эксплуатации, не превышает 6–7 МПа.

Испытания на герметичность поставляемых потребителю судовых кабелей предполагают тот же уровень превышения испытательных значений

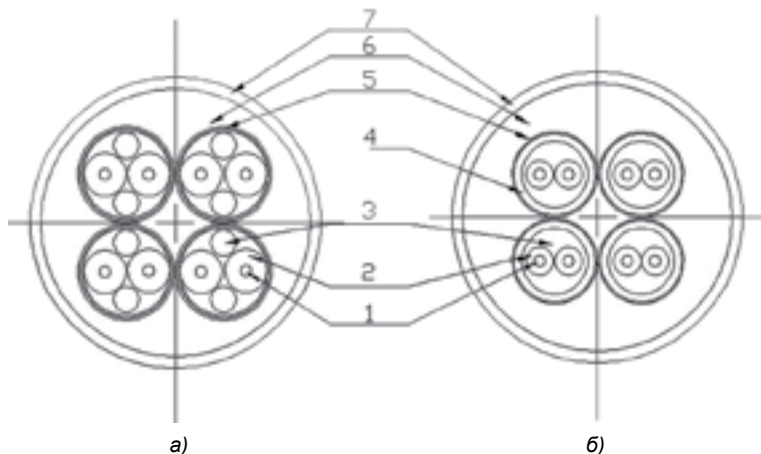


Рис. 1. Поперечное сечение (М 4:1) кабелей марок:
а) КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8;
б) КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8

Таблица 1

Конструктивные элементы кабелей

Марка кабеля	КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8	КсСГнг(C)100 4 × 2 × 0,8
Позиция на рис. 1		
1	Однопроволочная медная токопроводящая жила (ТПЖ), диаметр – 0,8 мм.	Однопроволочная медная токопроводящая жила (ТПЖ), диаметр – 0,8 мм.
2	Изоляция ТПЖ из кремнийорганической резины, диаметр по изоляции – 2,9 мм	Изоляция ТПЖ из полиэтилена, диаметр по изоляции – 1,8 мм
3	Герметизирующий наполнитель из водоблокирующих нитей	Герметизирующий наполнитель на основе низкомолекулярного каучука
4	—	Поясная изоляция из полимерной композиции, не содержащей галогенов, диаметр по поясной изоляции – 5,1 мм
5	Экран из ламинированной алюминиевой фольги толщиной 0,05 мм, поверх которой наложена оплётка из медных лужёных проволок диаметром 0,12 мм	Экран в виде оплётки из медной лужёной проволоки диаметром 0,12 мм
6	Герметизирующий наполнитель на основе низкомолекулярного каучука	Герметизирующий наполнитель на основе низкомолекулярного каучука
7	Оболочка из полимерной композиции, не содержащей галогенов диаметр по оболочке – 18,6 мм	Оболочка из полимерной композиции, не содержащей галогенов диаметр по оболочке – 17,5 мм

Таблица 2

Значение нормируемых в ТУ параметров

Параметр	КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8	КсСГнг(C)100 4 × 2 × 0,8
Коэффициент затухания пар при частоте 250 МГц, дБ, не более		
– при приемке и поставке	46	33,0
– на период эксплуатации и хранения	51	36,3
Волновое сопротивление пар среднее в полосе частот 1-250 МГц, Ом		
– при приемке и поставке	100 ± 15	100 ± 15
– на период эксплуатации и хранения	100 ± 16,5	100 ± 16,5
Величина гидростатического радиального давления, МПа (кгс/см ²)	10,13 (100)	10,13 (100)
Величина предельного гидростатического продольного давления при приёмо-сдаточных испытаниях, МПа (кгс/см ²)	15,2 (150)	15,2 (150)
Величина предельного гидростатического радиального давления при типовых испытаниях, МПа (кгс/см ²)	15,2 (150)	15,2 (150)

гидростатического продольного давления. Принимая во внимание, что герметичность кабелей важна для обеспечения надёжности судна при нештатной ситуации, когда возможно повреждение кабельной сети, она контролируется при приёмо-сдаточных испытаниях, и предельное гидростатическое продольное давление доводится до 15,2 МПа (150 кгс/см²). Объём воды, просочившейся через торец двухметрового образца кабеля в течение 24 часов для кабелей обеих марок, не должен превышать 1500 см³ (1,5 литра).

