

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЕМКОСТИ И УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ГРШС

И. Г. ГАЛЕЕВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Гибкие кабели марки ГРШС служат для питания электродвигателя передвижных горных машин током промышленной частоты. Одновременно с этим по специальным жилам может осуществляться дистанционное управление и защитное заземление.

В последнее время гибкие кабели стали применять для передачи токов высокой частоты. Так, например, при дистанционном управлении горным комбайном с помощью взрывобезопасного магнитного пускателя ПМВ—1358 предлагалось по этому же кабелю организовать телефонную связь машиниста с погрузочным пунктом [1]. Дистанционное управление забойными механизмами предлагается производить по силовым жилам гибкого кабеля с помощью токов высокой частоты [2; 3].

Кабели, предназначенные для передачи токов высокой частоты, характеризуются активным сопротивлением, индуктивностью, емкостью, а также проводимостью изоляции.

Возможность передачи по кабелю высокочастотного сигнала без искажений и при допустимых затуханиях определяется частотной характеристикой первичных параметров кабеля. Эти параметры определяются конструкцией кабеля, материалами, из которого он изготовлен, и частотой тока.

Кабели ГРШС не предназначались для передачи токов высокой частоты, а поэтому в литературе отсутствуют данные, характеризующие первичные параметры этих кабелей.

Для расчета рабочей емкости кабеля в технике связи применяют формулу, предложенную В. И. Кулешовым [4],

$$C = \frac{\lambda \varepsilon 10^{-6}}{36 \ln \frac{2a}{d} \psi}, \quad (1)$$

где C —рабочая емкость пары жил кабеля, $\phi/\text{км}$;

a —расстояние между центрами жил, мм ;

d —диаметр жилы, мм ;

λ —коэффициент спиральности;

ε —диэлектрическая проницаемость;

ψ —поправочный коэффициент, характеризующий удаление жил от заземленной оболочки (при значительном удалении $\psi=1$).

Выведена эта формула с помощью потенциальных коэффициентов для симметричного четырехжильного кабеля с заземленной свинцовой оболочкой без учета эффекта близости.

В этом случае расчетная схема имеет вид, представленный на рис. 1. Так как жилы кабеля связи расположены симметрично относительно заземленной оболочки и друг друга, то частичные емкости

$$C_{13} = C_{14} = C_{23} = C_{24} \quad \text{и} \quad C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_{44},$$

что значительно упрощает расчет.

Конструкция кабелей ГРШС представлена на рис. 2, а размеры различных марок приведены в табл. 1. Как видно из рис. 2, жилы

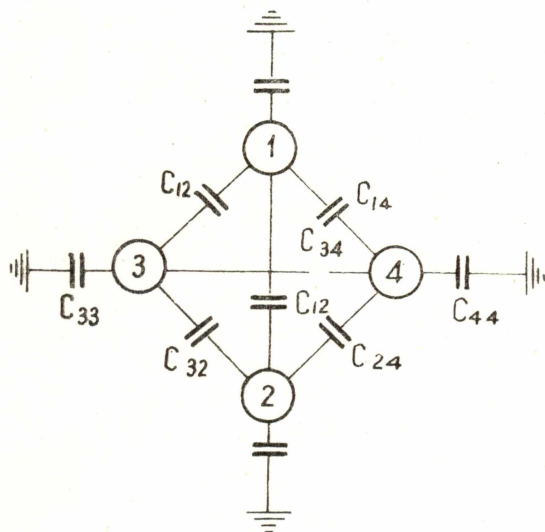


Рис. 1. Схема частичных емкостей внутри четверки.

