

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 621.315.21:621.3.048.8

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Гунина Милана Геннадьевна, к.т.н., доцент, Кыргызский технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: elmech@mail.ru; mg_gunina@mail.ru; orcid.org 0000-0002-4142-6556

Попова Инга Эдуардовна, старший преподаватель, Кыргызский технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: inga-kiv@mail.ru; orcid.org 0000-0002-8280-196

Телетешов Арслан Кенешпекович, магистр группы ЭЭМ-4-19 (ЭМ), Кыргызский технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66, e-mail: arslanto63@mail.ru; orcid.org 0000-0003-0560-8771

Аннотация. Кабели и кабельные линии (КЛ) широко применяются в системах электроснабжения (СЭС) как основной способ передачи и распределения электроэнергии (ЭЭ). Этот способ распределения ЭЭ особенно важно в СЭС городского электроснабжения, так как применение воздушных линий ограничены. В сетях выше 1000В в настоящее время применяются различные кабели, которые отличаются по типу, конструкции, способу применения. В нашей республике в системах промышленного, городского и сельскохозяйственного электроснабжения применяются КЛ напряжением 35 кВ. КЛ 500 кВ применяются в ТГЭС и успешно эксплуатируются. В настоящее время на номинальное напряжение выше 35 кВ выпускаются и эксплуатируются кабели 110, 220, 330, 440 и 550 кВ. Чем выше номинальное напряжение, тем сложнее его конструкция. В процессе эксплуатации элементы КЛ подвергаются различным воздействиям, в результате чего изменяются физико-химические свойства элементов кабеля. В настоящей работе приводится анализ конструкции силовых электрических кабелей и проанализированы основные факторы, влияющие на них физико-технические свойства.

Ключевые слова: диагностика, кабель, кабельная линия, электроснабжение, элементы кабеля, изоляция, бронь, защитный покров, оболочка, токопроводящая жила, диэлектрические потери, сшитый полиэтилен, пропитанная бумага, гуттаперчевая изоляция, прокладка, потери, нагрев.

FACTORS INFLUENCING PERFORMANCE PROPERTIES ELECTRIC CABLES

Gunina Milana Gennadievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyrgyz Technical University. I. Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave., 66, e-mail: elmech@mail.ru; mg_gunina@mail.ru

Popova Inga Eduardovna, Senior Lecturer, Kyrgyz Technical University. I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave., 66, e-mail: inga-kiv@mail.ru; orcid.org 0000-0002-8280-196

Teleteshev Arslan Keneshpekovich, master of the group EEM-4-19 (EM), Kyrgyz Technical University named after I. Razzakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave., 66, e-mail:

Abstract. Cables and cable lines (CL) are widely used in power supply systems (SES) as the main method of transmission and distribution of electricity (EE). This method of EE distribution is

especially important in the SES of urban power supply, since the use of overhead lines is limited. In networks above 1000V, various cables are currently used, which differ in type, design, method of application. In our republic, 35 kV cable lines are used in industrial, urban and agricultural power supply systems. CL 500 kV are used in TGES and are successfully operated. At present, 110, 220, 330, 440 and 550 kV cables are produced and operated for rated voltages above 35 kV. The higher the rated voltage, the more complex its design. During operation, cable line elements are exposed to various influences, as a result of which the physical and chemical properties of cable elements change. This paper analyzes the design of power electrical cables and analyzes the main factors affecting their physical and technical properties.

Keywords: diagnostics, cable, cable line, power supply, cable elements, insulation, armor, protective cover, sheath, conductive core, dielectric losses, cross-linked polyethylene, impregnated paper, gutta-percha insulation, gasket, losses, heating.

Введение

Силовые кабельные линии (КЛ) предназначены для передачи и распределения электрической энергии между производителем ЭЭ и ее потребителем. Первые подземные КЛ с гуттаперчевой изоляцией на рабочее напряжение 220 кВ были изготовлены в Европе в 1880 г. [5]. Пропитанную бумажную изоляцию в производстве силовых кабелей начали применять в 1889-1890 гг., которая позволила поднять рабочее напряжение с 2 до 10 кВ.

