

Введение В настоящее время на смену традиционным маслонаполненным кабелям и кабелям с бумажной пропитанной приходят кабельные линии нового поколения. На современном этапе в ближайшей перспективе к таким ним можно отнести кабели с пластмассовой изоляцией, в которых в качестве изоляции используется сшитый полиэтилен. Применение в кабельной технике изоляционных материалов с улучшенными диэлектрическими и тепловыми свойствами позволяет существенно повысить пропускную способность кабельных линий. Мировые тенденции развития кабельных распределительных сетей среднего напряжения в течение последних десятилетий направлены на внедрение кабелей с теплостойкой экструдированной изоляцией (сшитый полиэтилен и этилен-пропиленовая резина) и замену ими кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. В настоящее время в промышленно развитых странах Европы и Америки практически 100% рынка силовых кабелей занимают кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Проблемы использования маслонаполненных кабелей 110-220 кВ Рассмотрим основные направления наиболее технически и экономически приемлемых решений для выполнений глубоких вводов промышленных предприятий 110-220 кВ. Анализ опыта эксплуатации маслонаполненных кабелей показал, что повышение их пропускной способности возможно при максимальном увеличении сечений жил и уровней номинальных напряжений. Однако, рост номинального напряжения приводит к усложнению тепловых режимов эксплуатации из-за увеличения толщины изоляционного слоя и, следовательно, диэлектрических и активных потерь, а так же потерь в металлических оболочках. Максимальная температура на поверхности жилы по условиям эксплуатации бумажно-масляной изоляции не должна превышать 75°C, а на поверхности кабеля – 40...50°C, чтобы избежать отрицательного экологического воздействия, а именно, высыхания почвы. К тому же происходит резкое увеличение ее теплового сопротивления. Сегодня существуют следующие объективные факторы, препятствующие дальнейшему использованию маслонаполненных высоковольтных кабелей: - сложность конструкции и технологии изготовления кабеля, его монтажа и большие эксплуатационные затраты; - существенные диэлектрические потери в изоляции и низкая пропускная способность из-за ограничений температурного режима; - высокие требования к квалификации монтажного и эксплуатационного персонала; - возможность разгерметизации маслонаполненных кабелей при проведении монтажных и аварийно-восстановительных работ, что приводит большим потерям масла и экологическому загрязнению окружающей среды [1]. В последнее время в российской электроэнергетике увеличивается промышленное производство и применение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Это обусловлено усовершенствованием технологии изготовления и конструкции кабелей, связанные с повышением их эксплуатационной надежности. Массовое внедрение в электроэнергетику кабелей нового

поколения может быть осуществлено при учете трех взаимосвязанных и противоречащих друг другу факторов: - увеличение предела передаваемой мощности; - повышения эксплуатационной надежности; - снижения стоимости изготовления и монтажа, а также эксплуатационных издержек. - экологическая и электромагнитная совместимость кабелей с техно- и биосферой. Однако имеются объективные трудности, связанные с массовым применением кабелей с пластмассовой изоляцией. Например, в маслонаполненных кабелях образующиеся локальные пустоты, не превышающие толщины бумаги, заполняются изолирующим маслом. В кабелях с изоляцией с СПЭ на стадии изготовления могут возникать воздушные микрополости, внутренние механические повреждения и различные включения, что приводит к снижению электрической прочности и сокращению срока службы изоляции. Кроме этого, при проектировании электроснабжения промышленных предприятий, технологический цикл которых связан с появлением в напряжении на шинах их распределительных устройств (РУ) высокочастотных составляющих напряжений и токов, необходимо предусматривать специальные меры, препятствующие воздействию этих гармонических составляющих на электрооборудование питающей сети, а именно кабельные сети. Наличие высокочастотных токов приводит к существенным негативным последствиям. Происходит перегрев и ускоренное тепловое старение изоляции СПЭ [2] Поэтому для грамотного анализа электромагнитных процессов, сопровождающих эксплуатацию электрооборудования, а, следовательно, и для предотвращения технологических нарушений в питающей сети необходимо рассматривать как аномальные процессы, происходящие в питающих сетях, так и иметь информацию о гармоническом составе напряжения на шинах главного распределительного устройства технологического объекта. Технология изготовления кабелей с изоляцией из СПЭ Рассмотрим подробнее технологию изготовления кабелей сшитым полиэтиленом. Термин «сшивка» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, больший диапазон рабочих температур [3]. Сшитый полиэтилен идеально подходит для изоляции высоковольтных кабелей. Используя современную технологию, процесс вулканизации (сшивки) полиэтиленовой изоляции производится химическим способом в среде нейтрального газа при давлении 8-9 атмосфер и температуре 285-400°C. В результате химической реакции изменяется молекулярная структура полиэтилена, и образуются новые межмолекулярные связи, что приводит к изменению электрических и механических свойств вещества. Необходимо подчеркнуть, что изоляция и электропроводящие экраны накладываются в процессе тройной экструзии, после чего происходит

