Особенности кабелей 6-500 кВ. СПЭ-изоляция и оболочка с продольными ребрами

УДК 621.315.21

За последние годы на страницах журнала многократно публиковались материалы, посвященные обоснованию выбора жил и экранов современных кабелей с СПЭ-изоляцией, а также оптимизации схем заземления экранов таких кабелей. Вместе с тем, у кабелей помимо жил и экранов есть и другие элементы, заслуживающие не меньшего внимания — это изоляция и оболочка. В данной статье рассказывается о некоторых их особенностях, среди которых повышенные величины рабочей емкости СПЭ-изоляции, а также опыт эксплуатации кабелей с оболочкой, покрытой продольными ребрами.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

Ключевые слова:
кабель высокого напряжения, однофазный кабель, трехфазный кабель, изоляция кабеля, оболочка кабеля, сшитый полиэтилен, ребра на оболочке

В конструкции современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) жила и изоляция обычно рассматриваются как главные элементы кабеля, а экран и оболочка скорее как вспомогательные, что незаслуженно. На самом деле, все перечисленные четыре элемента конструкции кабеля являются важными и напрямую влияют на работу кабеля.

Например, неверный выбор сечения экрана или схемы его заземления точно также способен вызвать опасный перегрев кабеля как это бывает при неверном выборе сечения жилы. Или, например, серьезное повреждение наружной оболочки кабеля спустя время обязательно вызовет проникновение влаги внутрь кабеля, а значит пробой СПЭ-изоляции. Таким образом, разные элементы конструкции кабеля действительно тесно связаны друг с другом и не могут быть разделены на основные/второстепенные.

Про жилу и экран за последние 15 лет в стране уже было сделано много публикаций, в частности опубликована книга [1]. Поэтому теперь хотелось бы поделиться некоторыми соображениями про изоляцию и оболочку. Безусловно, тематика изоляции и оболочки обширна: исследования их свойств ведутся не отдельными авторами, а целыми научными коллективами отраслевых институтов (ВНИИКП), в том числе с привлечением дорогого лабораторного испытательного оборудования. Однако наберусь смелости высказаться о некоторых особенностях изоляции и оболочки, которые удалось выявить в процессе проектирования, монтажа и эксплуатации кабельных линий.

Статья сопровождается рисунками, где, в первую очередь, показаны однофазные кабели. Несмотря на это, статья является общей и распространяется на любые кабели высокого напряжения 6–500 кВ с СПЭ-изоляцией: однофазные и трехфазные.

ИЗОЛЯЦИЯ КАБЕЛЯ

Говоря об изоляции, ответим на два вопроса:

– у какой изоляции больше емкость — у бумажно-масляной изоляции (БМИ) или у СПЭ?
– на сколько точна формула для расчета емкости СПЭ-изоляции?

В электрических сетях емкость изоляции кабелей играет важную роль, и от емкости изоляции кабелей напрямую зависит:

– в сети 6–35 кВ — выбор нейтральных реакторов для компенсации емкостных токов ОЗЗ, а также настройка релейной защиты кабельных линий, отходящих от шин;
– в сети 110–500 кВ — выбор шунтирующих реакторов (ШР) для компенсации реактивной мощности кабельных линий, а также токи/напряжения нормального режима сети.

Сравнение емкостей СПЭ-изоляции и БМИ. В настоящее время кабели 6–500 кВ с СПЭ-изоляцией имеют однофазную или трехфазную конструкцию (с пофазно экранированными жилами). В обоих случаях каждая жила имеет индивидуальный