Первые конструкции маслонаполненных кабелей были предложены итальянским инженером Л. Эмануэли в 1918 году, первая экспериментальная линия была смонтирована в 1928 году. Она имела длину всего 600 м [5]. В СССР маслонаполненный кабель длиной около 1,1 км был разработан в Ленинграде заводом «Севкабель» в 1913 году.

Для рабочих напряжений 110 и 220 кВ были усовершенствованы конструкции маслонаполненных кабелей с каналом для масла внутри токопроводящей жилы. Дальнейшие научно-конструкторские работы привели к созданию кабельных линий 220, 330 и 500 кВ.

В Кыргызстане успешно эксплуатируется маслонаполненная КЛ 500 кВ на Токтогульской ГЭС.

С увеличением класса номинальных напряжений усложняются конструкции КЛ, т.е., для нормальной эксплуатации применяются различные изоляционные, токопроводящие и дополнительные материалы. Особенно, конструкции влияют на стоимостные показатели, чем выше номинальное напряжение, тем больше будут затраты. Поэтому, чтобы КЛ не вышла из строя в свой естественный срок службы, необходимо контролировать параметры КЛ, такие как: электрические, тепловые и физико-химические. Это достигается применением диагностики. Диагностика параметров позволяет своевременно обнаружить дефекты, возникающие в КЛ. На возникновение дефектов влияют различные факторы: условия окружающей среды, правила эксплуатации, электрические факторы. В этой статье излагаются основания применения диагностики КЛ.

1. Конструкционная особенность кабелей напряжением выше 35 кВ

Эксплуатационные свойства кабелей однозначно определяются их конструкцией. В свою очередь, именно особенности конструктивного исполнения кабеля должны учитываться при исследовании факторов, определяющих их надежность при эксплуатации. Поэтому проведем анализ основных конструктивных исполнений кабелей.

1.1. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена

Среди пластмассовых изолирующих материалов наиболее предпочтительным является сшитый полиэтилен (СПЭ) ввиду его хороших диэлектрических свойств. Кабели с

СПЭ активно замещают кабели с бумажной изоляцией. изоляцией: относительную диэлектрическую проницаемость при $T=20^{\circ}\text{C}$ (2,4 и 4,0) и коэффициент диэлектрических потерь при $T=20^{\circ}\text{C}$ (0,001 и 0,008). Конструкция такого кабеля приведена на рис. 1.

Практика применения показала, что повреждаемость кабеля с СПЭ в 3...50 раз ниже, чем кабеля с бумажной изоляцией [6]. Диагностированию подлежат следующие элементы кабеля: жила, жильная изоляция, поясная изоляция, свинцовая или алюминиевая оболочка.

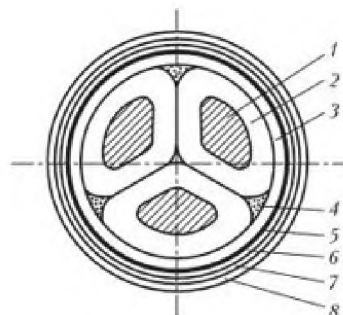


Рис. 1. Трехжильный кабель с поясной изоляцией
1 – токопроводящая жила; 2 – жильная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – межфазные заполнения; 5 – свинцовая или алюминиевая оболочка; 6 – подушка под броню; 7 – броня из двух стальных лент; 8 – наружный защитный покров.

1.2. Кабели с радиальным электрическим полем

В отличие от описанных выше кабелей с поясной изоляцией, в этих кабелях поверх изоляции каждой жилы накладываются экран или экран и металлическая оболочка, благодаря чему, силовые линии электрического поля имеют радиальное направление.

В таких кабелях предусматривается применение уплотненных секторных жил, чем достигается значительная экономия свинца или алюминия. Наличие двух-трех слоев из полупроводящей бумаги по жиле и по бумажной изоляции каждой жилы повышаются электрические свойства изоляции.

Трехжильные кабели 20-35 кВ с вязкой пропиткой изготавливаются с отдельно освинцованными жилами (рис. 2,3). Наличие экранов из полупроводящих бумаг по токопроводящей жиле и под свинцовой оболочкой позволяет снизить толщину изоляции, это уменьшает вес кабеля. Диагностированию подлежат следующие элементы: жила, экран из полупроводящей бумаги, бумажная изоляция, свинцовая или алюминиевая оболочка.