одновременная сшивка всех трех слоев. Такая технология обеспечивает хорошую адгезию между экранами и изоляцией, а также отсутствие газовых включений в изоляции и на границе с экранами. При высокой температуре сшивка происходит равномерно по всей толщине изоляции, что невозможно обеспечить при использовании альтернативной силановой сшивки, которая не предусматривает применение высоких температур и давления. Выделяются четыре технологии производства РЕ-Х: - пероксидная (нагрев в присутствии пероксидов); - силановая (обработка влагой, в которую предварительно был имплантирован силан + катализатор); - электронная (бомбардировка электронами); - азотная. В европейских стандартах приняты обозначения соответственно, РЕ-Ха, РЕ-Хb, РЕ-Хс, РЕ-Хd. Сшитый полиэтилен характеризуется такими параметрами как: - доля сшивки; - доля материала в форме кристаллита; - напряжение на разрыв. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между молекулами полиэтилена, в основном и определяют основные характеристики нового материала такие как, высокие диэлектрические свойства, более широкий диапазон рабочих температур и повышенные механические характеристики. Сравнительная характеристика высоковольтных кабелей СПЭ кабель может заменить кабель с бумажной изоляцией практически во всех случаях. Эти кабели имеют многочисленные достоинства, такие как: высокая пропускная способность; - низкий вес, меньший диаметр и радиус изгиба до 7,5 наружных диаметров; низкая повреждаемость; - полиэтиленовая изоляция обладает малой плотностью, малыми значениями относительной диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь; - возможность прокладки на сложных трассах; - монтаж без использования специального оборудования при температуре до -10°C ; - значительное снижение себестоимости прокладки. Применение данных кабелей по сравнению с традиционными в поливинилхлоридной изоляции позволяет: - использовать жилы меньшего сечения для передачи равного потока мощности; - увеличить длительно допустимую температуру нагрева жил кабелей до 90°C ; - увеличить длительно допустимую температуру нагрева жил кабелей при коротком замыкании до 250°C . Однако основное преимущество СПЭ кабелей перед бумажными – это низкая повреждаемость. К сожалению, из-за небольшого опыта эксплуатации, отсутствует достоверная информация о количестве повреждений кабелей в России. По зарубежным же источникам, процент электрических пробоев СПЭ кабелей на 2–3 порядка ниже, чем на кабелях с бумажной изоляцией. В основном кабели выпускаются в одножильном исполнении, а применение различных типов оболочек и возможность герметизации позволяет использовать кабель как для прокладки в земле, так и для кабельных сооружений, в том числе при групповой прокладке. Переход от кабелей с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ) к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), связан со всё возрастающими требованиями

эксплуатирующих организаций к техническим параметрам кабелей. В этом отношении преимущества кабелей из СПЭ очевидны. Несмотря на все эти преимущества, на этапе внедрения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют высокие капиталовложения. Исходя из этого, необходимо выделить те области, где их применение наиболее целесообразно. Для этого проведем короткое технико-экономическое сравнение традиционных и СПЭ кабелей. К сожалению из-за различий в затратах на ремонты и содержание кабельных линий для конкретных предприятий, разницу в общих эксплуатационных затратах сравнить достаточно сложно. Поэтому произведем сравнение кабелей по первичным вложениям и по техническим характеристикам. Для корректного сравнения возьмем кабели с одинаковой пропускной способностью – бумажный АСБ 3х240 10 кВ и три однофазных кабеля АПвП 1х185/25-10 кВ. Сравнительные характеристики кабелей приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики кабелей 10 кВ

Параметры сравнения	Кабель с бумажной изоляцией АСБ 3х240-10 кВ	Одножильный кабель с СПЭ изоляцией 3хАПвП 1х185/25-10 кВ
Сечение жил, кв. мм	240	185
Ток нагрузки при прокладке в земле, А	355	375/360
Максимально допустимый 1-сек ток КЗ, А	20,56	17,5
Наружный диаметр, мм	62	36
Строительная длина, м	500-600 до 1400 (бар. №22)	
Минимальный радиус изгиба, м	1,64	0,54
Масса, кг/м	7050	1370 (4110)
Допустимая разница уровней, м	15	не ограничена
Сравнительная стоимость, %	100	160