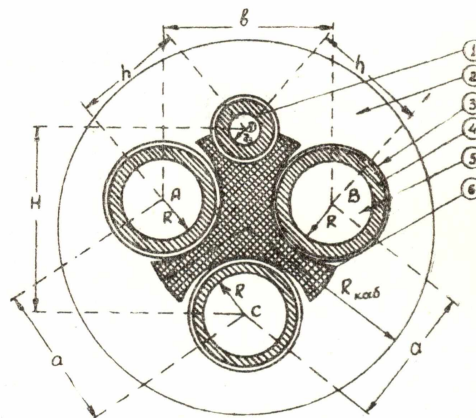


Рис. 2. Конструкция четырехжильных кабелей марки ГРШС (М1:1 кабель ГРШС 3x50+1x10).

1—заземляющая жила; 2—шланг; 3—изоляция жил из прорезиненной пряжи в один слой; 4—изоляция жил из резины; 5—токоведущая сила; 6—резиновый сердечник.

кабеля относительно земли, заземляющей жилы и друг друга, расположены не симметрично, а поэтому расчетная схема будет иметь вид, представленный на рис. 3. В этом случае

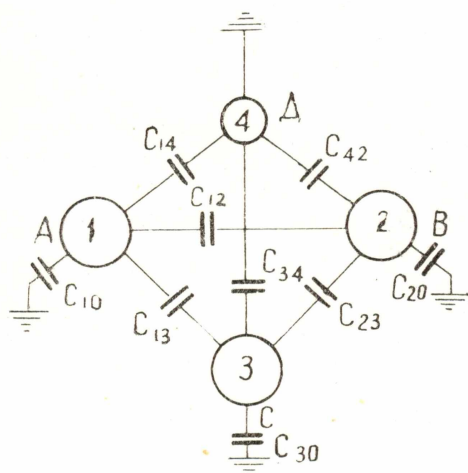


Рис. 3. Схема частичных емкостей четырехжильных кабелей ГРШС.

с частичными емкостями между жилами имеют незначительную величину. Поэтому при расчете рабочей емкости кабеля частичными

$$C_{14} = C_{24} \quad \text{и} \quad C_{13} = C_{23}.$$

Как видно из рис. 2 и 3, кабели ГРШС по конструкции отличаются от кабелей связи, поэтому формула (1) не может быть использована для определения рабочей емкости кабелей ГРШС. Это подтверждается проведенными экспериментами.

Число частичных емкостей может быть определено из следующего выражения

$$N = \frac{n}{2}(n+1)-1, \quad (2)$$

где n —число жил в кабеле.

Частичные емкости жил кабеля относительно земли по сравнению

Таблица 1

Конструктивные размеры кабелей ГРШС и ГРШСН

Число жил и их номинальное сечение	Размеры в мм															
	Конструкция жил			Изоляционная резина ТС – 30 или ТСШ—30		Обмотка жил прорезиненной тканевой лентой		Скрутка жил		Шланговая резина ШС—40, радиальная толщина	Наружный диаметр кабеля	Расстояния между центрами различных жил согласно рис. 2				$\frac{a}{d}$
	медная проволока		диаметр					№ сердечника	диаметр			a	b	h	H	
	число	диаметр		радиальная толщина	диаметр	радиальн. толщина	диаметр									
3×70+1×10	189 49	0,68 0,52	12,55 4,68	1,6 1,2	15,8 7,1	0,3 0,3	16,4 7,7	5	39,4	5,0	49,4	18,7	22,25	14,0	23,6	1,49
3×50+1×10	133 49	0,68 0,52	10,2 0,58	1,6 1,2	13,4 7,1	0,3 0,3	14,0 7,7	5	34,6	5,0	44,6	16,5	19,5	13,0	22,1	1,61
3×35+1×10	133 49	0,58 0,52	8,7 4,68	1,4 1,2	11,5 7,1	0,3 0,3	12,1 7,7	4	30,8	5,0	40,8	14,0	18,3	12,2	18,5	1,61
3×25+1×10	133 49	0,49 0,52	7,35 4,68	1,4 1,2	10,2 7,1	0,3 0,3	10,8 7,7	4	28,2	4,5	37,2	13,5	17,5	12,2	18,0	1,84
3×16+1×10	84 49	0,49 0,52	6,1 4,68	1,2 1,2	8,5 7,1	0,3 0,3	9,1 7,7	3	24,8	4,5	33,8	11,0	15,6	10,5	15,0	1,80
3×10+1×6	49 49	0,52 0,39	4,68 3,51	1,2 1,0	7,1 5,5	0,3 —	7,7 —	3	22,0	4,5	31,0	10,25	14,3	10,25	14,25	2,19
3×6+1×4	49 49	0,39 0,32	3,51 2,88	1,0 1,0	5,5 4,9	— —	— —	2	17,9	3,5	24,9	9,0	12,4	8,5	12,2	2,56
3×4+1×2,5	49 49	0,32 0,26	2,88 2,34	1,0 1,0	4,9 4,3	— —	— —	1	14,8	3,5	21,8	7,0	10,0	7,0	10,0	2,43

