

УДК 621.315

М.А. МУРАВЬЕВ, инженер-конструктор 1 кат. АО «ОКБ КП»,
аспирант гр. А9-27 (НИ ТПУ)
Научный руководитель А.П. ЛЕОНОВ, к.т.н., доцент (НИ ТПУ)
г. Томск

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМ- ПУЛЬСНОГО КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Аннотация: рассмотрены конструкционные решения для высоковольтных импульсных кабелей, предназначенных для передачи высокочастотных импульсных сигналов при высоковольтном напряжении.

Потребность в высоковольтных импульсных коаксиальных кабелях существует в областях, где требуется передача мощных РЧ сигналов (100 кВт при пиковом напряжении 80 кВ), обеспечивающих стойкость к частичным разрядам.

Устранение частичных разрядов в высоковольтных кабелях, обеспечивается за счет снижения напряженности электрического поля на границе проводник/изоляция, либо за счет уменьшения размера воздушных пор в изоляции. Чаще всего в настоящее время для уменьшения напряженности и минимизирования количества воздушных включений на границе проводник/изоляции применяются полупроводящие слои (п/п) [1]. Однако, уменьшение напряженности электрического поля на поверхности жилы в ряде случаев не исключает электронную эмиссию в слои диэлектрика, приводящую к локальному разрушению изоляции.

С целью снижения эмиссионного разрушения изоляции и уменьшения габаритов кабеля, в данной статье предлагается использовать в конструкции кабеля специальных диэлектрических («антиэмиссионных») слоев с повышенным значением диэлектрической проницаемости (ϵ), которые обладают свойством «захватывать» свободные электроны эмиссии с поверхности проводника при высокой напряженности электрического поля.

Обоснование эффективности конструктивного исполнения компактного импульсного высоковольтного коаксиального кабеля.

Конструктивным аналогом разработанного кабеля является высоковольтный импульсный кабель «HV-Pulse Cable RG 220/U», конструкция которого представлена на рисунке 1.

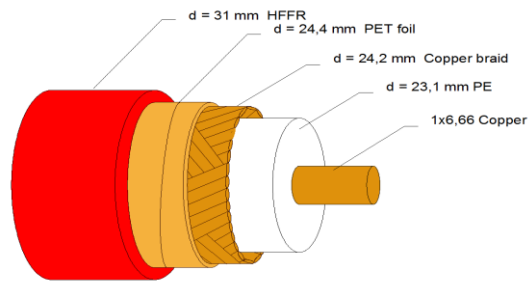


Рис. 1. Конструкция кабеля «HV-Pulse Cable RG 220/U»

Основные электрические параметры коаксиальных кабелей (волновое сопротивление, коэффициент затухания допустимый ток и рабочее напряжение) определены выражениями [2]:

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}} \cdot \ln \left(\frac{D \cdot W_3}{d \cdot W_1} \right), \text{ Ом}$$

$$\alpha_d = \frac{8,686 \cdot \sqrt{0,1 \cdot \rho \cdot f}}{Z_B \cdot d} \cdot K11 \cdot K21, \text{ дБ/м}$$

$$\alpha_D = \frac{8,686 \cdot \sqrt{0,1 \cdot \rho \cdot f}}{Z_B \cdot D} \cdot K12 \cdot K22, \text{ дБ/м}$$

$$\alpha_G = 9,08 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}} \cdot tg\delta, \text{ дБ/м}$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T}{Z_B \cdot [\alpha \cdot \sum S_i]}}$$

где

$\epsilon_{\text{ЭКВ}}$	эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции;
d	наружный диаметр внутреннего проводника, мм;
D	внутренний диаметр внешнего проводника, мм;
W_1	коэффициент влияния конструкции внутреннего проводника на Z_B (для однопроволочного проводника $W_1 = 1$);
W_3	коэффициент влияния конструкции внешнего проводника на Z_B (для внешнего проводника в виде оплетки $W_3 = 1 + 1,5 \cdot d_{\text{пр.опл}}/D$);
α_d	тепловые потери на внутреннем проводнике, дБ/м;
α_D	тепловые потери на внешнем проводнике, дБ/м;
α_G	потери в диэлектрике материала, дБ/м;
ρ	удельная сопротивленние материала проводника, Ом·м;
f	частота, Гц;
$tg\delta$	диэлектрические потери материала изоляции.
ΔT	разница между температурами поверхности и окружающей среды;
$\sum S_i$	сумма тепловых сопротивлений (изоляция, разделительного слоя, оболочки и окружающей среды) элементов кабеля определяющиеся по выражению из [4].

