

АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Н. М. Ходанович, А. Ю. Шутов

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научный руководитель Д. И. Зализный

В процессе исследований была поставлена задача проанализировать нормы по перегреву кабелей в соответствии с требованиями ПТЭ, а также справедливость формулы для проверки сечения жилы кабеля на термическую стойкость.

Согласно ПТЭ кабельные линии (КЛ) с бумажной изоляцией, напряжением 6–10 кВ, несущие нагрузки меньше номинальных, могут кратковременно перегружаться в пределах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент предварительной нагрузки	Вид прокладки	Допустимая краткость перегрузки по отношению к номинальной в течение		
		0,5 ч	1 ч	3 ч
0,6	В земле	1,35	1,30	1,15
	В воздухе	1,25	1,15	1,10
	В трубах (в земле)	1,20	1,10	1,00
0,8	В земле	1,20	1,15	1,10
	В воздухе	1,15	1,10	1,05
	В трубах (в земле)	1,10	1,05	1,00

Аналогичная таблица существует и для случаев ликвидации аварии на КЛ напряжением до 10 кВ. Для КЛ, длительное время (более 15 лет) находящихся в эксплуатации, перегрузки должны быть понижены на 10 %. Перегрузка КЛ напряжением 20–35 кВ не допускается. Для КЛ с пластмассовой изоляцией нормативные данные в ПТЭ отсутствуют.

При проектировании систем электроснабжения осуществляют проверку кабелей на термическую стойкость к токам КЗ, в соответствии с известными формулами на основе термического импульса тока КЗ.

В реальных условиях эксплуатации на кабель воздействует значительное количество факторов: изменения тока нагрузки, температуры окружающей среды и т. д.

Современная вычислительная техника позволяет учесть все эти факторы путем анализа нагрузочной способности на основе математической модели тепловых процессов в кабеле.

В связи с этим была разработана математическая модель тепловых процессов, в которой были учтены факторы, влияющие на нагрев кабелей, а именно диэлектрические потери в изоляции, поверхностный эффект в жилах, потери в экране, способ заземления экрана кабеля.

Тепловые процессы в рассматриваемой модели можно описать системой дифференциальных уравнений (1).

Отметим, что θ_2 является температурой наиболее нагретой точки изоляции кабеля.

Диэлектрические потери P_2 и P_4 можно рассчитать, зная напряжение, приложенное к изоляции, рабочую частоту, емкость изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

Потери мощности в экране P_3 зависят от способа заземления экрана кабеля. Если экран заземлен с двух сторон, то по нему протекает значительный ток, сравнимый с током в жиле. Если экран заземлен с одной стороны, то ток через него приблизительно равен нулю. Зная действующее значение тока в экране, по аналогии с потерями в жиле можно рассчитать потери мощности в экране:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = P_4, \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_1 - \theta_5$ – соответственно температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции жилы, экрана, защитной оболочки и окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$); $C_1 - C_4$ – теплоемкости соответствующих однородных тел ($\text{Вт} \cdot \text{с}/^{\circ}\text{C}$); $R_1 - R_4$ – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$); $P_1 - P_4$ – потери активной мощности соответственно в токоведущей жиле, изоляции жилы, экране и защитной оболочке (Вт).

Поверхностный эффект (скин-эффект) проявляется в увеличении электрического сопротивления проводника на переменном токе по сравнению с сопротивлением на постоянном токе. Учесть это явление можно с помощью приближенных формул, которые приводятся в справочниках по физике.

Для расчета исходной системы дифференциальных уравнений с учетом факторов, влияющих на нагрев кабеля, воспользуемся одним из самых распространенных численных методов решения систем дифференциальных уравнений – методом Рунге-Кутты по алгоритму (2):

$$\begin{cases} K_{i,1}^j = \Delta t \left(\frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} \right); \\ K_{i,2}^j = \Delta t \left(\frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} + \frac{K_{i,1}^j}{2} \right); \\ K_{i,3}^j = \Delta t \left(\frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} + \frac{K_{i,2}^j}{2} \right); \\ K_{i,4}^j = \Delta t \left(\frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} + K_{i,3}^j \right); \\ \theta_i^j = \theta_i^{j-1} + \frac{1}{6} (K_{i,1}^j + 2 \cdot K_{i,2}^j + 2 \cdot K_{i,3}^j + K_{i,4}^j), \end{cases} \quad (2)$$

где $i \in [1, 4]$ – номер расчетной температуры; $R_0 = \infty$; $j \in [1, n]$ – номер итерации (n – количество итераций); Δt – шаг итерации по времени.

Исследования проводились в математическом пакете MathCad для кабелей с пластмассовой изоляцией напряжением 10 и 35 кВ различного сечения. Были рассмотрены наихудшие условия с точки зрения нагрева кабеля. А именно температура воздуха считалась постоянной и равной 20°C . Нагрузка моделировалась также неизменной. В процессе исследований ток нагрузки подбирался таким образом, чтобы температура наиболее нагретой точки изоляции жилы кабеля достигала критического значения, равного 90°C для кабелей с пластмассовой изоляцией. При этом производился расчет эквивалентной тепловой постоянной времени кабеля.

При исследованиях в режиме короткого замыкания подбирался ток КЗ таким образом, чтобы температура наиболее нагретой точки изоляции жилы кабеля достигала критического значения за время действия защиты, которое принималось равным 3 секундам. Полученное значение тока КЗ сравнивалось с током, рассчитанным на основе теплового импульса тока КЗ. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип кабеля	Номинальное напряжение кабеля, кВ	Ток термической стойкости, А	Расчетный ток по модели, А	Нагрузочная способность кабеля (коэффициент перегрузки)	Тепловая постоянная времени, мин
N2XS2Y-35	10	3031,09	3740	1,832	17,45
N2XS2Y-70	10	6062,18	6580	1,926	16,24
N2XS2Y-120	10	10392	10400	1,978	14,58
N2XS2Y-185	10	16021	15200	2,065	13,57
N2XS2Y-300	10	25981	23500	2,112	13,89
N2XS2Y-500	10	43301	37000	2,257	11,67
N2XS(FL)2Y-50	35	4330,13	7620	1,567	18,23
N2XS(FL)2Y-95	35	8227,24	12130	1,571	19,77
N2XS(FL)2Y-150	35	12990	17220	1,631	21,28
N2XS(FL)2Y-240	35	20785	25100	1,66	23,58
N2XS(FL)2Y-400	35	34641	38350	1,78	26,67

Проведенные исследования показывают, что нагрузочная способность кабелей с пластмассовой изоляцией выше, чем нагрузочная способность кабелей с бумажной изоляцией. При этом эквивалентная тепловая постоянная времени варьируется в широких пределах, что необходимо учитывать при проектировании систем электроснабжения.

Полученные результаты носят предварительный характер из-за необходимости дальнейшего совершенствования используемой математической модели, не учитывающей способ прокладки кабеля. Однако эти результаты могут являться основой для разработки новых рекомендаций ПТЭ по нагрузочной способности кабелей.

Анализ в режиме короткого замыкания показал, что формула для расчета тока в кабеле на термическую стойкость к току КЗ может давать как завышенные, так и заниженные значения тока. Следовательно, необходимо ставить под сомнение достоверность устаревших методов расчета и пользоваться более современной методикой, которая учитывает значительное число факторов.