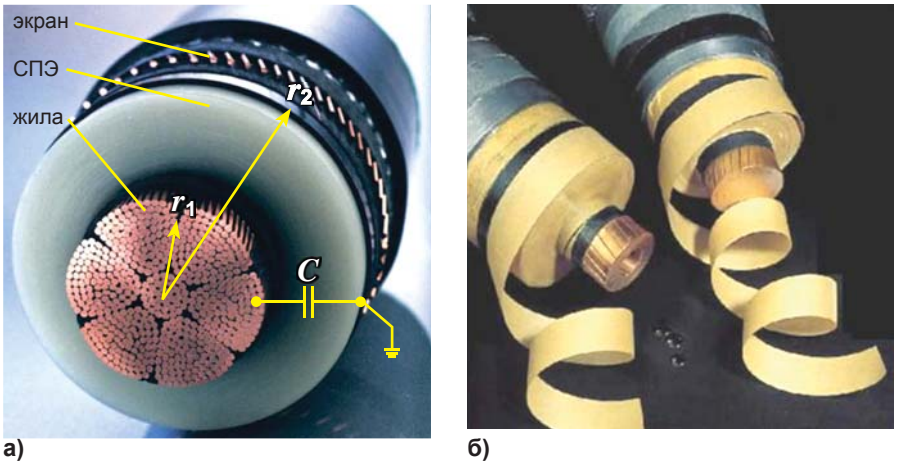
заземленный экран (проволочный или цельный), а значит у каждой фазы электрическое поле начинается на жиле и заканчивается на ее заземленном экране. Поэтому между фазами отсутствует взаимное влияние через электрическое поле и отсутствует межфазная емкость C_m. Следовательно, у кабельной линии емкость прямой последовательности $C_1=C_0+3C_m$ и емкость нулевой последовательности C_0 равны друг другу, и становится ясно, почему кабельные заводы указывают в каталогах только одно общее значение $C_1=C_0$, называемое «рабочей емкостью кабеля C».

Рабочая емкость кабеля C прямо пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости ε его изоляции. Поскольку у СПЭ ε=2,3÷2,5, а у бумаги, пропитанной маслом, ε=4,2÷4,3, то может показаться, что для современных кабелей емкость должна быть вплоть до двух раз меньше, чем у кабелей предыдущих поколений. В свою очередь, уменьшенная емкость упростила бы компенсацию токов замыкания на землю в кабельных сетях 6–35 кВ и компенсацию реактивной мощности в сетях 110–500 кВ.

Ожидания малой емкости кабелей, безусловно, выдавались как преимущество СПЭ и в определенной степени были фактором, способствовавшем ускоренному внедрению СПЭ-изоляции. Однако оказалось, что емкость современных кабельных линий вовсе не меньше, чем у старых, а, напротив, даже больше. Дело в том, что емкость кабеля зависит не только от ε, но и от сечения жилы кабеля, и от толщины изоляции. Чтобы понять такую зависимость, достаточно вспомнить, что емкость любого конденсатора возрастает:

– при увеличении площадей обкладок (электродов);
– при уменьшении расстояния между обкладками.

Сечение жилы. Предельное сечение жилы трехфазного кабеля 6–35 кВ достигает 240 мм², что не сильно отличается от сечений трехфазных кабелей с БМИ. Вместе с тем, появление и развитие однофазных кабелей с СПЭ-изоляцией дало возможность почти неограниченного роста сечения, и известны линии, где оно достигает 1500–3000 мм², а это значительно выше того, что было возможно ранее в сетях, построенных кабелями с БМИ. Повышенное сечение жилы означает, что такая жила также имеет повышенную площадь боковой поверхности, и тем самым автоматически возрастает и сечение/площадь экрана, который должен равномерно укрывать наружную поверхность СПЭ-изоляции (рисунок 1). Как следствие возросших сечений жилы/экрана, мы и наблюдаем увеличенную рабочую емкость кабеля (вопреки малому ε изоляции).



а) б)

Рис. 1. Конструкция однофазного кабеля с разными типами изоляции: а) СПЭ-изоляция; б) бумажно-масляная изоляция

Толщина изоляции. СПЭ изоляция рассчитана на длительную работу при более высокой напряженности электрического поля, чем это было для БМИ. Поэтому при изготовлении кабеля требуемого класса напряжения толщина СПЭ-изоляции оказывается меньше, чем у БМИ. Как следствие сниженной толщины изоляции кабеля, мы наблюдаем повышение результирующей емкости кабеля (вопреки малому ε изоляции).