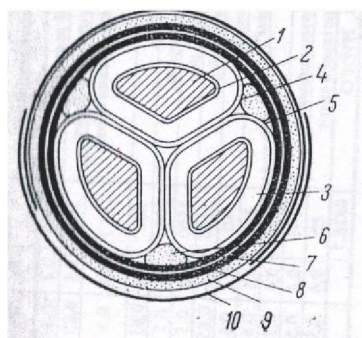


Рис. 2. Кабель с экранированными секторными жилами

1 – токопроводящая жила; 2 – экран на полупроводящей бумаге; 3 – бумажная изоляция; 4 – экран из полупроводящей бумаги; 5 – перфорированная медная лента; 6 – межфазные заполнения; 7 – металлическая лента поверх трех изолированных жил; 8 – свинцовая или алюминиевая оболочка; 9 – подушка под броню; 10 – броня из двух стальных лент и наружный защитный покров.

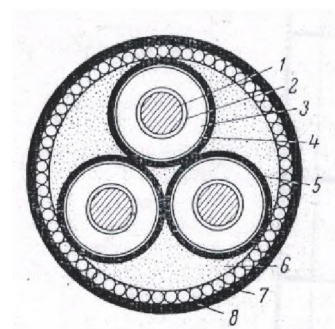


Рис. 3. Трёхжильный кабель с отдельно освинцованными жилами для подводной прокладки

1 – токопроводящая жила; 2 – экран из полупроводящей бумаги; 3 – бумажная изоляция; 4 – экран из полупроводящей бумаги; 5 – свинцовая оболочка; 6 – джутовое заполнение; 7 – проволоочная броня; 8 – наружный покров.

1.3. Кабели напряжением 110-500 кВ

1.3.1. Маслонаполненные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена

Маслонаполненные кабели (МНК) с медной жилой, с изоляцией из пропитанной бумаги, в свинцовой или алюминиевой оболочке предназначены для трехфазных систем с заземленной нейтралью. МНК подразделяют на кабели высокого и низкого давления. На рис.4 представлен МНК низкого давления МНСА-1 [6,13]. Диагностированию подлежат следующие элементы: масло, жилы, бумажная изоляция, экран из электропроводящей бумаги, оболочка, давление масла.

На рис. 5 показан МНК высокого давления. Диагностированию подлежат следующие элементы: масло, жилы, давление масла.

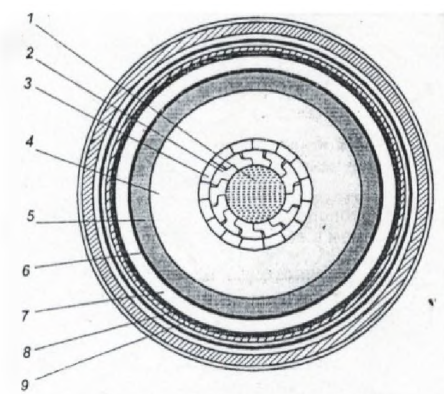


Рис. 4. Маслонаполненный кабель низкого давления МНСА-1:

1 – канал для циркуляции масла; 2 – Z-образные проволоки токопроводящей жилы; 3 – сегментные проволоки жилы; 4 – изоляция из бумаги толщиной 3 мм; 5 – изоляция из бумаги толщиной 0,12 мм; 6 – экран из электропроводящей бумаги; 7 – свинцовая оболочка; 8 – упрочняющие покровы; 9 – защитные покровы

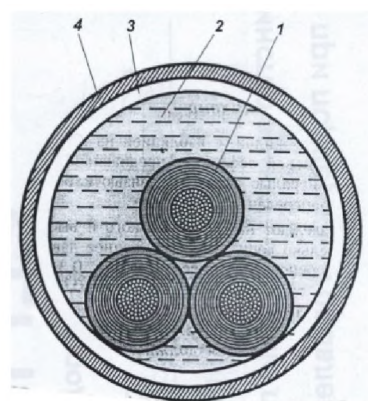


Рис. 5. Маслонаполненный кабель высокого давления в стальном трубопроводе МВДТ:

1 – одножильный кабель; 2 – масло С-220; 3 – стальной трубопровод; 4 – антикоррозийный покров

1.3.2. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена изготавливаются на напряжение до 500 кВт, их пропускная способность выше, чем у кабелей с бумажной изоляцией. Диагностированию подлежат следующие элементы: жила, изоляция, оболочка.