Для обеспечения разумного и достаточного запаса прочности конструкции судовых кабелей при записи в нормативную документацию предельных значений гидростатического давления необходимо учитывать требования ГОСТ 20.57.406–87 в отношении полуторного превышения тестовых значений от установленного потребителем уровня. Можно сказать, что избыток требований может повредить не в меньшей степени, чем их недостаток. Расчёт конструкций на существенно больший уровень давлений, чем это реально требуется при эксплуатации, может привести к ухудшению других параметров за счет обеспечения невостребованного запаса прочности.

При испытаниях на продольную герметичность мы можем констатировать только возможные протечки воды через образец кабеля. При испытаниях на стойкость кабелей к гидростатическому радиальному давлению проверяются параметры-критерии годности на соответствие требованиям ТУ по электрическому сопротивлению изоляции, испытательному напряжению между ТПЖ пары, волновому сопротивлению и коэффициенту затухания на период хранения и эксплуатации. Изменение этих параметров мы контролируем

при давлении воды, не превышающем 10,13 МПа (кгс/см²). Однако для нас представляет теоретический интерес – как изменяются электрические параметры исследуемых кабелей на больших глубинах, при давлении воды, превышающем 10,13 МПа, в частности при давлении 15,2 МПа.

В конструкциях кабелей КсСГО нг(D)100 и КсСГнг(C)100 реализованы оптимальные, на наш взгляд, технические решения, которые позволяют обеспечить минимальный уровень потерь при передаче высокочастотных сигналов по герметизированному симметричному кабелю. Так, в качестве изоляции токопроводящих жил пары кабелей марки КсСГнг(C)100 использован полиэтилен, а герметизирующее заполнение выполнено из компаунда на основе низкомолекулярного каучука СКТН, имеющего хорошие адгезионные и диэлектрические свойства [2]. Такое техническое решение для герметизированных экранированных пар используется НПП «Спецкабель» уже более десяти лет и хорошо себя зарекомендовало. В качестве изоляции для герметизированных огнестойких кабелей марок КсСГОнг(D)100 используется керамонаполненная кремний-органическая резина, обеспечивающая работоспособность кабелей, как при пожаре, так и в течение определённого времени после его ликвидации. Оптимальным решением для герметизации экранированных пар таких кабелей, с точки зрения обеспечения минимального уровня потерь на высоких частотах, оказалось применение водоблокирующих нитей, заполняющих межжильное пространство.

Схема испытательного стенда с системой AESA, с помощью которой проводились измерения волнового сопротивления и коэффициента затухания, представлены на рис. 2.

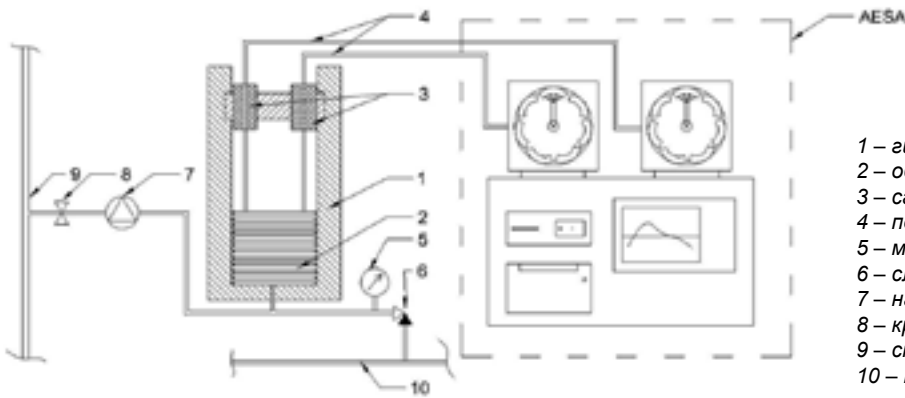


Рис. 2. Схематическое изображение испытательного стенда:

- 1 – гидравлический бак,
- 2 – образец кабеля в бухте (50 метров),
- 3 – сальниковые уплотнения,
- 4 – подключаемые концы кабеля (по 5 метров),
- 5 – манометр,
- 6 – сливной клапан,
- 7 – насос,
- 8 – кран подачи воды,
- 9 – стояк холодной воды,
- 10 – канализация

