

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА (СНИЖЕНИЯ) ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК

А. В. Засименко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь

Научный руководитель Т. В. Алферова

Несинусоидальность напряжений и токов оказывает негативное влияние на работу электрооборудования, сокращая срок его службы, приводит к увеличению потерь напряжения и мощности в сети, уменьшению ее пропускной способности.

Разработанная методика определения эксплуатационных характеристик кабелей до 1 кВ при питании нелинейных нагрузок представлена в табл. 1.

Для автоматизации расчетов этих характеристик разработана программа «Hz-cable» на языке Delphi.

Таблица 1

Описание математической модели программы «Hz-cable»

Алгоритм расчета	Математическое выражение	Пояснения
1. Активное сопротивление токопроводящей жилы по теореме Умова–Поинтинга	$R_{\text{ж}} = \frac{\sqrt{\omega\gamma\mu}b_0}{2\pi\gamma r b_1} \times \cos\left(\beta_0 - \beta_1 - \frac{\pi}{4}\right)$	ω – угловая частота электрического тока, с^{-1} ; b_0 – модуль функции Бесселя нулевого порядка первого рода; b_1 – модуль функции Бесселя первого порядка первого рода; β_0 – аргумент функции Бесселя нулевого порядка первого рода; β_1 – аргумент функции Бесселя первого порядка первого рода; γ – удельная проводимость токопроводящей жилы (для алюминиевой жилы $\gamma = 37 \cdot 10^6 \text{ См/м}$); μ – магнитная проницаемость (для алюминиевой жилы $\mu = 1,256629 \cdot 10^{-6}$)

Окончание табл. 1

Алгоритм расчета	Математическое выражение	Пояснения
2. Потери мощности в фазных жилах	$P_{\Sigma}^{\text{фазн}} = I_1^2 R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 R_n$	I_1, I_n – токи основной частоты и высшей гармоники, А; R_1 и R_n – активное сопротивление на основной частоте и высших гармониках тока, Ом
3. Потери мощности в нулевом проводнике	$P_{\Sigma}^0 = \sum_{n=3,9,\dots}^{21} (3I_n)^2 R_n$	I_n – значение фазного тока, создаваемого гармониками кратными трем
4. Общие потери активной мощности в кабеле	$P_{\text{сум}} = P_{\Sigma}^A + P_{\Sigma}^B + P_{\Sigma}^C + P_{\Sigma}^0$	–
5. Температура нагрева кабеля	$\tau_{\text{ж}} = P_{\text{ж}} T_1 + 3P_{\text{ж}} \times (T_2 + T_3 + T_4) + \tau_{\text{окр.ср}}$	$P_{\text{ж}}$ – потери мощности в жиле кабеля, Вт; T_1 – тепловое сопротивление между жилой и оболочкой кабеля; T_2 – тепловое сопротивление между оболочкой и броней; T_3 – тепловое сопротивление наружного защитного покрытия; T_4 – тепловое сопротивление окружающей среды; $\tau_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды, °С T_1, T_2, T_3, T_4 – согласно ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009)
6. Срок службы кабеля	$V_{\text{ис}} = V_{\text{ном}} e^{-\beta \Delta \tau}$ $\Delta \tau = \theta - \theta_{\text{длит.доп}}$ $\beta = \frac{\ln 2}{\Delta \theta}$	$\Delta \tau$ – дополнительный нагрев изоляции; β – коэффициент старения изоляции (повышение температуры, вызывающее сокращение срока службы изоляции при термическом старении в ldf раза); $\frac{\ln 2}{\Delta \theta}$ для изоляции класса В составляет 10 °С
7. Допустимый ток в кабеле	Метод перебора	–

Для примера приведем расчет эксплуатационных характеристик кабельной линии, проложенной в земле и выполненной кабелем марки АВБШв (4 × 150), при питании нелинейной нагрузки административного здания с помощью программы «Hz-cable».

Для определения уровней гармоник тока в течение недели были проведены измерения во ВРУ административного здания на питающем кабеле, проложенном от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (табл. 2).

