



DOI 10.52350/2072215X_2022_6_27

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ ГИБКИХ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ПОДВОДНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

SPECIFIC ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF COMBINED FLEXIBLE CABLES FOR UNDERWATER APPLICATIONS

M.I. Boyarkin, Deputy Head of the Department, JSC VNIICP;

R.E. Vasiliev, Cand. Sc. (Engineering), full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the RF, General Director, JSC "Electroprovod";

E.B. Vasiliev, Cand. Sc. (Economics), full member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the RF, Deputy General Director, JSC VNIICP;

D.R. Iskhakov, Cand. Sc. (Engineering), Head of the New Development Department, JSC "Electroprovod";

M.V. Sholudenko, Cand. Sc. (Engineering), Deputy Division Manager – Department Manager, JSC VNIICP

М.И. Бояркин, заместитель заведующего отделом ОАО «ВНИИКП»;

Р.Е. Васильев, канд. техн. наук, действительный член АЭН РФ, генеральный директор АО «Электропровод»;

Е.Б. Васильев, канд. экон. наук, действительный член АЭН РФ, заместитель генерального директора ОАО «ВНИИКП»;

Д.Р. Исхаков, канд. техн. наук, руководитель отдела новых разработок АО «Электропровод»;

М.В. Шолуденко, канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением – заведующий отделом ОАО «ВНИИКП»

Аннотация. Представлены результаты исследований по созданию гибкого комбинированного высокочастотного кабеля для подводного применения и определения зависимости параметров передачи (коэффициента затухания и коэффициента стоячей волны) кабеля от воздействия многократных перемоток, пониженных и повышенных температур, а также воздействия радиального гидростатического давления до 9 МПа (90 кгс/см²).

Ключевые слова: комбинированный гибкий кабель, симметричные пары, коаксиальные пары, гидростатическое давление, коэффициент затухания, коэффициент стоячей волны по напряжению

Abstract. The paper presents the results of the research for the development of a flexible combined high-frequency cable for underwater applications, and for the determination of the transmission parameters (attenuation coefficient and standing-wave ratio) dependence on the effect of multiple rewindings, low and high temperatures, as well as radial hydrostatic pressure up to 9 MPa (90 kgf/cm²).

Key words: combined flexible cable, balanced pairs, coaxial pairs, hydrostatic pressure, attenuation coefficient, voltage standing-wave ratio

Развитие кабельной промышленности в Российской Федерации, как и других отраслей, не в последнюю очередь связано со специальными областями применения, где необходимость решения конкретных задач требует применения передовых технологий.

Так, выпускаемые и применяемые в России комбинированные кабели имеют ограниченный диа-

пазон рабочих частот, который является достаточным для большинства известных применений. Однако, они не позволяют передавать требуемый для нового оборудования объём информации, который необходим, например, для обеспечения дальности обнаружения целей по активным и пассивным радиоканалам и устойчивому функционированию каналов связи ра-

диокационными комплексами, в том числе подвижных объектов морской техники. Для решения этой задачи возникла необходимость разработки гибкого комбинированного высокочастотного кабеля, обеспечивающего высокое качество передаваемого сигнала в диапазоне частот до 18 000 МГц по коаксиальным парам и в диапазоне частот до 100 МГц по симметричным парам в условиях воздействия внешних факторов, в том числе повышенного гидростатического давления. Исследования по созданию такого кабеля были проведены совместно специалистами АО «Электропровод» и ОАО «ВНИИКП». Была разработана конструкция [1] и изготовлен образец комбинированного кабеля, представленного на рис. 1, который был подвергнут экспериментальным исследованиям с целью практического подтверждения правильности выбора конструктивных решений.

Комбинированный электрический кабель представляет сочетание разных основных жил или групп жил, предназначенных для выполнения различных функций и имеющих различающиеся конструкции. Комбинированные кабели обычно используются для передачи информации и дистанционного питания в тех случаях, когда параллельно прокладываются разные

типы кабелей экономически нецелесообразно или не представляется возможным.