Испытания проводились на 60-метровых образцах кабелей марок КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8 и КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8, при этом в гидробак помещалось 50 метров кабеля, а концы образцов, по 5 метров каждый, подключались к измерительной системе AESA. Измерения волнового сопротивления и коэффициента затухания проводились на каждой паре образцов кабелей. При этом измерения указанных параметров исследуемых образцов кабелей до и после монтажа в гидравлический бак до подъёма давления показали практически одинаковый результат. Это говорит о том, что используемая нами технология заделки кабелей не оказывает значительного влияния на результаты измерения.

В процессе подъёма гидростатического давления воды в баке от нормального атмосферного до 150 кгс/см² (15,2 МПа) фиксировались значения измеряемых параметров в точках 20, 50, 80, 100 и 150 кгс/см². Результаты измерений представлены на рис. 3 и 4 в виде графиков, характеризующих изменения волнового сопротивления ($\Delta Z_B/Z_B$) и коэффициента затухания ($\Delta \alpha/\alpha$) при росте гидростатического радиального давления. Точки, отмеченные на графиках, соответствуют значениям указанных параметров для каждой из четырёх пар исследуемых образцов кабелей.

Также была проведена оценка величин изменений коэффициента затухания и волнового сопротивления в зависимости от количества циклов воздействия гидростатического радиального давления воды на размещенные в гидробаке образцы. При этом один цикл воздействия на образец кабеля включает повышение давления в гидробаке со скоростью (1,01 ± 0,01) МПа в минуту

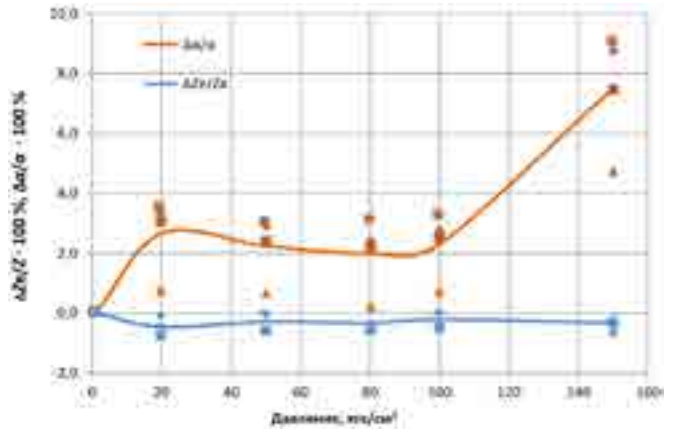


Рис. 4. Изменение волнового сопротивления ($\Delta Z_B/Z_B$) и коэффициента затухания ($\Delta \alpha/\alpha$) кабеля марки КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 при частоте 100 МГц

до 15,2 МПа (150 кгс/см²), затем выдержку при этом давлении в течение 15 минут с последующим снижением давления до нормального атмосферного с фиксацией величин измеряемых параметров в конце цикла. Каждый последующий цикл гидростатического воздействия производился с интервалом примерно

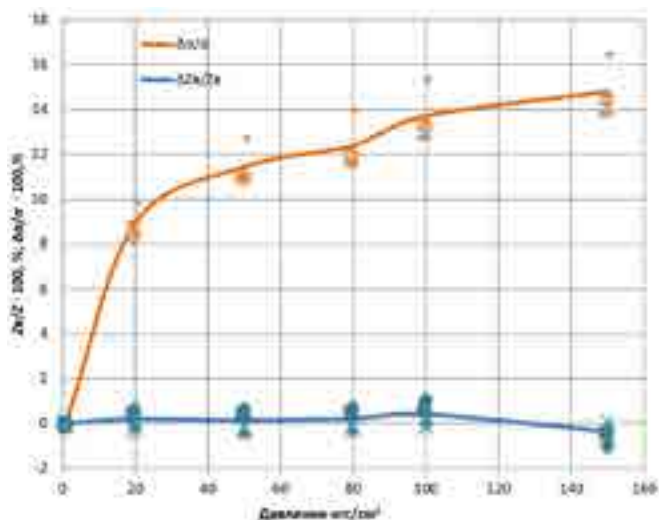


Рис. 3. Изменение волнового сопротивления ($\Delta Z_B/Z_B$) и коэффициента затухания ($\Delta \alpha/\alpha$) кабеля марки КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8 при частоте 100 МГц