1.3.3. Кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 110 и 220 кВ

Приведем еще один пример конструкции силового кабеля (рис. 6). Эти кабели выпускаются на напряжение 110 и 220 кВ и изготавливаются с изоляцией из бумажных лент различной плотности, пропитанных высоковольтным нефтяным и синтетическим маслом малой вязкости. Маслопроводящий канал кабелей через специальную муфту соединяется с баллоном давления, давление которого может достигать 0.5 МПа.

Диагностированию подлежат следующие элементы: токопроводящая жила, экран из электропроводящей бумаги, изоляция, оболочка.

Все вышеизложенные конструкции кабелей и их диагностирование влияет на срок службы КЛ и показатели надежной работы, т. е. качество ЭЭ.

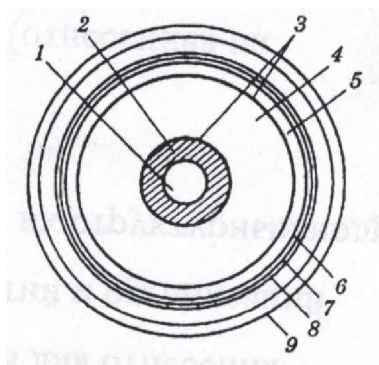


Рис. 6. Кабель с бумажной пропитанной изоляцией (маслонаполненный) на напряжение 110 и 220 кВ:

1 – маслопроводящий канал; 2 – полая токопроводящая жила; 3 – экран из двух-трех лент полупроводящей бумаги; 4 – изоляция; 5 – металлическая оболочка; 6 – подушка из поливинилхлоридных лент; 7 – медные усиливающие ленты; 8 – броня; 9 – защитные покровы.

2. Факторы, влияющие на химико-физические свойства элементов кабелей

Факторы, которые влияют на химико-физические свойства (характеристики) элементов кабелей в процессе эксплуатации изменяют их нормативные параметры. В основном, эти параметры снижаются, т.е. изоляционные свойства изоляционных материалов изменяются, поэтому ухудшаются их диэлектрические свойства.

Эти факторы условно делятся на два вида: внешние и внутренние. Внешние факторы – это воздействие окружающей среды: дождь, ветер, влажность, кислотность, снег, солнечные лучи и т.д. Эти факторы, в зависимости от условий прокладки, воздействуют на нарушение покровов – вызывают коррозию.

Глубина проникновения коррозии (м/год; мм/год) определяется по формуле:

$$\Pi = M/\delta \quad (1)$$

где M – потеря массы ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$); δ – плотность металла, $\text{кг}/\text{м}^3$.

После сильного коррозирования коррозия переходит в металлическую оболочку кабеля (алюминий, свинец). В результате может возникнуть короткое замыкание. Способы защиты от коррозии различные и указаны в [1-4].

Коррозия, естественно, приводит к изменению электрического сопротивления металлического покрытия, поэтому, для диагностики рекомендуются периодические измерения электрического сопротивления коррозионно-опасных участков.

Внутренний фактор – это нагрев токопроводящей жилы. Тепло, выделяемое жилой, передается элементам изоляции. Это первый фактор. Вторым фактором – глубина проникновения электромагнитных волн. Допустимые токовые нагрузки для кабелей, проложенных в земле или воздухе, определяются в соответствии с уравнением теплового баланса кабельной линии [8] для изоляции кабеля из сшитого полипропилена:

$$\Delta\tau = (I_d^2 R + 0.5W_d)T_1 + [I_d^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] \\ \text{и } [I_d^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \cdot [T_3 + T_4] \quad (2)$$

где I_d – величина допустимого тока токопроводящей жилы, А; $\Delta\tau = \tau_m - \tau_c$ – допустимое превышение температуры токопроводящей жилы (ТПЖ) над температурой окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; τ_m – максимальная допустимая температура ТПЖ, $^{\circ}\text{C}$; R – омическое сопротивление, $\text{Ом}/\text{м}$; W_d – потери в диэлектрике на единицу длины, $\text{Вт}/\text{м}$; T_1 – тепловое сопротивление изоляции между ТПЖ и оболочкой, $\text{К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$; T_2 – тепловое сопротивление подушки между оболочкой и броней в единицу длины, $\text{К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$, если у кабеля брони нет, то $T_2=0$; T_3 – тепловое сопротивление наружного защитного покрытия кабеля на единицу длины, $\text{К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$; T_4 – тепловое сопротивление между наружной поверхностью кабеля