Повышенная емкость, связанная с сечением жилы и толщиной изоляции, означает, что в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью уже недопустимо использовать старую эмпирическую формулу оценки тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), известную еще со времен СССР:

$$I_{ОЗЗ} = \frac{U_{НОМ} \cdot l_{СУМ}}{10}, \qquad (1)$$

где $I_{ОЗЗ}$ — ток замыкания, А; $U_{НОМ}$ — номинальное напряжение сети, кВ; $l_{СУМ}$ — суммарная длина кабельных линий в сети, км.

На рисунке 2 приведены результаты сравнения емкостного

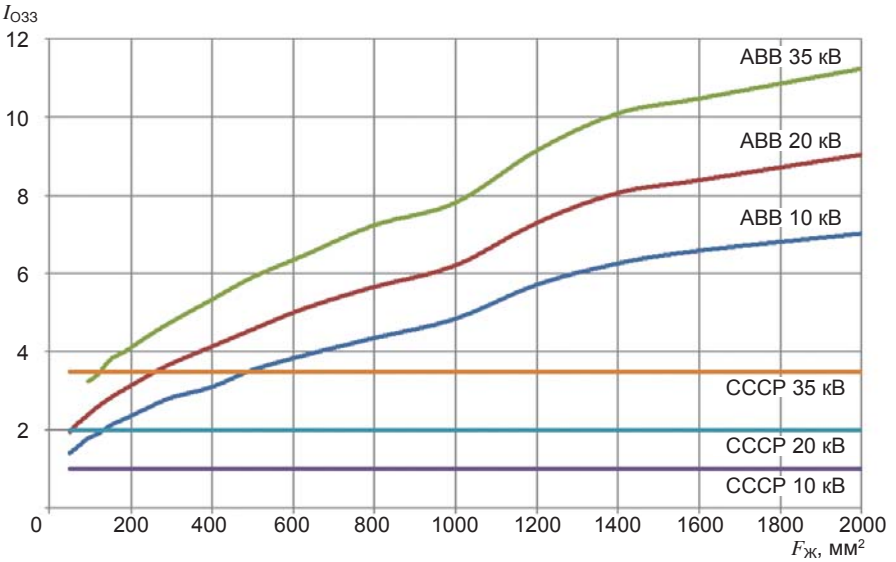


Рис. 2. Сравнение тока ОЗЗ кабельной сети с современными (АВВ) и старыми (СССР) кабелями

Табл. 1. Погонная емкость однофазного кабеля 220 кВ

$F_Ж$, мм²	Геометрия (рисунок 1)		C, мкФ/км		
	$2r_1$, мм	$2r_2$, мм	Измерения	Расчет (2)	Ошибка, %
630	30,2	78	0,16	0,141	14
800	33,7	81,9	0,17	0,150	13
1000	37,9	86,1	0,18	0,163	11
1200	44	94	0,21	0,176	19
1400	49	99	0,22	0,190	16
1600	52	102	0,23	0,198	16
2000	56	106	0,24	0,209	15
2500	66	116	0,27	0,237	14
3000	72	122	0,29	0,253	15

тока ОЗЗ $I_{ОЗЗ}$ для двух видов сетей: первая построена кабелями с СПЭ-изоляцией, вторая — кабелями с БМИ. Для случая СПЭ ток взят из каталога фирмы ABB (при условии, что все кабели сети одинаковые, то есть с одним и тем же сечением жилы $F_Ж$), а для случая БМИ ток рассчитан по формуле (1).

Согласно рисунку 2, например, для кабельной сети 10 кВ суммарной протяженностью $l_{СУМ}$=1 км по формуле (1) для старых кабелей имеем ток замыкания сети $I_{ОЗЗ}$=1 А, тогда как для новых кабелей сечением жилы $F_Ж$=630 мм² имеем уже $I_{ОЗЗ}$=4 А, то есть емкость СПЭ-изоляции оказалась в 4 раза выше, чем у старых кабелей с БМИ (несмотря на то, что у СПЭ проницаемость ε почти в 2 раза меньше, чем у БМИ).