Рабочее напряжение определяется по выражению [1]:

$$U_{\text{пр}} = 0,707 \cdot E_{\text{пр}} \cdot \left(r_d \cdot \ln \left(\frac{r_D}{r_d} \right) \right), \quad \text{кВ}$$

где

$E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность изоляции из ПЭ, равная 40 кВ/мм [1];

При оценке надежности работы изоляции необходимо обеспечить выполнения условия $E_{\text{пр}} > E_{\text{max}} \cdot k_{\text{зап}}$, где E_{max} — максимальная напряженность электрического поля, а $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса для импульсного воздействия равен 1,51 [3].

Рассчитанные электрические параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные параметры кабеля «HV-Pulse Cable RG 220/U»

Тип кабеля	Волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$	Коэффициент затухания α , дБ/м		Ток, А	Рабочее напряжение, кВ
		1 МГц	30 МГц		
RG 220/U	50 Ом	0,0058	0,011	10,9	110

С целью оценки эффективности применения специальных конструктивных решений (эмиссионного и полупроводящего) слоя в кабеле «HV-Pulse Cable RG 220/U», выполнен расчет параметров, в том числе распределение напряженности электрического поля в кабеле, с добавлением в конструкцию полупроводящего слоя толщиной 0,6 мм и эмиссионного слоя толщиной от 0,5 до 1,0 мм.

Расчет напряженности электрического поля в изоляции, рассматривая ее как четырехслойный элемент при постоянстве тангенциальной составляющей поля, произведен по выражению:

$$E_{\text{пр}}(r_i) = \frac{U_{\text{раб}}}{r_i \cdot \varepsilon \cdot \left[\sum \left(\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} \cdot \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right) \right) \right]}, \quad \text{кВ}$$

где

r_i и r_{i+1} — внутренний радиус и наружный радиус слоя, мм;
 ε — диэлектрическая проницаемость слоя;
 U — рабочее напряжение равное 110 кВ.

Распределение напряженности электрического поля в радиальном направлении для сплошной и комбинированной изоляции представлено на рисунке 2.

