

УДК 621.311

**ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫБОРА ЖЕСТКИХ ШИН ПО УСЛОВИЯМ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ
PROGRAM FOR HARD BUS SELECTION UNDER THERMAL
RESISTANCE**

В.М. Лугачёв

Научный руководитель – С.Г. Гапанюк, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

V. Lugachev

Supervisor – S. Gapanjuk, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Выбор шин в цепи питания оборудования состоит из множества этапов. Одним из них является расчет термической стойкости при КЗ. В статье кратко описана методика расчета, дан пример программы, реализующей алгоритм для нахождения минимальной площади при заданных условиях КЗ.

Abstract: The selection of buses in the equipment power supply chain consists of many stages. One of them is the calculation of thermal resistance at short circuit. The article briefly describes the calculation method, this example of the program, implements the algorithm for finding the minimum area under the given conditions of the short circuit.

Ключевые слова: Выбор шин. Термическая стойкость. Короткое замыкание.
Keywords: Choice of buses. Thermal resistance at short circuit. Shortcircuit.

Введение

Существующие сегодня методики для выбора жестких шин по термической стойкости представляют собой проверочный расчет. Зная ток в режиме наибольших нагрузок, по длительно допустимому току выбирают определенное сечение шины. Но сделав такой выбор трудно сказать был ли он оптимальным с экономической точки зрения, можно ли взять меньшее сечение, вероятность того, что первая выбранная шина подойдет не абсолютная, а значит громоздкий расчет придется повторять несколько раз.

Основная часть

Основным критерием для оценки термической стойкости шины при коротком замыкании (КЗ) является допустимая температура нагрева θ_k [°C] (определяется по табл. 3 – 11 [1]), которая зависит от материала проводника, величины тока и временем его протекания. Температура проводника при коротком замыкании связана с величиной f , характеризующей тепловое состояние проводника, термические процессы происходящие при КЗ, f является функцией от температуры проводника, график этой зависимости изображен на рис. 1.

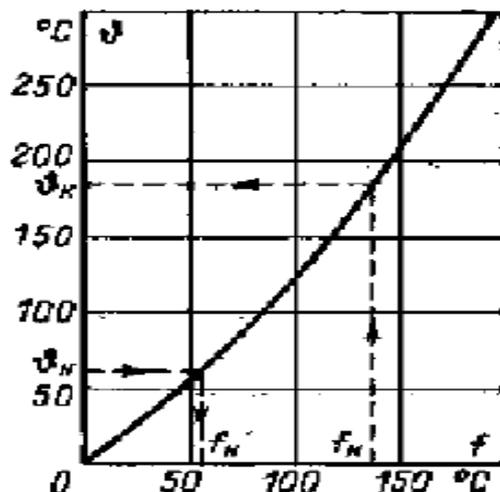


Рисунок 1 – Кривые для определения температуры нагрева проводников при КЗ

Расчет влияния тока КЗ на конечную температуру проводника ведется именно через этот коэффициент. Зная f для момента окончания действия тока КЗ (по прошествии времени работы релейной защиты) по графику можем найти конечную температуру проводника, дать оценку термической стойкости. Нахождение f для момента отключения токов КЗ, т.е. f_k , ведется по следующей формуле [1]:

$$f_k = f_n + k \frac{B_k}{S^2} \tag{1}$$

где f_k – величины характеризующие тепловое состояние проводника в момент окончания действия токов КЗ и нормальной работы соответственно, °C; k – коэффициент, учитывающий удельное сопротивление и эффективную теплоемкость проводника, $\text{мм}^2 \cdot \text{°C} / (\text{А}^2 \cdot \text{с})$; B_k – интеграл Джоуля, $\text{А}^2 \cdot \text{с}$ [2]; S – площадь сечения проводника, мм^2 .

Далее рассмотрим величину f_n , она по изложенному выше закону зависит от начальной температуры проводника θ_n , это температура шины при длительной работе в режиме максимальной нагрузки, согласно [1], данная температура определяется по следующей формуле:

$$\theta_n = \theta_0 + (\theta_{\text{доп.дл.}} - \theta_{\text{ном}}) \cdot \left(\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{доп}}} \right)^2 \text{ [°C]} \tag{2}$$

где θ_0 – действительная температура окружающей среды, °C; $\theta_{\text{доп.дл.}} = 70 \text{ °C}$ – длительно допустимая температура для шинных конструкций; $\theta_{\text{ном}} = 25 \text{ °C}$ – номинальная температура окружающей среды; I_{max} – ток подключаемой установки в режиме наибольшей нагрузки, А; $I_{\text{доп}}$ – длительно допустимый ток для данного сечения, А.