В данном конкретном случае функциональное назначение кабеля потребовало объединение в единую конструкцию симметричных пар и коаксиальных пар. При этом для обеспечения требуемого значения волнового сопротивления симметричных пар 100 Ом на частоте 100 МГц отношение расстояния между токопроводящими жилами в каждой симметричной паре к радиусу токопроводящей жилы должно быть в диапазоне от 1,71 до 1,86. С целью повышения стойкости к растяжению кабель имеет центральный силовой элемент, выполненный из синтетических высокомодульных нитей, которые для повышения эффективности использования должны иметь одинаковое натяжение, величина которого контролируется при изготовлении центрального силового элемента. Необходимая гибкость, обеспечивающая стойкость к перегибам через систему роликов и изгибу требуемого радиуса, достигается определённым шагом скрутки симметричных пар вокруг центрального силового элемента. Повив из коаксиальных пар и корделей-заполнителей также наложен поверх сердечника с определённым шагом.

Одной из основных проблем в проектировании кабелей для подводного применения является обеспечение работоспособности при одновременном действии гидростатического давления, растяжения и изгибающих нагрузок. При необходимости обеспечить стойкость к гидростатическому давлению и одновременно сохранить гибкость подводного кабеля, который должен быть стоек, в частности, к 5000 циклам перегибов через систему роликов малого диаметра, необходимо выбирать подход, основным принципом которого является минимизация полого пространства внутри кабеля и правильный подбор материалов, из которых изготавливается кабель.

Задача при заполнении пространства – обеспечить равномерное сжатие элементов кабеля при действии гидростатического давления и минимизировать изменения конструктивных параметров. К примеру, коаксиальные пары крайне чувствительны к деформации из-за которой возможно появление неоднородностей. Но если на них будет приложено равномерное воздействие по всей окружности, то ухудшение характеристик будет не так существенно, в отличие от ситуации с изменением формы коаксиальной пары. Стоит также отметить, что использование гидрофобных заполнителей в кабелях, применяемых при большом внешнем давлении, крайне нежелательно. Так как приложенное к кабелю давление будет вытеснять гидрофобный заполнитель, что может способствовать повреждению приёмо-передающего оборудования, а также привести к образованию воздушных полостей, что пагубно скажется на параметрах передачи кабеля.