и окружающей средой, К·м/Вт; n – числонагрузки жил кабеля; λ_1 – отношение потерь в металлической оболочке и общим потерям во всех жилах кабеля; λ_2 – отношение потерь в броне и общим потерям во всех жилах кабеля.

Потери в одной жиле:

$$W_{\text{тп}} = I^2 R, \text{ Вт/м} \quad (3)$$

$$W_{\text{тд}} = I_{\text{д}}^2 R, \text{ Вт/м} \quad (3a)$$

где индекс д – отражает допустимое значение величины

Отношение потерь в металлической оболочке:

$$\lambda_1 = W_o / n \cdot W_c \quad (4)$$

$$W_o = \lambda_1 \cdot n \cdot W_c \quad (4a)$$

Отношение потерь λ_2 в броне, W_6

$$\lambda_2 = W_6 / n \cdot W_c \quad (5)$$

$$W_6 = \lambda_2 \cdot n \cdot W_c \quad (5a)$$

Вторым фактором, приводящим к нагреву элементов КЛ – это глубина проникновения электромагнитных волн (δ), δ – это расстояние от наружной поверхности во внутреннюю часть проводника, на котором амплитуда напряженности электромагнитного поля, как и пропорциональное ей значение плотности тока уменьшается:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_o \cdot \sigma}} \quad (6)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость проводника, о. е.; $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Г/м; σ – удельная электропроводность, С_м/м.

Диэлектрические потери в изоляции кабеля, W_d , Вт/м:

$$W_d = \omega \cdot C \cdot \vartheta_o^2 \cdot \text{tg} \delta \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi f$; C – емкость изоляции, Ф/м; ϑ_o – фазное напряжение, В; $\text{tg} \delta$ – коэффициент диэлектрических потерь.

После этого анализа можно обоснованно выбрать способ диагностирования КЛ.

Заключение

1. Чтобы правильно выбрать параметры КЛ необходимо изучить конструкцию кабеля.
2. Установить, какие элементы кабеля подвергаются тепловому воздействию.
3. Выбрать количество и тип элементов кабеля, в которых изменение физико-химических свойств влияют на работу кабеля и сокращают срок его службы.
4. По возможности, объединить в одну группу несколько элементов, изменение параметров которых не снижают достоверность полученной информации.
5. Выбрать способы диагностирования КЛ так, чтобы затраты были минимальными.

Список литературы

1. Федров А.А. Основы электроснабжения промышленного предприятия. -М.: Энергия, 1972 г.
2. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. -М.: Инжинеринг, 2007 г.
3. Конюхова Е.А. Электроснабжение. -М.: Изд. дом МЭИ, 2014 г.
4. ПУЭ - Правила устройства электроустановок. -М.: Изд. НЦЭНАС, 2007 г.
5. Привезенцев В.А., Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. - М.: Энергия, 1970г.
6. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0.4-35 кВ и 110-500 кВ. -М.: Папирус, 2005 г.
7. СТО 56947007-29-060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110-500кВ. Условия создания. Нормы и требования.
8. ГОСТ МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчеты номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1.
9. ГОСТ МЭК 60287-2-100. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2-1.
10. Овчаренко А.С., Цейтлин М.С. Проектирование и строительство кабельных линий. - Киев: Будевельнин, 1984 г.
11. Электротехнический справочник. Электротехнические изделия и устройства. Под общей ред. профессоров МЭИ. Изд. Дом МЭИ, 2004 г т.2.
12. Невар Г.А. Вопросы развития электрических сетей с применением кабелей с полимерной изоляцией /Энергия и менеджмент, 2010 г. № 4, с. 16-20.
13. Рахимов К.Р. О снижении технических потерь электроэнергии в кыргызской энергосистеме/ К.Р. Рахимов// Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова. №3(55). 2020. С. 98-101