

УДК 621.3

*Н.К. Маркитантова, Г.Е. Полехина***УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ТОКОВЕДУЩЕЙ ЖИЛЫ**

Рассмотрена проблема совершенствования проводов для передачи электроэнергии и сигналов. Объектом исследования в представленной работе являются токоведущие жилы, рассмотрено совершенствование токоведущих жил проводов на макроуровне. Получена конечная расчетная формула определения удельного электрического сопротивления биметаллического проводника. Для выполнения расчетов использовались программой MathCAD-14. Анализ полученной зависимости позволяет сделать очевидный вывод об увеличении удельного электрического сопротивления биметаллического проводника с уменьшением слоя меди и представить важную характеристику количественно, что важно для дальнейшего системного анализа.

Ключевые слова: биметаллическая токоведущая жила, удельное сопротивление, потеря электроэнергии, биметаллический проводник.

*N.K. Markitantova, G.E. Polekhina***BIMETALLIC CONDUCTOR'S
SPECIFIC RESISTANCE**

Improvement of conductors of electric energy and signals is considered by the authors. The subject of the research consists in cable conductors, and their improvement is analyzed on the macro-level. The authors have derived the final formula designated for the calculation of the value of the specific electric resistance of bimetallic conductors. MathCAD-14 software was employed to perform the calculations. The analysis of dependencies derived by the authors allowed the authors to make the conclusion that the thinner the copper layer, the higher the specific electric resistance of the bimetallic conductor. Moreover, the authors succeeded in making a quantitative presentation of the aforementioned characteristic, which is a relevant contribution into its further systemic analysis.

Key words: bimetallic conductor, specific resistance, electric power loss, bimetallic conductor.

В настоящее время рассматривается несколько направлений совершенствования проводов для передачи электроэнергии и сигналов. Основное направление при передаче электроэнергии — снижение потерь [1]. Однако все чаще преследуются и другие цели: обеспечение прочности провода, уменьшение массы конструкции, придание проводнику определенной жесткости и т.д. Для передачи сигналов рассматриваются материалы и конструкции, способные проводить без искажения или с наименьшими искажениями сигналы различных типов: гармонические, высокочастотные, цифровые и т.д. Изучаются вопросы совершенствования изоляции проводов.

Направления совершенствования проводов связаны с улучшением характеристик токоведущих жил [2], потому что именно в них происходят потери электроэнергии, затухания информационных сигналов, распределение силовых нагрузок и т.д. Объектом исследования в представленной работе являются токоведущие жилы. Рассматривается совершенствование токоведущих жил проводов на макроуровне. Это связано с тем, что нанотехнологии очень перспективны, но в настоящее время облик наноконструкций не определен. Внедрение нанотехнологий в практику — это достаточно длительный процесс, как минимум несколько лет. Сейчас нанотехнологии развиты на уровне научно-исследовательских работ, тогда как практика требует немедленного улучшения характеристик конструкций.

Авиационная и космическая техника накладывает на токопроводящие жилы электрических проводов дополнительные требования — уменьшение массы, повышение стойкости к коррозии, повышение прочности, одновременную передачу нескольких типов сигналов, снижение стоимости конструкции и т.д. Такие многокритериальные задачи оптимизации требуют системного подхода в решении, потому что множество критериев обычно противоречат друг другу.

Цель работы — определить удельное электрическое сопротивление биметаллической токоведущей жилы.

Конструкция биметаллической жилы представляет собой два проводника кругового сечения. Алюминиевый проводник имеет диаметр d меньше диаметра D внешнего медного проводника.

Алюминиевый проводник размещается внутри медного по двум причинам.

Во-первых, алюминий окисляется на воздухе, образуя прочную оксидную пленку Al_2O_3 , которая является диэлектриком, что не желательно в местах механического контакта.

Во-вторых, медь обладает лучшей электропроводностью по сравнению с алюминием [3]. Удельное электрическое сопротивление меди равно $\rho_{\text{Cu}} = 17,5$ нОм м, тогда как алюминия $\rho_{\text{Al}} = 27,1$ нОм м. В случае передачи переменного электрического тока явление скин-эффекта вытесняет передаваемую энергию на поверхность проводника, поэтому поверхностный слой проводника должен обладать максимальной электропроводностью, т.е. наименьшим удельным электрическим сопротивлением. Явление скин-эффекта, т.е. вытеснения электрического тока на поверхность проводника, наблюдается тем сильнее, чем больше частота переменного тока. Для постоянного тока явление скин-эффекта не наблюдается.