I_{\max} может рассчитываться разными методами, в зависимости от типа подключаемой установки, например, для трансформатора:

$$I_{\max} = 1,35 \cdot I_{\text{ном}} \quad [A] \quad (3)$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток установки, А.

Для генератора:

$$I_{\max} = \frac{P_{\text{ном}}}{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \phi} = \frac{I_{\text{ном}}}{0,95} \quad [A] \quad (4)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, Вт; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток, А; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, В; $\cos \phi$ – коэффициент мощности.

Длительно допустимый ток $I_{\text{доп}}$ определяется по таблицам из ПУЭ, где каждому значению площади сечения и соотношения ширины и высоты соответствует свой длительно допустимый ток. Таким образом, в соотношении (2) мы получили зависимость начальной температуры шины от ее площади. Однако, это соотношение выражено дискретной таблицей значений, к тому же, одному значению площади могут соответствовать два значения тока (для разных соотношений высоты и ширины), необходимо учитывать, что плоские шины могут состоять из нескольких полос на одну фазу. Для получения формулы минимальной площади нам все же необходимо получить некоторую математическую зависимость, иначе мы не сможем, подставив (2) в (1), разрешить последнее уравнение относительно минимальной площади.

К тому же, необходимо отметить, что температура в номинальном режиме является начальной температурой для короткого замыкания, а т. к. температура длительного режима фиксирована – 70 °С, предельно допустимые температуры нагрева меди и алюминия равны соответственно 200 °С и 300 °С. Таким образом при КЗ температура проводника может безопасно вырасти на 130 °С или 230 °С соответственно. За величину роста температуры, исходя из уравнения (3) отвечает слагаемое $k \frac{B_{\text{к}}}{q^2}$. Таким образом, интеграл Джоуля должен обеспечить прирост температуры именно на эти 130 °С, как показывает практика расчетов реальные тепловые импульсы редко достигают подобных значений. Из той же практики расчетов можно сделать вывод, что если начальная температура алюминиевого проводника не превышает 70 °С, т. е. не превышает длительно допустимую, то при $\frac{B_{\text{к}}}{q^2} < (7,5 - 8) \cdot 10^{-3}$, допускается проверку на термическую стойкость не проводить. При данной величине соотношения термическое действие КЗ не превысит 130 °С. Для медных проводников предельное соотношение будет другим, из-за разницы между коэффициентами k . Данный вывод в существующей учебной и справочной литературе не приводится.

Для составления алгоритма для нахождения минимальной площади требовалось в формулу (1) подставить граничные, т.е. предельные условия при которых шина еще термически прочна, таким условием является максимальное $f_{\text{к}}$,

которое соответствует длительно допустимой температуре, и для меди это – 201,223 °С, для алюминия – 148,913 °С.

Следующий этап – получить прямые $f(\vartheta)$ и обратные $\vartheta(f)$ математические зависимости, в оригинале они выражены графиком. Это возможно сделать методом интерполяции с разной степенью точности, полученное выражение не зависит от рода материала шины и ее формы, что очень удобно для программирования. Пример математического закона, описывающего график Рисунок 1:

$$\vartheta(f) = 0,0027 \cdot f^2 + 0,9816 \cdot f - 0,0637 \quad (5)$$

$$f(\vartheta) = 0,6492 \cdot \vartheta + 12,839 \quad (6)$$

Далее необходимо получить математическую зависимость длительно допустимого тока от площади сечения, в оригинале она представлена таблицами из ПУЭ 6. Длительно допустимый ток зависит от рода материала, формы и площади шины. Зависимость для каждого из сочетания факторов будет своя, однако все они с высокой точностью выражаются квадратичными уравнениями или прямой. Например, уравнение для плоских алюминиевых шин имеет вид:

$$I_{don}(S) = 1,6889 \cdot S + 197,67 \quad (7)$$

Аналогично можно получить уравнения для всех существующих материалов и форм.

Таким образом мы имеем все необходимые математические законы, чтобы получить зависимость конечной температуры от площади сечения. Для получения финального уравнения достаточно формулы (2), (5) и (7) подставить в (1).

Практического смысла получать финальные уравнения нет, при подстановке даже линейных аппроксимаций таблиц получается полином 4 степени, который точного решения не имеет.