емкостями жил относительно земли можно пренебречь. В таком случае схему, представленную на рис. 3, можно преобразовать в схему, показанную на рис. 4, и, если учитывать, что

$$C_{13}=C_{23} \quad \text{и} \quad C_{14}=C_{24},$$

то рабочая емкость между жилами A и B может быть выражена через частичные емкости следующим образом:

$$C_{AB} = C_{12} + \frac{C_{14} C_{24}}{C_{14} + C_{24}} + \frac{C_{13} C_{23}}{C_{13} + C_{23}} = C_{12} + \frac{C_{14} + C_{13}}{2}. \quad (3)$$

Данной формуле соответствует эквивалентная схема частичных емкостей, изображенная на рис. 5, т. е. рабочая емкость кабеля для жил A и B не зависит от частичной емкости C_{34} . Объясняется это равенством частичных емкостей $C_{13} = C_{23}$ и $C_{14} = C_{24}$, т. е. симметричностью кабеля относительно „поперечной оси 3—4“, в силу чего потенциалы точек 3—4 будут одинаковыми.

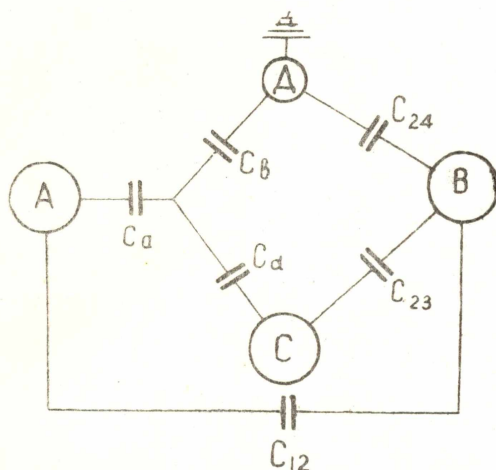


Рис. 4. Преобразованная схема частичных емкостей четырехжильных кабелей ГРШС.

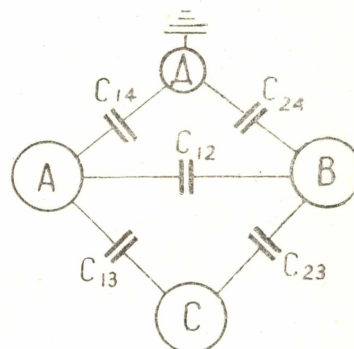


Рис. 5. Схема частичных емкостей, отвечающая формуле 3.

Таким же путем может быть получено выражение для определения рабочей емкости кабеля относительно жил AC или BC

$$C_{AC} = C_{BC} \approx C_{13} + \frac{(2C_{12} + C_{14})(C_{13} + C_{34})}{2C_{12} + 2C_{13} + C_{34}}. \quad (4)$$

Расчетная формула, выведенная из выражений (3), (4), является очень сложной и мало пригодной для практического пользования поэтому предлагается расчеты рабочей емкости кабелей ГРШС производить по формуле (5), которая дает точность в пределах допусков по изготовлению кабелей $\pm 10\%$

$$C = \frac{\varepsilon \kappa}{10^6 \cdot 36 \ln \left(\frac{A}{d} + \sqrt{\frac{A^2}{d^2} - 1} \right)}, \quad (5)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля;

A — расстояние между центрами жил, мм;

d — диаметр рабочей жилы кабеля, мм;

κ — коэффициент, учитывающий влияние заземляющей, третьей рабочей жил и спиральность жил кабеля.