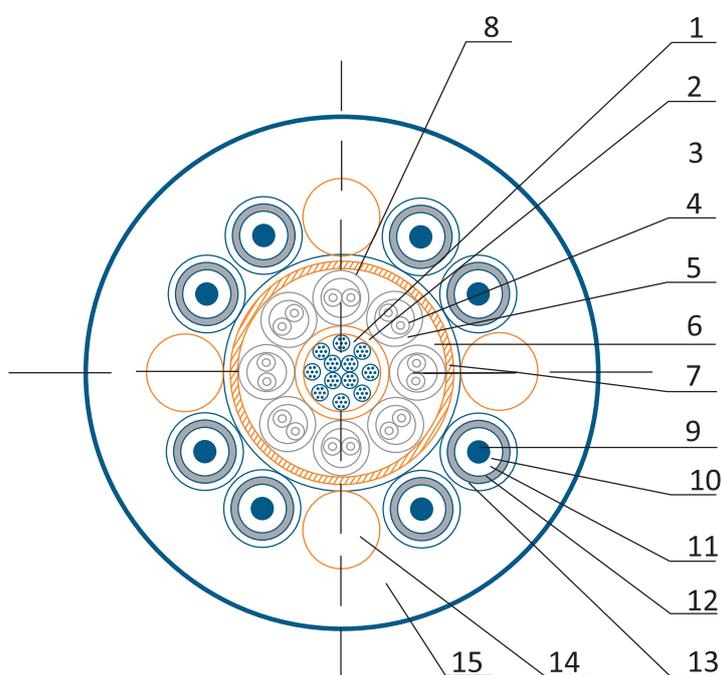


Рис. 1. Комбинированный гибкий кабель для подводного применения: 1 – центральный силовой элемент (ЦСЭ); 2 – оболочка ЦСЭ; 3 – ТПЖ симметричной пары (СП); 4 – изоляция ТПЖ СП; 5 – оболочка СП; 6 – оболочка-заполнитель; 7 – общий экран; 8 – обмотка из ВБ ленты; 9 – внутренний проводник коаксиальной пары (КП); 10 – изоляция КП; 11 – внешний проводник КП; 12 – экран КП; 13 – оболочка КП; 14 – кордель-заполнитель; 15 – наружная оболочка-заполнение.



Поэтому вопрос обеспечения стойкости к гидростатическому давлению был решён наложением поверх повива симметричных пар изоляционной оболочки-заполнителя, внедрённой в пространство между оболочками симметричных пар. Кроме того, пространство между радиочастотными кабелями было заполнено корделями заполнения, а наружная оболочка выполнена из термопластичного полимерного материала, также заполняющего промежутки между коаксиальными парами и корделями-заполнителями.

Для проверки работоспособности при воздействии внешнего гидростатического давления были проведены испытания на образце кабеля длиной 10 м. Отрезок кабеля, подвергаемый воздействию гидростатического давления, составил 8 метров, свободные концы кабеля по 1 метру были выведены из гидробака через сальниковые уплотнения (без деформации кабеля) для подключения к измерительной аппаратуре. Давление контролировалось с помощью манометра, с погрешностью не более 5 %. Кабель, помещённый в бак, был намотан на металлический барабан.

Во время испытаний подъём давления производился ступенчато, с остановками через каждые 10 кгс/см². Контроль основных параметров коаксиальных пар – коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициента затухания – осуществлялся на каждой ступени и при нулевых значениях. Время выдержки на каждой ступени – не менее 30 мин.

Результаты измерений параметров коаксиальных пар (указано среднее значение) при воздействии гидростатического давления приведены на рис. 2 и 3.

Результаты исследований показали, что параметры симметричных пар и коэффициент затухания коаксиальных пар во всём диапазоне частот практически не изменяются при воздействии гидростатического давления, причём как при нулевых значениях после снятия воздействия, так и непосредственно во время действия давления.

Что касается КСВН, то было установлено, что его прирост начинается при воздействии гидростатического давления от 5 МПа. При этом КСВН во время воздействия не превышает установленных норм, а после снижения давления возвращается к номинальным значениям.

Резкое возрастание КСВН во время действия давления начинается с 9 МПа, при этом его среднее значение составляет 2,51, а после снятия давления релаксирует и снижается до 1,75, а через 12 часов выдержки при нормальных климатических условиях (НКУ) достигает значения 1,62.

Таким образом, экспериментально доказано, что разработанный комбинированный кабель может

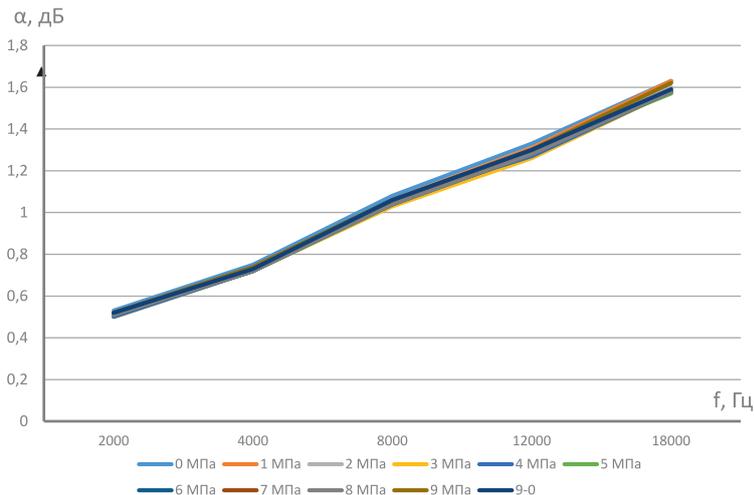


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента затухания коаксиальных пар при воздействии гидростатического давления