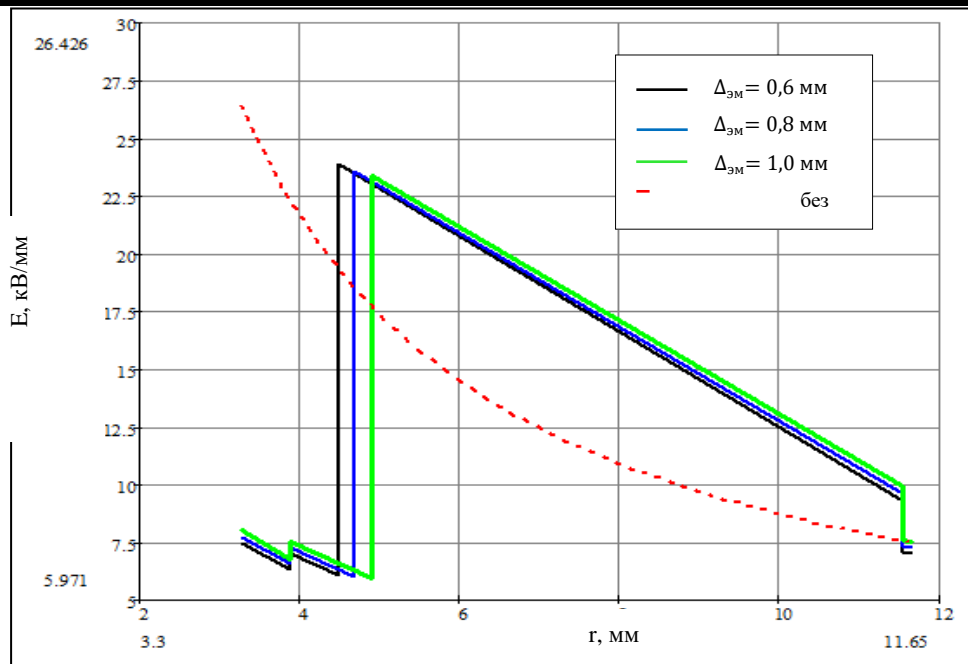


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в изоляции

Согласно результатам, представленных на рисунке 2, введение специальных слоев в конструкцию кабеля, обеспечивает снижение напряженности на границе слоев изоляции. Использование дополнительного слоя из полупроводящего полиэтилена, который накладывается на внутренний проводник, приводит к увеличению эффективного диаметра этого проводника. Использование эмиссионного слоя, который является изоляционным материалом с диэлектрической проницаемостью больше чем у основной изоляции, обеспечивает перераспределение напряженности электрического поля в слоях, обратно пропорционально значениям их диэлектрической проницаемостей, что приводит к увеличению электрической прочности конструкции.

Количественная оценка влияния толщины эмиссионного слоя ($\Delta_{эм}$), расположенного поверх п/п слоя на электрическую прочность изоляции, может быть определена через отношение напряженности поля в изоляции с эмиссионным слоем (E_1) и без него (E_0):

$$E_1 = E_0 \frac{2}{1 + \frac{\epsilon_{эс}}{\epsilon_{из}}} \approx 0,41E_0$$

где

$\epsilon_{эс}$ и $\epsilon_{из}$ диэлектрическая проницаемость эмиссионного слоя ($\epsilon_{эс} = 9$) и изоляции ($\epsilon_{из} = 2,3$)

Для данного расчетного случая рабочую напряженность кабеля можно увеличить до значения $E_{раб1} = \frac{E_{раб}}{0,41} = 18,6 \cdot 10^6$ В/м. Толщина изоляции

с учетом повышения $E_{раб1}$, обеспечивающая работу кабеля при напряжении 110 кВ, возможно определить из расчета необходима радиуса изоляции с дополнительными слоями, при $\Delta_{эм} = 0,5 - 1,0$ мм по выражению [1]:

$$r_{из2}(\Delta_{эм}) = r_{пп} \cdot \exp\left(\frac{U_{раб}}{E_{раб1} \cdot \sqrt{3}[(r_{пп} + \Delta_{эм}) \cdot 10^{-3}]}\right)$$

где

$r_{пп}$ радиус по полупроводящему слою, мм;

Уменьшение изоляции после введения слоев, оценивается по формулам: $\Delta_{из2}(\Delta_{эм}) = r_{из2}(\Delta_{эм}) - r_{эм}$ и $\Delta_{разница} = \Delta_{из}(\Delta_{эм}) - \Delta_{из2}(\Delta_{эм})$. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Зависимость толщины изоляции от эмиссионного слоя для обеспечения $U_{раб} = 110$ кВ

Толщина эмиссионного слоя	Толщина изоляции до перерасчета	Толщина изоляции после перерасчета	Экономия на толщине изоляции	Диаметр D , до перерасчета	Диаметр D , после перерасчета
$\Delta_{эм},$ мм	$\Delta_{из}(\Delta_{эм}),$ мм	$\Delta_{из2}(\Delta_{эм}),$ мм	$\Delta_{разн.},$ мм	$D_1,$ мм	$D_2,$ мм
0,6	7,05	3,84	3,21	23,1	16,9
0,8	6,95	3,60	3,35		16,6
1,0	6,85	3,37	3,48		16,3

Результаты, приведенные в таблице 2, позволяют утверждать, что применение эмиссионного слоя приводит к увеличению электрической прочности и позволяет уменьшить радиальные размеры кабеля более чем на 25 %.