Из приведенных данных видно, что при одинаковой пропускной способности и лучших остальных параметрах стоимость СПЭ кабеля примерно на 60–70% выше. Это объясняется более дорогими материалами и технологией изготовления, большим расходом материалов при радиальной конструкции кабеля. Но с другой стороны, такая конструкция обеспечивает равномерное распределение электрического поля и, как следствие, увеличение электрической прочности. Если необходимо иметь высокую пропускную способность кабельных линий, то результаты сравнения будут следующие, например, два параллельных одножильных кабеля АСБ 1х240 10 кВ и кабель с СПЭ изоляцией 3хАПвП 1х500/35. Данные представим в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнительные характеристики кабелей

Параметры сравнения	Кабель с бумажной изоляцией 2хАСБ 3х240	Одножильный кабель с СПЭ изоляцией 3хАПвП 1х500/35
Сечение жил, кв.мм	240	500
Ток нагрузки при прокладке в земле, А	639	650/610
Максимально допустимый 1-сек ток КЗ, А	20,56	47
Наружный диаметр, мм	62	46
Строительная длина, м	500-600 до 850 (бар. №22)	
Минимальный радиус изгиба, м	1,64	0,74
Масса, кг/м	2х7050	2570 (7710)
Допустимая разница уровней, м	15	не ограничена
Сравнительная стоимость, %	100	115-120

Рассмотрим данные для кабелей 35 кВ. Это объясняется тем, что на этот класс напряжений применение конструкции с секторными жилами невозможно. Поэтому бумажные кабели изготавливаются с отдельно освинцованными жилами, что влечет за собой

значительное удорожание по сравнению с кабелями 10 кВ. Стоимости кабелей с бумажной и полиэтиленовой изоляцией одинакового сечения приблизительно равны. Однако, как видно из таблицы 3, полиэтиленовый кабель имеет нагрузочную способность на 40% выше по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией [4]. Исходя из приведенного сравнения можно сделать следующие выводы о наиболее целесообразном и эффективном применении кабелей с СПЭ. Во-первых, исходя из стоимости, наиболее экономично применять кабели с изоляцией из СПЭ на напряжении 15,20,35 кВ, несмотря на то, что первоначальные капитальные затраты на кабель с бумажно-масляной изоляцией будут ниже. Таблица 3 - Сравнительные характеристики кабелей 35 кВ

Параметры сравнения		Кабель с бумажной изоляцией АОСБ 3х150-35 кВ	Одножильный кабель с СПЭ изоляцией 3хАПвП 1х150/25-35 кВ
Сечение жил, кв. мм	150	150	150
Ток нагрузки при прокладке в земле, А	250	В плоскости/треугольником 350/330	Максимально допустимый 1-сек ток КЗ, А 7,58 14,2
Строительная длина, м	300 до 1000(бар.№22)	Минимальный радиус изгиба, м 1,45 0,67	Масса, кг/м 6400 1805 (5415)
Допустимая разница уровней, м	15	не ограничена	Сравнительная стоимость, % 100 100-105

Во-вторых, при необходимости передачи большой мощности, например передача мощности от генератора на шины распределительного устройства тепловой электростанции. В качестве альтернативы рассматривались сооружение медного шинпровода, прокладка 8-12 бумажных кабелей или нескольких кабелей с СПЭ изоляцией сечением 630 или 800 кв.мм. Как показывает практика, применение полиэтиленовых кабелей позволяет достичь экономии не только за счет кабельных линий, но и за счет уменьшения затрат на строительную часть. При обслуживании затраты на содержание полиэтиленового кабеля минимальны. В-третьих, СПЭ кабель рекомендуется использовать, когда кабель с бумажной изоляцией максимального сечения не проходит по пропускной способности. Так как пропускная способность полиэтиленового кабеля выше и максимальное сечение жилы может достигать 800 мм² целесообразней использовать один кабель большого сечения. Это касается и случаев прокладки параллельных кабелей, когда взамен двух параллельных кабелей 240 мм². целесообразней проложить один кабель сечением 500 мм² (см. данные табл. 2). В-четвертых, если на трассе прокладки имеется большая разница уровней. При использовании бумажно-масляных кабелей происходит осушение изоляции кабелей в высоких точках, что может повлечь за собой пробой. При этом даже небольшая разность уровней прокладки может стать причиной многочисленных повреждений на КЛ. В-пятых, использование кабелей с СПЭ изоляцией необходимо при особых требованиях к надежности электроснабжения, так как повреждаемость СПЭ кабелей чрезвычайно мала. И, наконец, при наличии требований по нераспространению горения, рекомендуется применять кабели с оболочкой из ПВХ пластиката пониженной горючести, прошедший соответствующие

испытания и имеющий сертификат на соответствие нормам пожарной безопасности [5]. Таким образом, на основании выше изложенного следует, что применение в кабельной технике изоляционных материалов с улучшенными диэлектрическими и тепловыми свойствами позволяет существенно повысить пропускную способность кабельных линий и за счет этого увеличить надежность электроснабжения потребителей.