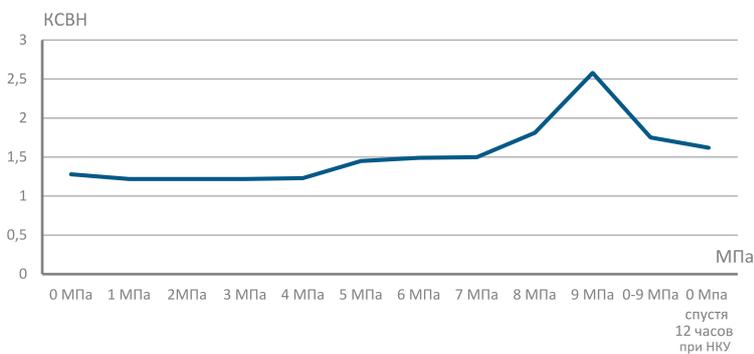


Рис. 3. Изменение КСВН при воздействии гидростатического давления

эксплуатироваться и успешно выполнять свои функции в условиях воздействия гидростатического давления до 9 МПа.

С целью оценки работоспособности разработанного кабеля в условиях повышенной и пониженной температур были проведены испытания в рамках которых смотанный в бухту образец помещали в климатическую камеру, при этом оба конца кабеля (примерно по 1 м) выводили из камеры для проведения измерений во время испытания. После измерения параметров при НКУ кабель выдерживали 24 ч при температуре минус 50 °С, потом температуру повышали до минус 40 °С и выдерживали ещё 3 ч, после чего проводили измерения при отрицательной температуре. После завершения испытаний образец выдерживали 8 ч при НКУ и проводили контроль электрических параметров.

Испытания на стойкость к повышенной температуре эксплуатации проводили по той же схеме: измерение параметров при НКУ; выдержка в течение 24 ч при температуре 70 °С, затем 3 ч при 55 °С; измерение параметров; выдержка 8 ч при НКУ; контроль параметров.