Расчет емкости изоляции по формуле. Ключевым источником для получения емкости C являются кабельные каталоги, в которых для определения погонных значений рабочей емкости приведены одновременно:

– результаты заводских измерений в зависимости от сечения жилы $F_Ж$ и номинального напряжения $U_{НОМ}$ (оно определяет толщину изоляции);
– формула (2) для расчета емкости:

$$C^* = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{ln(r_2 / r_1)}, \qquad (2)$$

где ε=2,4 — относительная диэлектрическая проницаемость СПЭ-изоляции, о.е.; ε_0=8,85·10^{-12} — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; r_1 и r_2 — радиус жилы (мм) и радиус изоляции (мм), показанные на рисунке 1 и приведенные в кабельном каталоге в зависимости от сечения жилы $F_Ж$ и напряжения $U_{НОМ}$.

В таблице 1 даны результаты сравнения заводских измерений емкости кабеля 220 кВ с расчетами по формуле (2) на основе заводских же данных о геометрии кабеля (в каталогах обычно приводятся не радиусы жилы r_1 и изоляции r_2, а их диаметры $2r_1$ и $2r_2$). Из таблицы 1 видно, что расчеты по (2) всегда дают емкость кабеля на 15–20% меньше реальных фактических значений, полученных в результате измерений.

Различие двух емкостей связано с тем, что формула (2) не учитывает то, что поверх жилы и экрана накладываются полупроводящие слои, имеющие ε значительно больше, чем у самого СПЭ. Поэтому формула (2) может использоваться только для приближенных оценок, а при проектировании сетей рекомендуется опираться на емкость, указанную в каталогах по результатам измерения, и она превышает расчеты по (2) на 15–20%.

Итак, СПЭ-изоляция современных кабелей по целому ряду причин имеет емкость, которая превосходит ожидаемые значения (из-за конструктивных особенностей кабелей, связанных с повышенными сечениями жилы, сниженной толщиной изоляции, наличием полупроводящих слоев с высокой проницаемостью). Отсутствие точных величин емкости кабелей может вызвать серьезные ошибки при проектировании сетей (при расчете токов ОЗЗ, выборе компенсационных реакторов и уставок релейной защиты в сетях 6–35 кВ, при расчете индуктивности шунтирующих реакторов в сетях 110–500 кВ), а значит дать соответствующие проблемы в процессе эксплуатации.

ОБОЛОЧКА КАБЕЛЯ

Говоря об оболочке кабеля, обсудим, почему ранее в каталогах некоторых заводов рекламировались кабели с оболочкой, покрытой снаружи ребрами, но в настоящее время применение таких кабелей почти не встречается.

Гладкая и ребристая оболочка кабеля. На рисунке 3 показаны примеры повреждения наружной оболочки кабелей:

– удар (продавливание) каким-то предметом (а);
– задир при протяжке кабеля (б);
– бурение сторонней организацией (в);
– гвозди, забитые вандалами (г).

В приведенных случаях повреждения оболочки привели к разгерметизации кабеля, угрозе проникновения воды в СПЭ-изоляцию и риску ее последующего пробоя. При этом случаи (а)-(г) являются обычными для любых кабелей, вне зависимости от наличия или отсутствия ребер на оболочке.

На рисунке 4 даны кабель с обычной оболочкой (а) и ребристой оболочкой (б). Обсудим причины, по которым в нашей стране около 10–15 лет назад появились кабели с ребрами снаружи, а также причины, по которым эксперименты с оболочкой кабелей закончились, и в настоящее время такие ребристые оболочки, по сути, больше не применяются [2, 3].