Таблица 2

Изменение диэлектрической проицаемости различных жил кабелей ГРШС от
изменения частоты тока

Частота в гц	Диэлектрическая проицаемость изоляции различных жил кабелей ГРШС																	
	3×70+1×10		3×50+1×10		3×35+1×10		3×25+1×10		3×16+1×10		3×10+1×6		3×6+1×4		3×4+1×2,5		Средние значения	
	Ж и л ы к а б е л я																	
	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС	АВ	АС
50	4,55	5,13	4,39	4,86	4,88	4,53	5,06	5,39	4,80	4,86	5,47	5,29	5,07	5,05	4,40	4,56	4,80	4,96
100	4,47	4,87	4,30	4,73	4,68	4,39	4,92	5,24	4,63	4,67	5,32	5,13	4,72	4,72	4,24	4,27	4,70	4,75
200	4,32	4,69	4,16	4,60	4,33	4,30	4,59	4,91	4,34	4,50	4,97	4,86	4,53	4,53	3,93	4,08	4,35	4,43
500	4,18	4,50	3,95	4,41	4,15	4,10	4,33	4,38	4,12	4,18	4,62	4,50	4,21	4,20	3,59	3,67	4,10	4,26
1000	4,03	4,36	3,81	4,21	3,96	3,95	4,18	4,16	3,97	4,02	4,44	4,36	3,95	3,96	3,40	3,55	3,94	4,07
5000	3,69	4,15	3,57	3,89	3,69	3,69	3,79	3,87	3,67	3,65	4,03	4,06	3,70	3,69	3,05	3,24	3,62	3,78
10000	3,69	4,12	3,51	3,87	3,65	3,61	3,68	3,80	3,64	3,58	4,00	4,03	3,67	3,66	2,99	3,17	3,56	3,73
15000	3,69	4,12	3,51	3,87	3,62	3,61	3,68	3,80	3,62	3,58	3,97	4,00	3,63	3,63	2,95	3,15	3,54	3,72
20000	3,69	4,12	3,51	3,87	3,60	3,61	3,68	3,80	3,62	3,58	3,97	4,00	3,63	3,63	2,95	3,15	3,54	3,72
21000	3,69	4,12	3,51	3,87	3,60	3,61	3,68	3,80	3,62	3,58	3,97	4,00	3,63	3,63	2,95	3,15	3,54	3,72

Значения диэлектрической проницаемости для различных кабелей ГРШС при частотах от 50+21000 гц приведены в табл. 2. Данные, приведенные в этой таблице, получены измерением рабочих емкостей кабелей ГРШС и расчета диэлектрической постоянной по формулам.

Расстояния между жилами принимаются из табл. 1. Согласно рис. 2 $A = a$ или $A = b$ в зависимости от того, между какими жилами определяется рабочая емкость.

Значения k для различных марок кабелей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициента k для различных кабелей ГРШС

Марки кабеля	Жилы AC и BC	Жилы AB
3×70+1×10	1,77	2,08
3×50+1×10	1,80	2,11
3×35+1×10	1,84	2,21
3×25+1×10	2,00	2,17
3×16+1×10	1,85	2,28
3×10+1×6	1,86	2,19
3×6+1×4	1,96	2,20
3×4+1×2,5	1,88	2,20
Среднее для всех	1,87	2,18

С целью проверки полученных формул, были проведены измерения рабочих емкостей кабелей марки ГРШС.

Измерение рабочей емкости производилось на испытательной станции Томского кабельного завода по следующей методике. Рабочая емкость кабеля измерялась с помощью моста Шеринга на частоте 800 гц на строительной длине кабеля.