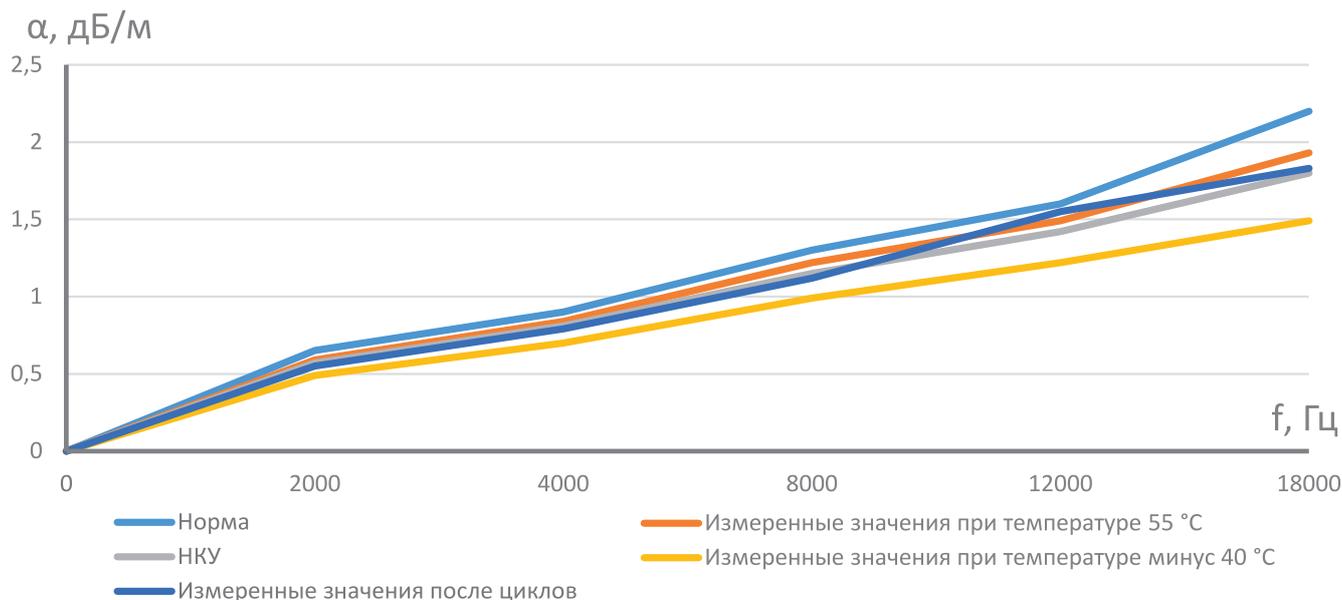


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента затухания КП от частоты при разных температурах

Испытания на стойкость к изменению температуры проводили по иной схеме. Образец подвергали трём непрерывно следующим друг за другом температурным циклам, каждый из которых состоял из этапов:

- выдержка при температуре минус 50 °C в течение 3 ч;
- выдержка при температуре 70 °C в течение 3 ч;
- внешний осмотр на предмет отсутствия повреждений и нарушений внешнего вида и проверка основных электрических параметров.

Результаты исследований на стойкость к климатическим факторам приведены на рис. 4 и в табл. 1.

Результаты испытаний демонстрируют высокую стойкость конструкции и коаксиальных пар, в частности, к температурным воздействиям.

Для проверки гибкости кабеля и его стойкости к многократным перегибам были проведены испытания на пробегной машине, оборудованной системой роликов с радиусом не более 200 мм. Для этого была модернизирована и дооснащена линия перемотки кабеля. В центре линии установили систему роликов, обе-

Таблица 1
Результаты исследований влияния климатических факторов на коэффициент стоячей волны по напряжению коаксиальных пар

Наименование параметра	Значение параметров коаксиальных пар			
	НКУ перед испытаниями	минус 40 °C	55 °C	НКУ после циклов
КСВН в диапазоне частот 200–18000 МГц	1,26	1,30	1,33	1,34

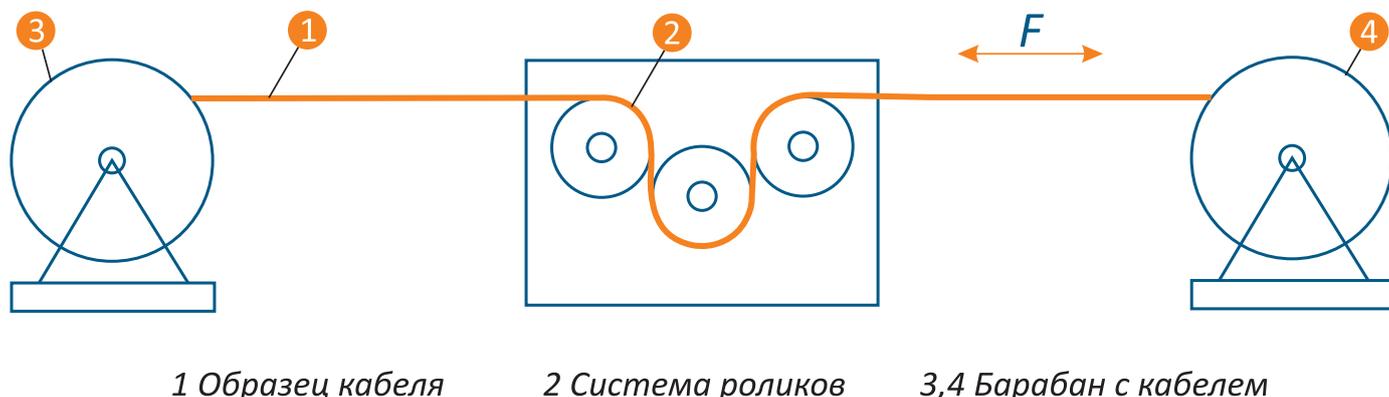


Рис. 5. Схема установки испытаний на перегибы (перемотки)