При вычислении удельного электрического сопротивления биметаллического проводника будем предполагать передачу постоянного тока, т.е. не будем учитывать скин-эффект. В случае передачи постоянного тока эквивалентная расчетная электрическая схема проводника представляет собой два параллельно соединенных резистора с различными величинами электрических сопротивлений. Электрические сопротивления медного R_{Cu} и алюминиевого R_{Al} проводников зависят от их удельных электрических сопротивлений $\rho_{\text{Cu}} = 17,5$ нОм м, $\rho_{\text{Al}} = 27,1$ нОм м, от длины L , которая одинакова для обоих проводников, и от площадей поперечных сечений круга для алюминиевого проводника $S_{\text{Al}} = \frac{\pi d^2}{4}$ и площади кольца для

медного проводника $S_{\text{Cu}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$ (рис. 1).

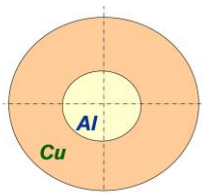


Рис. 1. Расчетная конструкция биметаллической жилы

Записываем выражения для величин электрических сопротивлений алюминиевого и медного проводников равной длины в биметаллической жиле:

$$R_{\text{Al}} = \frac{4\rho_{\text{Al}}L}{\pi d^2}; R_{\text{Cu}} = \frac{4\rho_{\text{Cu}}L}{\pi(D^2 - d^2)}.$$

Общее электрическое сопротивление биметаллического проводника определяем по формуле

$$R = \frac{R_{\text{Al}}R_{\text{Cu}}}{R_{\text{Al}} + R_{\text{Cu}}} = \frac{\frac{4L}{\pi D^2} \rho_{\text{Al}}}{\left(1 - (d/D)^2\right) \left[\rho_{\text{Al}}/\rho_{\text{Cu}} + 1/\left((d/D)^2 - 1\right)\right]}.$$

Обозначим два отношения следующими символами:

отношение диаметра внутреннего алюминиевого проводника к диаметру внешнего медного проводника $\alpha = \frac{d}{D}$;

отношение удельного электрического сопротивления алюминиевого проводника к удельному электрическому сопротивлению медного проводника $\beta = \frac{\rho_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Cu}}}$.

При таких обозначениях полученная формула принимает вид

$$R = \frac{4L}{\pi D^2} \cdot \frac{\rho_{\text{Al}}}{\left(1 - \alpha^2\right) \left[\beta + 1/\left(\frac{1}{\alpha^2} - 1\right)\right]}.$$

В полученной формуле второй множитель-дробь представляет собой среднее удельное электрическое сопротивление всего биметаллического проводника:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{эAl}}}{(1-\alpha^2) \left[\beta + 1 / \left(\frac{1}{\alpha^2} - 1 \right) \right]}$$

Полученную формулу можно записать в виде

$$\rho = \frac{\rho_{\text{эAl}}}{(1-\alpha^2) \left(\beta + \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} \right)}$$

Если раскрыть скобки в знаменателе, то получим конечную расчетную формулу для определения удельного электрического сопротивления биметаллического проводника:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{эAl}}}{\beta(1-\alpha^2) + \alpha^2}$$

$$f(\alpha, \beta) := \frac{27,1}{\beta(1-\alpha^2) + \alpha^2} \quad \begin{array}{l} \rho_{\text{Al}} = 27,1 \text{ нОм}\cdot\text{м} \\ \rho_{\text{Cu}} = 17,5 \text{ нОм}\cdot\text{м} \end{array}$$

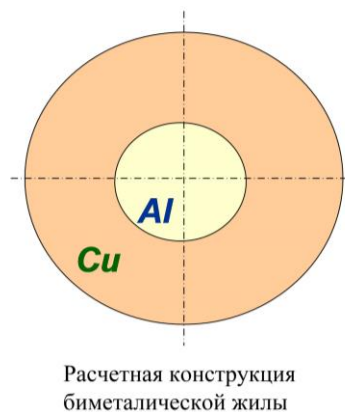
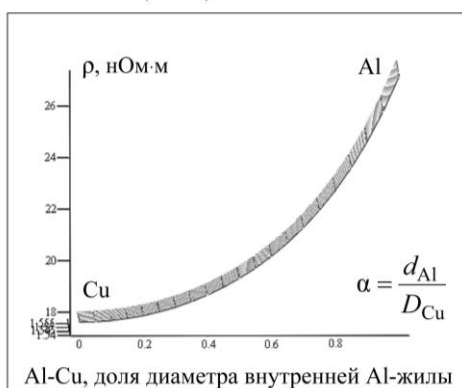