Таблица 2

Значения токов высших гармоник в режиме наибольшей нагрузки административного здания

Номер гармоники	Максимальное значение $I(n)$ в спектре тока, %
1	100,0
3	29,3
5	13,9
7	10,2
9	15,2
11	9,5
13	8,2
15	3,9
17	4,6
19	2,2
21	1,4

Примечание. Гармоники тока более высокого порядка не вошли в таблицу, так как их значения не превышают 1,0 %.

При расчете принимаем следующие допущения: в сети протекает максимально допустимый ток основной частоты для выбранного сечения: $I_{\text{доп}} = 305$ А; спектральный состав токов принят одинаковым для всех трех фазных жил; расчет приведен на один погонный метр кабеля.

Геометрические параметры кабеля АВБШв (4 × 150) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Геометрические параметры кабеля АВБШв (4 × 150)

Марка кабеля	D_e , мм	t_3 , мм	D_s , мм	D_a , мм	t_2 , мм	d_{ae} , мм	t , мм	d_x , мм	r_1 , мм	ρ_T , К · м/Вт	$\Delta_{\text{поясн.изол.}}$, мм	$\Delta_{\text{брони}}$, мм	ρ_3 , К · м/Вт
АВБШв	47,7	2,4	39,1	42,9	0	40,9	1,6	13,82	14,95	5	0,9	1	1,2

Результаты расчета эксплуатационных характеристик кабеля АВБШв (4 × 150) представлены на рис. 1.

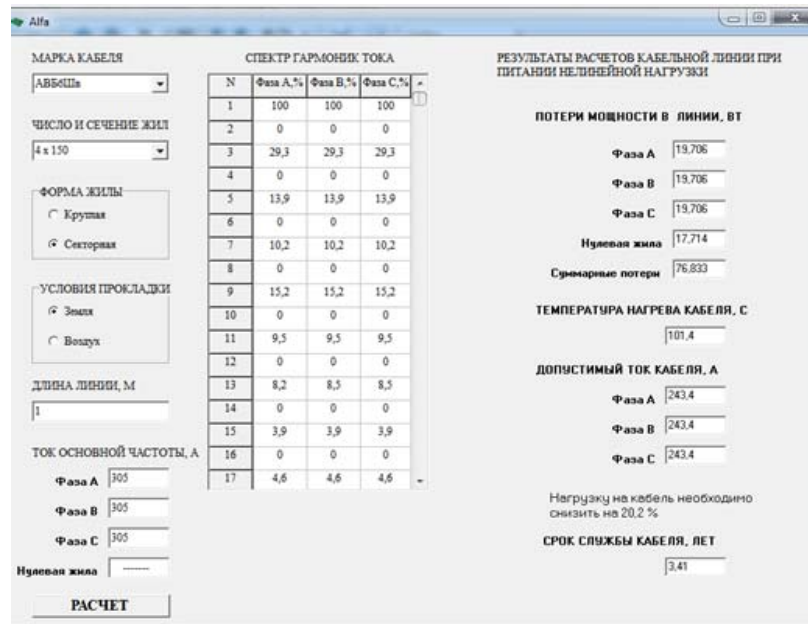


Рис. 1. Результаты расчета эксплуатационных характеристик кабеля

Полученное значение потерь сравнимо с потерями активной мощности в одной фазной жиле. Полученное значение температуры $101,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышает допустимую длительную температуру для кабелей с ПВХ изоляцией напряжением до 1 кВ, равную $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, для снижения температуры нагрева изоляции кабеля при нелинейной нагрузке до допустимого значения $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо уменьшить токовую нагрузку. При температуре $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ длительно-допустимый ток кабеля АВББШв (4×150) при линейной нагрузке составляет 305 А. При нелинейной нагрузке в 305 А кабель нагревается до температуры $101,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это приводит к значительному сокращению срока службы кабеля (3,41 года). Поэтому при нелинейной нагрузке ток, протекающий по кабелю, не должен превышать 243,4 А.

Учет дополнительного нагрева кабелей, вызванный ухудшением качества электрической энергии, передаваемой по кабельной линии к нелинейной нагрузке, с помощью приведенной методики и программы «Hz-cable», позволит предотвратить преждевременный выход кабеля из строя. Экономический эффект будет равен ущербу от преждевременного выхода из строя кабеля и внезапного отключения потребителя.