Таблица 2
Электрические параметры коаксиальных пар после 5000 циклов перемоток (перегибов) через систему роликов

Наименование параметра	Значения параметров коаксиальных пар кабеля после циклов перегибов										
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Коэффициент затухания, дБ/м на частоте:											
2000 МГц	0,56	0,57	0,57	0,55	0,56	0,56	0,57	0,56	0,57	0,57	0,57
4000 МГц	0,80	0,81	0,81	0,81	0,80	0,81	0,81	0,80	0,81	0,81	0,81
8000 МГц	1,13	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,14	1,15	1,15	1,15
12000 МГц	1,39	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
18000 МГц	1,73	1,76	1,80	1,80	1,73	1,83	1,83	1,72	1,76	1,73	1,80
КСВН в диапазоне частот 200–18000 МГц	1,17	1,13	1,20	1,28	1,32	1,22	1,19	1,22	1,21	1,18	1,19
Волновое сопротивление, Ом	49,4	49,4	49,5	49,6	49,4	49,5	49,5	49,5	49,5	49,6	49,5

Таблица 3
Электрические параметры симметричных пар после 5000 циклов перемоток (перегибов) через систему роликов

Наименование параметра	Значения параметров симметричных пар кабеля после циклов перегибов										
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Коэффициент затухания на частоте 100 МГц, дБ/100м	18,37	18,41	18,23	18,29	18,42	18,35	18,64	18,52	18,29	18,34	18,56
Волновое сопротивление, Ом	109,3	108,9	109,5	109,2	107,8	108,4	108,6	109,2	108,9	107,8	107,6

спечивающую изгиб по различным осям кабеля. Также была предусмотрена регулируемая система натяжения образца. Схема испытательной установки представлена на рис. 5. Длина испытуемого образца кабеля была равна 30 метрам, прилагаемое усилие натяжения 1 кН.

Кабель подвергли 5000 циклам перегибов (перемоток) сериями по 500 циклов. После завершения каждой серии проводились измерения электрических параметров. Измеренные значения параметров коаксиальных пар и симметричных пар представлены в табл. 2 и 3, соответственно.

После завершения испытаний образец был осмотрен: на поверхности оболочки кабеля трещин не обнаружено, отклонение геометрических размеров конструкции не зафиксировано. Целостность токопроводящих жил коаксиальных и симметричных пар сохранена. Результаты измерений также подтверждают высокую стойкость коаксиальных и симметричных пар к многократным перегибам.

Таким образом, исследования подтвердили, что разработанная конструкция гибкого комбинированно-

го высокочастотного кабеля устойчива к воздействию многократных перегибов (перемоток) через систему роликов с радиусом до 200 мм, работоспособна в условиях воздействия повышенных и пониженных температур и гидростатического давления до 9 МПа. Однако учитывая, что при воздействии давления 9 МПа и выше КСВН коаксиальных пар резко возрастает, для работы кабеля при погружении на большие глубины потребуется доработка конструкции.

Список источников

1. Васильев Е.Б., Васильев Р.Е., Овчинникова И.А., Бояркин М.И., Исхаков Д.Р., Шолуденко М.В., Семенова Н.А. Кабель грузонесущий комбинированный для подводного применения // Патент России № RU2763164, опубл. 28.12.2021, заявка № 2021110633 от 15.04.2021.

List of References

2. Vasiliev E.B., Vasiliev R.E., Ovchinnikova I.A., Boyarkin M.I., Iskhakov D.R., Sholudenko M.V., Semenova N.A. Load-carrying combined cable for underwater applications // Patent of Russia No RU2763164, publ. 28.12.2021, appl. No 2021110633 of 15.04.2021.