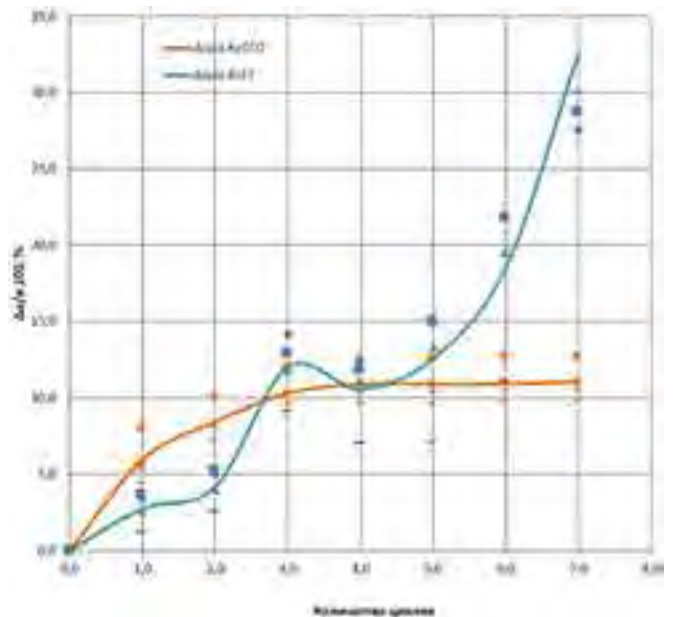


Рис. 5. Изменение коэффициента затухания от количества циклов воздействия гидростатического радиального давления на кабели марок КсСГОнг(D)100 4 × 2 × 0,8 и КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8

в сутки. На рис. 5 представлен графики зависимостей изменения величины коэффициента затухания при частоте 100 МГц образцов кабелей марок КсСГО нг(D)100 4 × 2 × 0,8 и КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 в зависимости от количества циклов воздействия.

Как можно видеть, характер изменения коэффициента затухания исследуемых образцов заметно отличается, что связано с особенностями конструкции герметизированных экранированных пар кабелей. В кабеле марки КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 изоляция токопроводящих жил выполнена из полиэтилена, а герметизация обеспечивается заполнением пространства под поясной изоляцией низкомолекулярным кремнийорганическим каучуком, тогда как в огнестойком кабеле марки КсСГнг(D)100 4 × 2 × 0,8 изоляция выполнена из керамионаполненной кремнийорганической резины, а для герметизации используются водоблокирующие нити. При воздействии на кабель внешнего гидростатического давления в конструкциях экранированной симметричной пары возникают как упругие, так и пластические деформации. Для огнестойкого кабеля с резиновой изоляцией необратимой деформации подвергается только экран, диаметр которого сначала уменьшается, а после четвертого цикла воздействия практически остается неизменным. Расстояние между токопроводящими жилами можно считать постоянным. В образце кабеля марки КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 мы наблюдаем проявление эффекта пластической деформации полиэтиленовой изоляции токопроводящих жил, приводящего к сокращению межпроводникового расстояния в паре. Колебательный характер изменения величины коэффициента затухания обусловлен остаточными упругими деформациями герметизирующего заполнителя из кремнийорганического каучука, который после снятия нагрузки в течение суток частично восстанавливает форму экрана. Мы не приводим графиков изменения волнового сопротивления при циклическом гидростатическом воздействии, но констатируем, что эти изменения, как и в предыдущем эксперименте, находились на уровне ±1 %.