Изменение радиальных размеров кабеля, определяется не только возможным увеличением электрической прочности, но и требуемым соотношением D/d обеспечивающим нормируемое значение Z_v . Оптимальное соотношение D/d зависит от эквивалентных значений диэлектрической проницаемости и эквивалентного значения $tg\delta_{эКВ}$ изоляции. Значения $\epsilon_{эКВ}$ и $tg\delta_{эКВ}$ определяются по выражениям [4]:

$$\epsilon_{эКВ} = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_n}{\theta_1 \epsilon_1 + \theta_2 \epsilon_2 + \dots + \theta_n \epsilon_n}$$

$$tg\delta_{эКВ} = \frac{\epsilon_1 \theta_1 tg\delta_1 + \epsilon_2 \theta_2 tg\delta_2 + \dots + \epsilon_n \theta_n tg\delta_n}{\epsilon_1 \theta_1 + \epsilon_2 \theta_2 + \dots + \epsilon_n \theta_n}$$

$$\theta_1 = \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

$$\theta_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2}$$

где

h_1, h_2, h_n толщина соответствующего слоя, мм;

Расчет оптимального соотношения D/d носит итерационный характер из условия обеспечения требуемых значений Z_v и E_{max} . Пример такого расчета показан на рисунке 3.

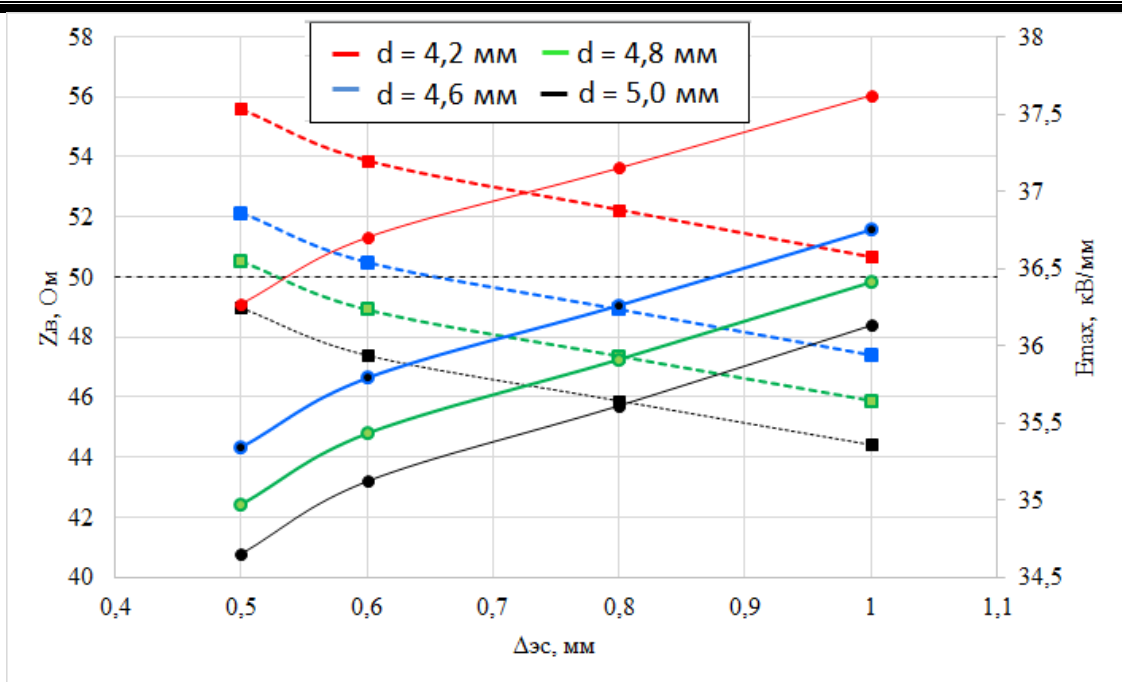


Рис. 3. Соотношение $Z_{в}$ и E_{max} в зависимости от толщины эмиссионного слоя

На основе эквивалентных параметров, рассчитано оптимальное соотношение $D/d = 3,8$ и электрические характеристики компактного импульсного высоковольтного кабеля. Конструкция разработанного кабеля, приведена на рисунке 4, результаты расчета кабелей в таблице 3.