В дальнейшем на образцах кабеля в лаборатории кафедры кабельной и изоляционной техники ТПИ было проведено снятие частотной характеристики рабочей емкости с помощью моста МЛЕ—1. Причем к испытанию для снятия частотной характеристики допускались только те образцы, у которых рабочая емкость и угол диэлектрических потерь, пересчитанные на 1 км длины, совпадали или были близки к результатам измерений, выполненных на строительной длине кабеля при той же частоте. Измерения рабочей емкости были проведены во всех случаях по схеме, представленной на рис. 6.

Измерения на образцах повторялись с перерывами в 4 и 12 месяцев. На основании этих измерений составлена табл. 4. Параллельно с измерением рабочей емкости определялся угол диэлектрических потерь изоляции кабеля при изменении частоты тока в диапазоне 0,05—20 кгц. Измерения $\text{tg } \delta$ производились с помощью моста МЛЕ—1 по общеизвестной методике прямым методом. Погрешность измерения $\pm 0,02 \text{ tg } \delta + 0,0005$. По результатам обработки данных

Таблица 4

Изменение рабочей емкости кабелей марки ГРШС с изменением частоты
и сечения жилы

Частота в Гц	Марки кабелей ГРШС															
	3×70+1×10		3×50+1×10		3×35+1×10		3×25+1×10		3×16+1×10		3×10+1×6		3×6+1×4		3×4+1×2,5	
	Рабочие емкости в 10 ⁻⁹ ф/км различных пар жил															
	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC
50	228	265	222	227	217	222	202	217	191	209	187	193	160	167	140	155
100	224	251	216	221	208	215	196	209	184	201	182	187	149	156	135	145
200	217	242	205	--	192	202	183	197	173	193	170	177	143	150	125	139
500	210	232	197	206	184	198	173	183	164	180	158	164	133	139	114	125
1000	202	225	189	197	176	193	167	174	158	173	152	159	125	131	108	121
2000	194	219	182	190	171	187	161	168	152	166	145	154	120	125	102	116
5000	186	215	175	182	164	181	151	162	146	157	138	148	117	122	97	110
10000	185	213	173	181	162	177	147	159	145	154	137	147	116	121	95	108
15000	185	212	173	181	161	177	—	—	144	154	136	146	115	120	94	107
16000	185	212	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20000	185	212	173	181	160	—	147	159	144	154	135	146	115	120	94	107
21000	185	212	173	181	160	—	147	159	144	154	136	146	115	120	94	107

измерений построены кривые зависимости изменения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции различных кабелей ГРШС от частоты (рис. 7).

Характер изменения тангенса угла диэлектрических потерь изоляции кабелей ГРШС является типичным для резины с добавками сажи и талька. Как известно [5], точки перегиба кривой $\operatorname{tg} \delta = \varphi(f)$ для резины зависят от содержания связанной серы. Значительная разница значения $\operatorname{tg} \delta$ для различных кабелей объясняется особенностями

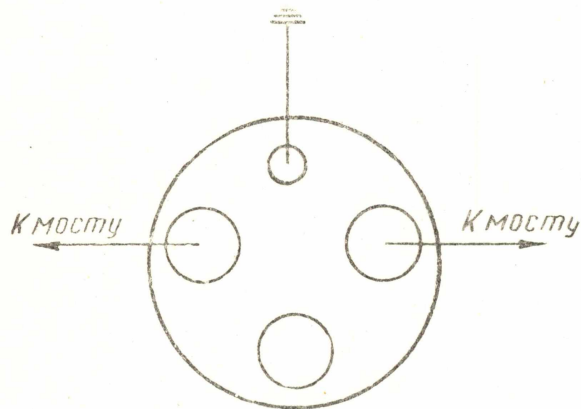


Рис. 6. Схема измерения рабочей емкости четырехжильных кабелей ГРШС.

конструкции и непостоянством состава изоляции. Для шланговой резины отсутствует норматив на $\operatorname{tg} \delta$ и на ϵ . В результате этого состояние и состав элементов изоляции не контролируются.