То, что волновое сопротивление кабелей при воздействии радиального гидростатического давления остается практически постоянным, явилось для нас интересной и неожиданной особенностью исследуемых кабелей. Такое постоянство данного параметра характерно, на наш взгляд, для конструкций экранированных симметричных пар. Мы можем предполагать, что при радиальном сжатии кабелей происходит уменьшение эффективного диаметра экрана и сокращение расстояния между токопроводящими жилами пары, при этом сжатие подэкранного герметизирующего заполнителя должно повышать эквивалентную диэлектрическую проницаемость межпроводникового пространства. Взаимное влияние этих изменений физических и геометрических параметров экранированной пары приводит, в результате, к незначительным (в пределах ±1 %) изменениям волнового сопротивления. Такое поведение параметров имеет теоретическое обоснование. Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть аналитические выражения для волнового сопротивления симметричной пары в экране при высоких частотах [3]. Для этого представим выражение для расчета волнового сопротивления Z_B в удобном для анализа виде:

$$Z_B = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_3}} \operatorname{arch} \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - \left(\frac{d}{a}\right)^{-2} + 1}{\frac{d}{a} \left[\left(\frac{D}{d}\right)^2 + \left(\frac{d}{a}\right)^{-2} - 1 \right]}$$

где D – диаметр экрана;
 d – диаметр токопроводящих жил пары;

ϵ_3 – эквивалентная диэлектрическая проницаемость подэкранного заполнения;

a – межосевое расстояние между центрами сечений токопроводящих жил пары.

При расчете Z_B для кабеля марки КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 приняты следующие значения параметров для пары в исходном состоянии: $D/d = 6,4$; $\epsilon_3 = 2,5$ и, соответственно, для кабеля марки КсСГнг(D)100 4 × 2 × 0,8 – $D/d = 7,2$; $\epsilon_3 = 3,0$.

Полученные зависимости Z_B от d/a , представленные на рис. 6, имеют максимумы, близкие к нормируемому номинальному значению волнового сопротивления кабелей (100 Ом). Как видно на рис. 6 небольшое изменение межосевого расстояния между жилами при гидростатическом сжатии пары не может заметно влиять на величину волнового сопротивления пары, если мы находимся на вершине кривой. Можно сказать, что для каждого кабеля могут быть определены оптимальные соотношения для таких параметров экранированных пар, как D/d , d/a и ϵ_3 , при которых обеспечивается постоянство волнового сопротивления при гидростатическом сжатии. С другой стороны, те же изменения параметров экранированной пары приводят к более значительным изменениям коэффициента затухания, а точнее к его росту, как в процессе увеличения радиального гидростатического давления (рис. 3 и рис. 4), так и при циклическом воздействии гидростатического давления на кабель (рис. 5). Различие в характере изменений коэффициента затухания исследуемых кабелей объясняется, в первую очередь, особенностью свойств материалов изоляции токопроводящих жил. Кривая роста потерь в экранированной паре КсСГнг(С)100 4×2×0,8 имеет характерный вид, при котором увеличение потерь в кабеле до давления 10,13 МПа (100 кгс/см²) не превышает 4 %, а при более высоком давлении зависимость $\Delta\alpha/\alpha$ растет практически линейно до 8 % и более (рис. 4). Это, на наш взгляд, объясняется тем, что при гидростатическом радиальном давлении свыше 10,13 МПа (100 кгс/см²) наступает момент, когда начинает проявляться влияние пластической деформации полиэтиленовой изоляции токопроводящих жил пары и, как следствие сокращение расстояния между ними, при этом экран максимально приближается к паре, что в совокупности и является основной причиной роста потерь. Разбор образца кабеля марки КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 после воздействия на него гидростатического давления 15,2 МПа показал, что остаточная деформация изоляции пары сокращает расстояние между токопроводящими

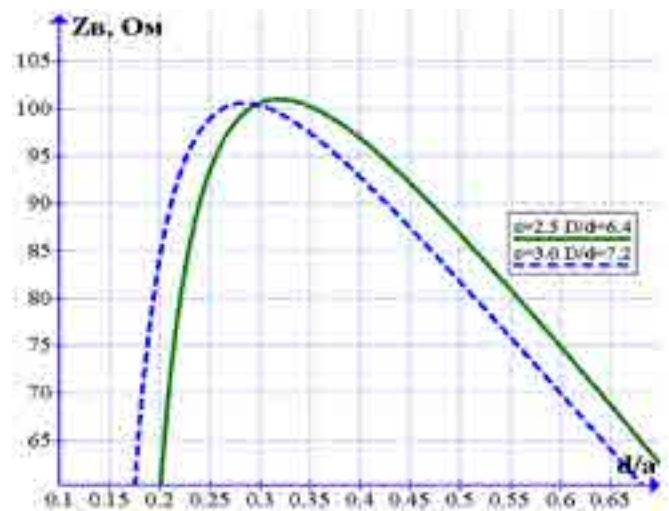


Рис. 6. Расчётная зависимость изменения волнового сопротивления экранированной симметричной пары Z_B при радиальном сжатии кабеля