Оболочка является важным элементом конструкции кабеля, от которого серьезно зависит вероятность возникновения повреждений СПЭ-изоляции и срок службы кабеля. Причины повреждений оболочки многообразны (рисунок 3), и всегда существовал

запрос на повышение прочности/защищенности оболочки. Для решения задачи есть два варианта:

– повысить толщину оболочки (кабель с усиленной оболочкой, в обозначении есть «у»);
– проложить кабели не в грунте, а в полимерных трубах.

Усиленная оболочка означает, что вместо обычной толщины, например Δ=4 мм, она имеет $\Delta_У$=6 мм. Кабель с усиленной оболочкой дороже обычного, он тяжелее и хуже гнется, но зато при протяжке такого кабеля и его эксплуатации обеспечивается меньшая вероятность сквозного повреждения оболочки. Как правило, о применении усиленной оболочки задумываются прежде всего для ответственных кабельных линий или сложных условий прокладки.

Не всегда простой/очевидный выбор между «обычной» и «усиленной» оболочками привел к идее выпускать кабели, где оболочка усилена не по всему поперечному сечению, а только в нескольких отдельных местах, за счет обустройства там продольных ребер (рисунок 4б). Кабель с отдельными ребрами мало отличается по цене от кабеля с обычной стандартной гладкой оболочкой толщиной Δ=4 мм, но зато наличие ребер позволяет утверждать, что ребристая оболочка кабеля якобы является «усиленной» оболочкой, ведь действительно для нее наибольшая толщина достигает $\Delta_Р=\Delta_У$. Таким образом, ребра на поверхности оболочки дали возможность выдавать кабель, по сути являющийся обычным, за кабель с «усиленной» оболочкой, а значит, в зависимости от обстоятельств, применять одну из трех стратегий повышения продаж продукции:

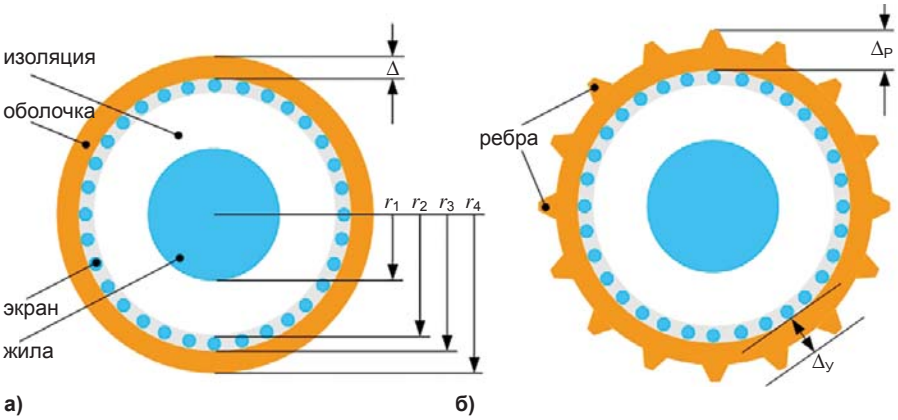
– продавать кабель с ребристой оболочкой дороже обычного (несмотря на отсутствие повышенных затрат на материалы и изготовление, которые несут конкуренты, производящие кабель с полноценной понастоящему усиленной надежной оболочкой);
– продавать кабель с ребристой оболочкой по цене обычного кабеля, но привлекать покупателей, предлагая им, в отличие от конкурентов, подарок в виде «усиленной» оболочки;
– закладывать в проекты кабели с ребристой оболочкой, тем самым отсеивая остальные заводы, которые таких кабелей не производят.