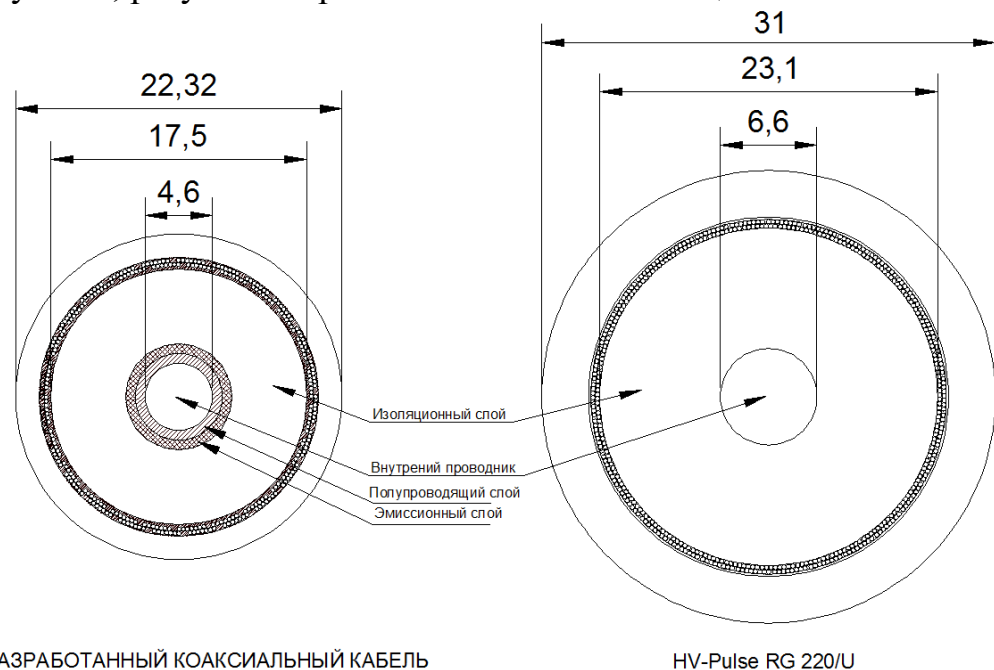


Рис. 4 Геометрические размеры разработанного кабеля и «HV-Pulse Cable RG 220/U»

Таблица 3

Расчетные параметры разработанного кабеля и «HV-Pulse Cable RG 220/U»

Тип кабеля	Волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$	Коэффициент затухания α , дБ/м		Ток, А	Рабочее напряжение, кВ
		1 МГц	30 МГц		
RG 220/U	50 Ом	0,0018	0,011	10,9	110
Разраб.каб.	50,5 Ом	0,0024	0,014	8,7	110

Основные выводы

1. Совместное применение п/п и эмиссионного слоя, позволяет уменьшить неоднородность распределения электрического поля в изоляции и повысить надежность работы кабеля;
2. Применение эмиссионных слоев позволяет увеличить электрическую прочность более чем на 20%;
3. Совместное применение п/п и эмиссионного слоя в конструкциях высоковольтных импульсных кабелях позволяет уменьшить радиальные размеры более чем на 25%;
4. Оптимизация по масса-габаритным показателям, конструкции высоковольтных импульсных коаксиальных кабелей с эмиссионным слоем, требует расчетного определения оптимального соотношения D/d с учетом обеспечения нормированных величин E_{max} и $Z_{\text{в}}$;
5. Сниженные масса-габаритные параметры, в сравнении с существующими аналогами, при сохранении значения волнового сопротивления и рабочего напряжения, делают разработанный кабель перспективным для применения в различных областях высоковольтной техники, где требуется передача высокочастотных сигналов высокого напряжения.

Список литературы:

1. Строкин Н.А. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники. Электрический расчет изоляционных конструкций: учебное пособие / Н.А. Строкин. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. – 65 с.
2. Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели. Учебное пособие для электромеханических и электротехнических техникумов. – Москва: «Энергия», 1973 г. – 328 с.
3. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, – 1984, – 368 с
4. Петров А.В. Методы испытаний электрической изоляции. Учебное пособие к практическим занятиям. – Томск: Изд. ТПУ, 2004. – 121 с.

**VI Всероссийская научно-практическая конференция
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»
425-8 8-10 декабря 2021г.**

Информация об авторах:

Муравьев Максим Алексеевич, аспирант гр. А9-27, НИ ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30. Инженер-конструктор 1 кат. Акционерного Общества «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности», mam44@tpu.ru, maksim.muravyov@okbkr.ru