Таким образом, мы приходим к тому, что решать данную задачу нужно итерационным методом. А для его реализации не требуется финальная формула зависимости температуры от площади, достаточно лишь знать законы, связывающие величины в формуле (1) с площадью и температурой. Данные обстоятельства позволяют достаточно легко применить для решения данной задачи ЭВМ.

В результате работы получили программу, интерфейс и результат работы которой представлен на рис. 2.

Правильность работы программы подтверждена ручным расчетом, результаты которого представлены на рис. 3.

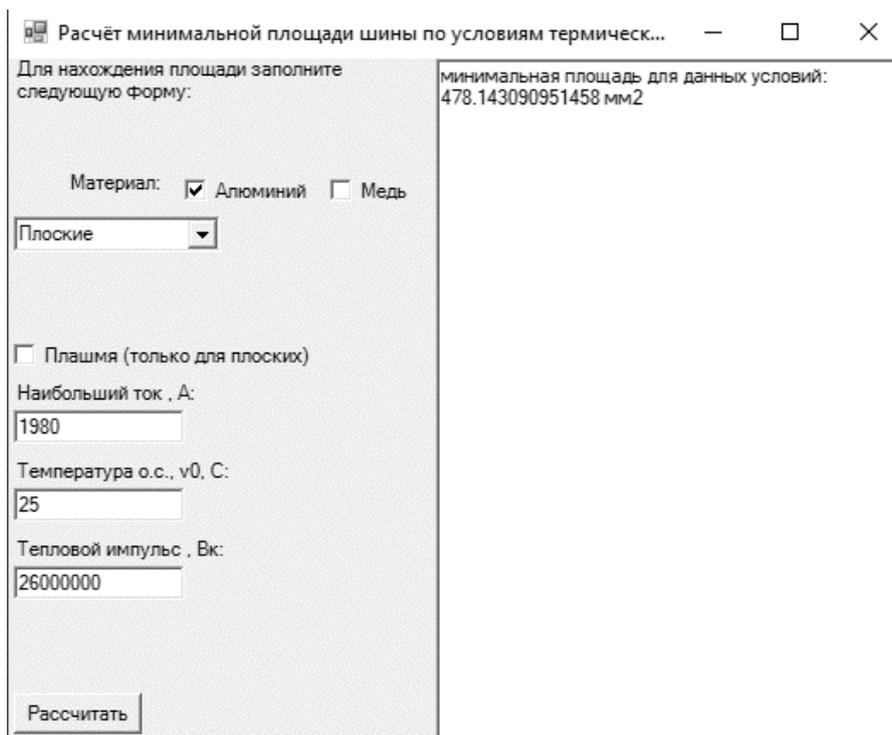


Рисунок 2 – Программа реализующая алгоритм нахождения минимальной площади шины из условия термической стойкости при КЗ

$$s(i) = \frac{i - 198}{1.7} \quad s(1004.043) = 474.143$$

$$v0 = 25 \quad imax = 1980$$

$$k_{\text{max}} = 0.01054 \quad Bk = 2.6 \times 10^7$$

$$i(s) = 1.7 \cdot s + 198$$

$$f(v) = 0.65 \cdot v + 13$$

$$fk = f(200) = 143$$

$$SS = 478.143$$

$$vn = v0 + 45 \cdot \left(\frac{imax}{i(SS)} \right)^2 = 197.654$$

$$f(vn) = 141.475$$

$$FK = f(vn) + \frac{0.01054 \cdot Bk}{SS^2} = 142.673$$

$$v(FK) = 194.945$$

$$FK - fk = -0.327$$

Рисунок 3 – Ручная проверка

Заключение

На основании описанного принципа выбора минимальной площади по условиям термической стойкости был составлен алгоритм и написана программа на ЭВМ. Правильность ее работы проверена вручную. Полученная в ходе работы методика расчетов на основе анализа ранее известных методов, позволила создать на их основе более понятный и быстрый алгоритм расчета, занимающий меньше памяти, требующий меньше данных, позволяющий сразу судить о минимально возможном варианте ошиновки, а не заниматься подбором

и проверками. Упростить алгоритм позволили математические зависимости, полученные из графиков и таблиц. Получены условия, при выполнении которых необходимость проверки шин на термическую стойкость отпадает.

Литература

1. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – 2-е изд, перераб. – Москва; Энергия, 1980.
2. Виды шин и проводов // forca.ru: интернет-портал. URL: <https://forca.ru/spravka/shiny-i-tokoprovody/vidy-shin-i-provodov.html> (дата обращения: 15.05.2020).