жилами на 0,1–0,2 мм. При циклическом воздействии давления эти деформации накапливаются, приводя к ещё большему росту потерь в кабеле, о чём можно судить по кривой $\Delta\alpha/\alpha$ на рис. 5. Реакция кабеля с резиновой изоляцией на воздействие радиального гидростатического давления существенно отличается от «поведения» кабеля с изоляцией из полиэтилена. Сжатие резиновой изоляции происходит в области упругих деформаций, поэтому при снятии давления остаточные деформации пар минимальны и, по большей части, касаются экранов пар, которые по мере циклического воздействия давления на кабель, достигают некоторого устойчивого положения, более плотно охватывая пару, что и является основным фактором, влияющим на рост потерь в этом кабеле до уровня порядка 10–12 % (рис. 5).

Необходимо отметить, что герметизирующие наполнители из водоблокирующих нитей в кабеле марки КсСГОнг(Д)100 4 × 2 × 0,8 и из кремнийорганического низкомолекулярного каучука для кабеля КсСГнг(С)100 4 × 2 × 0,8 не утратили своих свойств в результате циклического воздействия радиального гидростатического давления. Было отмечено отсутствие протечек воды через торец двухметровых образцов кабелей при испытании на продольную герметичность в течение 24 часов, как до, так и после проведённых исследований.

Представленные в данной статье результаты исследований на примере двух типов герметизированных высокочастотных симметричных кабелей являются частью работ, проводимых НПП «Спецкабель» по разработке современных судовых кабелей для перспективных образцов новой техники. В этой связи перед разработчиками ставится задача по расширению частотного диапазона работы кабелей, повышению скорости передачи информации, снижению массо-габаритных параметров, повышению надёжности при работе на больших глубинах.

Приведенные результаты исследований влияния предельных значений гидростатического радиального давления на параметры двух типов судовых герметизированных симметричных кабелей позволяют сделать следующие выводы.

1. Коэффициенты затухания кабелей марок КсСГнг(С)100 и КсСГО(Д)100 при разовом воздействии гидростатического радиального давления 15,2 МПа (150 кгс/см²) соответствуют нормам, установленным на период эксплуатации и хранения, но при повторных нагрузках могут превышать эти нормы.

2. Превышение уровня рабочего гидростатического радиального давления более 10,13 МПа (100 кгс/см²) вызывает пластические (необратимые) деформации полиэтиленовой изоляции пар симметричных кабелей марки КсСГнг(С)100 и, как следствие, значительное увеличение коэффициента затухания.

3. При оптимальном соотношении геометрических и физических параметров экранированных пар симметричных кабелей волновое сопротивление при изменении гидростатического радиального давления от нормального атмосферного до 15,2 МПа (150 кгс/см²), а так же при циклических воздействиях давления, остается практически постоянным, изменяясь в пределах ± 1 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20.57.406–81. Измерения электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015.
2. Симметричный высокочастотный герметичный кабель // Патент России № 2284594. Бюл. № 27, 27.09.2006.
3. Гальперович Д.Я., Павлов А.А., Хренков Н.Н. Радиочастотные кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

Откройте для себя самый быстрый способ обнаружить обрыв проводов



Мировой лидер
в технологии холодной сварки

Посмотреть наши высокоточные сварочные установки в действии можно на сайте www.pwmltd.co.uk или поговорить с одним из наших экспертов по телефону +44 (0) 1233 820847.

Обращайтесь к нашим агентам в России:
Телефон: (495) 361-6424, 918-1756
Факс: (495) 911-8060
E-mail: equipment@tdvniikp.ru
Pressure Welding Machines Ltd
Tel: +44 (0) 1233 820847
Email: pwm@btinternet.com

Новые сварочные аппараты и матрицы можно приобрести только у компании PWM или у ее официальных представителей