Чтобы технически обосновать преимущества ребристой оболочки, утверждалось, что такие ребра выступают некими направляющими (ребрами скольжения), способствуя снижению воздействий на основную оболочку кабеля, а также снижают силу трения при тяжении кабеля вдоль трассы за счет уменьшен-



а) б) в) г)

Рис. 3. Примеры повреждений оболочки:
а, б) обычная оболочка; в, г) ребристая оболочка



а) б)

Рис. 4. Конструкция однофазного кабеля с разными типами оболочки:
а) обычная оболочка; б) ребристая оболочка

ной площади трущихся друг относительно друга поверхностей. Иначе говоря, кабель с обычной оболочкой, которая была покрыта отдельными ребрами, не только выдавался за кабель с полноценной усиленной оболочкой, но при этом еще и утверждалось, что ребристая оболочка особенно хороша в сравнении с любой гладкой. Рассмотрим далее опыт монтажа и эксплуатации таких кабелей.

Усилия тяжения. Усилия тяжения кабеля, возникающие при его протяжке по трассе, определяются известной формулой:

$$F_T = \mu \cdot m \cdot g, \qquad (3)$$

где F_T — усиление тяжения, Н; μ — коэффициент трения оболочки кабеля, о.е.; m — масса протягиваемого кабеля, кг; g=9,81 — ускорение свободного падения, м/с^2.

Коэффициент трения μ зависит от пары соприкасающихся материалов и от степени их шероховатости. Ребра, сделанные точно из такого же материала, как и сама оболочка, и расположенные вдоль кабеля, никак не способны поменять μ. Также появление мелких ребер не влияет на массу кабеля m. Таким образом, формула (3) демонстрирует, что ребра не изменяют μ и m кабеля и не влияют на усилия F_T его протяжки — это было подтверждено опытом применения кабелей с ребрами и совместно с целым рядом других упомянутых далее обстоятельств свело к минимуму использование ребристой оболочки на практике.

Кольцевая жесткость. Может показаться, что ребра поверх наружной оболочки выступают как фактор, влияющий на жесткость кабеля и способствующий ее повышению. Давайте представим, что наружная оболочка кабеля является своеобразной трубой, в которую помещены жила кабеля вместе с изоляцией и металлическим экраном. Способность трубы выдерживать давление грунта и транспорта согласно стандарту [4] характеризуется таким параметром, как кольцевая жесткость SN. Поэтому далее, опираясь на [4], оценим SN оболочки кабеля.

Для полимерных труб, применяемых для прокладки кабелей, кольцевая жесткость SN может быть рассчитана согласно выражению:

$$SN = \frac{E}{12} \cdot \left(\frac{e}{D-e}\right)^3, \qquad (4)$$

где E — модуль упругости материала трубы при сжатии (E=950·10^3 кПа); D — наружный диаметр основного тела трубы (не зависит от ребер), мм; e — толщина стенки основного тела трубы (не зависит от ребер), мм.

Современные материалы кабельных оболочек и кабельных труб близки друг другу и обладают схожими E. Поэтому для оценки SN оболочки кабеля достаточно подставить в формулу (4) диаметр кабеля d (вместо диаметра трубы D) и толщину оболочки кабеля Δ (вместо толщины стенки трубы e). Результаты даны в таблице 2.

Отдельные продольные ребра не позволяют говорить о повышении диаметра d или толщины Δ, и поэтому, согласно данным таблицы 2, появление ребер не изменило SN оболочки кабеля. Реального повышения SN оболочки кабеля можно добиться только за счет увеличения толщины оболочки на всей боковой поверхности кабеля, а вовсе не в отдельных ее местах (там, где есть ребра), то есть путем применения полноценной усиленной оболочки толщиной $\Delta_У$.

Табл. 2. Оценка кольцевой жесткости SN оболочки кабеля

Наружный диаметр кабеля	SN (кН/м^2) для разных оболочек кабеля		
	Обычная, Δ = 4 мм	Ребристая, $\Delta_Р$ = 6 мм	Усиленная, $\Delta_У$ = 6 мм
d = 40 мм	108	108	435
d = 60 мм	29	29	108
d = 80 мм	12	12	42
d = 100 мм	6	6	21

Опыт монтажа и эксплуатации. С момента появления ребристой оболочки прошли многие годы, и ряд опрошенных монтажных организаций подтвердил — такой кабель не только не решил задачу усиления оболочки и упрощения монтажа кабеля, но даже наоборот осложнил монтажные работы и ремонт кабеля в эксплуатации. В частности, накопленный опыт показал:

- снижения усилий тяжения F_T при прокладке кабеля с ребрами не зафиксировано (такие усилия согласно (2) не зависят от площади трущихся поверхностей, а зависят только от массы кабеля m, которая примерно одинакова вне зависимости от наличия ребер);
- жесткость оболочки не изменилась (столбцы Δ и $\Delta_Р$, приведенные в таблице 2) и оставалась значительно ниже, чем у полноценной усиленной оболочки (столбец $\Delta_У$);
- число повреждений оболочки не снизилось (потому что толщина ребристой оболочки кабеля на значительной части боковой поверхности кабеля ничем не отличается от толщины обычной оболочки Δ, как показано на рисунке 4б);
- толщина ребристой оболочки кабеля в промежутках между ребрами в ряде случаев могла оказаться даже меньше толщины обычной оболочки (если завод делал вариант $\Delta_Р$=Δ вместо варианта $\Delta_Р$=$\Delta_У$, показанного на рисунке 4б) — это не только не позволяло сравнивать ребристую оболочку с усиленной, но даже с обычной «тонкой» оболочкой;
- капы, которыми следует герметизировать торцы кабеля на время его транспортировки и хранения, из-за наличия ребер на поверхности кабеля не могли обеспечить требуемой герметичности;
- термоусадка, которой герметизируют оболочку при ремонте кабеля или при монтаже кабельных муфт, из-за наличия ребер на поверхности кабеля не способна обеспечить требуемой герметичности;

– перед установкой кап, термоусадок и кабельных муфт все ребра оболочки приходится срезать вручную, после чего зачищать оболочку, что является опасной (для кабеля и человека) и тяжелой работой;
– кабельным хомутам сложнее зафиксировать кабель с ребристой оболочкой (фиксация важна на вертикальных участках трассы, например, вблизи от концевых муфт).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изоляция и оболочка — это важнейшие элементы кабелей 6–500 кВ, и непонимание их особенностей может привести к серьезным ошибкам и экономическому ущербу.

1. Емкость изоляции кабелей с СПЭ-изоляцией может быть в разы больше, чем у старых кабелей с бумажно-масляной изоляцией.
2. Емкость изоляции рекомендуется брать по результатам заводских измерений, которые указаны в кабельных каталогах в зависимости от сечения жилы и напряжения кабеля. В случае использования расчетной формулы (2) следует обращать внимание на то, что она дает значения емкости, которые на 15–20% меньше реально измеренных значений.
3. Кабель с обычной оболочкой, покрытой продольными ребрами, не является кабелем с усиленной оболочкой. Ребра не только не повышают прочности кабеля и не упрощают процесс протяжки кабеля по трассе, но, напротив, усложняют работу с кабелем, мешают его монтажу и ремонту.
4. При необходимости обеспечить повышенную механическую защиту оболочки кабеля следует или равномерно увеличить толщину оболочки по всей ее боковой поверхности (усиленная оболочка, индекс «у»), или же размещать кабели в полимерных трубах.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Изд-во Политех-ПРЕСС, 2021. 688 с. / Dmitriev M.V. High voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech-PRESS, 2021, 688 p.
2. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования / Company standard STO 56947007-29.060.20.071-2011. 110-500 kV power cable lines. Construction conditions. Norms and requirements. URL: https://xlpe.org/documents/standards/CTO_56947007-29.060.20.071-2011.pdf
3. CIGRE TB-889 «Installation of underground HV cable systems». Technical brochure, 2023.
4. ГОСТ Р 70751-2023. Трубы термостойкие полимерные для прокладки силовых кабелей напряжением от 1 до 500 кВ. Общие технические условия / State standard GOST R 70751-2023. Thermoresistant plastic pipes for power cable installation for voltages from 1 up to 500 kV. General specifications. URL: https://docs.cntd.ru/document/1301694696.