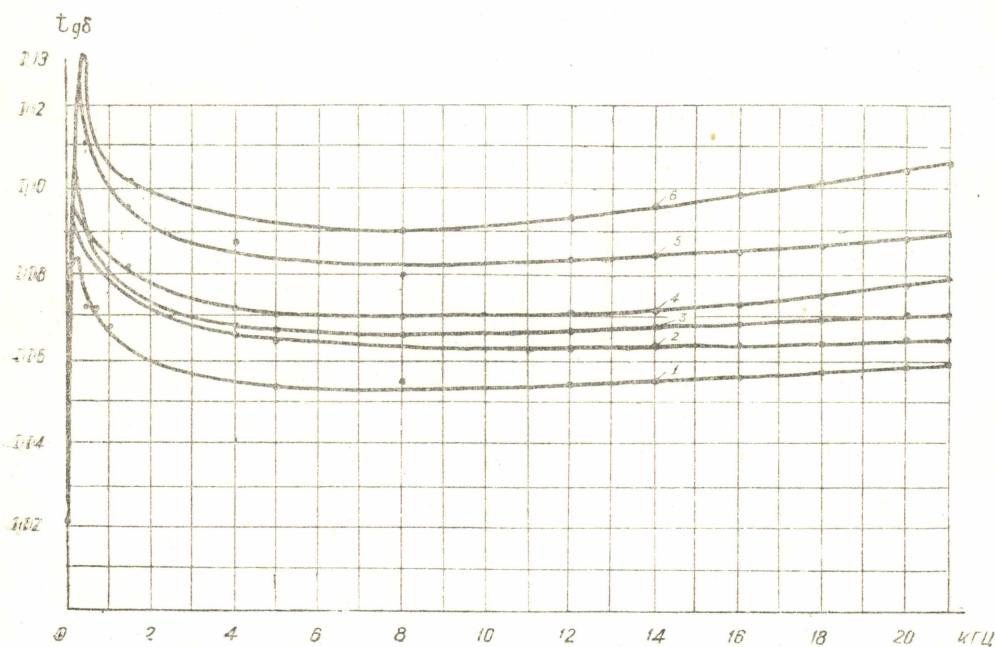


Рис. 7. Зависимость изменения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции различных марок кабелей ГРШС от частоты. 1—ГРШС $3 \times 70 + 1 \times 10$; 2—ГРШС $3 \times 50 + 1 \times 10$; 3—ГРШС $3 \times 35 + 1 \times 10$; 4—ГРШС $3 \times 25 + 1 \times 10$; 5—ГРШС $3 \times 16 + 1 \times 10$; 6—ГРШС $3 \times 10 + 1 \times 6$.

Измерения показали, что рабочая емкость и угол диэлектрических потерь кабелей ГРШС сильно зависят от технологии изго-

товления, качества изоляционных материалов и для различных образцов кабеля изменяются в сравнительно широких пределах.

В связи с использованием кабелей ГРШС для передачи токов высокой частоты необходимо установить нормы на величину угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости сердечника, шланговой резины и изоляционных материалов. При изготовлении кабелей следует контролировать состояние и содержание составных частей изоляции резины, сердечника и шланга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Светличный П. Л. Дистанционное управление забойными машинами. Углетехиздат, 1956.
2. Галеев И. Г. Перспективы дистанционного управления забойными механизмами по силовым жилам гибкого резинового кабеля. Уголь, № 11, 1955.
3. Огороднейчук И. Ф. Дистанционное управление шахтными механизмами при помощи токов высокой частоты. Материалы научно-технической конференции. Конотоп. Автоматизация производственных процессов в угольной промышленности. Углетехиздат, 1956.
4. Кулешов В. Н. Теория кабелей связи. Связьиздат, 1950.
5. Горшков П. И. Основы техники кабелей сильного тока. Госэнергоиздат 1940.