Рис. 2. Расчет удельного электрического сопротивления биметалла Al-Cu с применением программы MathCAD-14

Для выполнения расчетов с применением полученной формулы воспользуемся программой MathCAD-14. Построим графическую зависимость удельного электрического сопротивления биметаллического проводника от величины $\alpha = \frac{d}{D}$ отношения диаметров проводников. При этом величина $\alpha = \frac{d}{D}$ находится в пределах $\alpha \in [0; 1]$ (рис. 2).

Выполним проверку правильности полученного результата при граничных значениях величины $\alpha = \frac{d}{D}$ отношения диаметров проводников.

Если $\alpha = \frac{d}{D} = 0$, то это означает отсутствие внутреннего алюминиевого проводника. В этом случае биметаллический проводник становится монометаллическим медным проводником с удельным электрическим сопротивлением меди $\rho_{\text{эCu}} = 17,5$ нОм м, что видно на рисунке при $\alpha = 0$ в левой части графика.

Если $\alpha = \frac{d}{D} = 1$, то $d = D$. Это означает отсутствие внешнего медного проводника. В этом случае биметаллический проводник становится монометаллическим

алюминиевым проводником с удельным электрическим сопротивлением алюминия $\rho_{\text{эAl}} = 27,1$ нОм м, что видно на рисунке при $\alpha = 1$ в правой части графика.

Следовательно, при граничных значениях параметра $\alpha = \frac{d}{D}$ биметаллический проводник переходит в монометаллический, что соответствует действительности.

Анализ полученной зависимости позволяет сделать очевидный вывод об увеличении удельного электрического сопротивления биметаллического проводника с уменьшением слоя меди и представить важную характеристику количественно, что важно для дальнейшего системного анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ и перспективы развития современных токоведущих проводов. Режим доступа: http://kit-e.ru/articles/powerel/2007_08_137.php. Дата обращения 28.12.12.
2. Плотности металлов. Режим доступа: http://www.zaozmi.ru/polezno/plotnost_metallov.html. Дата обращения: 28.12.12.
3. Удельные электрические сопротивления металлов. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wik>. Дата обращения: 25.12.12.

REFERENCES

1. *Analiz i perspektivy razvitiya sovremennykh tokovedushchikh provodov* [Analysis of and Prospects for Development of Modern Cable Conductors]. Available at: http://kit-e.ru/articles/powerel/2007_08_137.php. Date of access: 28.12.12.
2. *Plotnosti metallov* [Densities of Metals]. Available at: http://www.zaozmi.ru/polezno/plotnost_metallov.html. Date of access: 28.12.12.
3. *Udel'nye elektricheskie soprotivleniya metallov* [Specific Electric Resistances of Metals]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wik>. Date of access: 25.12.12.

Поступила в редакцию в мае 2013 г.

Об авторах: **Маркитантова Наталья Константиновна**, Мытищинский филиал, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 141006, Московская область, г. Мытищи, Олимпийский проспект, д. 50, dekanatpgsf@mail.ru;

Полехина Галина Евгеньевна, Мытищинский филиал, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 141006, Московская область, г. Мытищи, Олимпийский проспект, д. 50, dekanatpgsf@mail.ru

About the authors: **Markitantova Natal'ya Konstantinovna**, Mytishchi Branch, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), 50 Olimpiyskiy prospect, Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russian Federation; dekanatpgsf@mail.ru;

Polekhina Galina Evgen'evna, Mytishchi Branch, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), 50 Olimpiyskiy prospect, Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russian Federation; dekanatpgsf@mail.ru

Для цитирования:

Маркитантова Н.К., Полехина Г.Е. Удельное сопротивление биметаллической токоведущей жилы [Электронный ресурс] // Строительство: наука и образование. 2013. Вып. 2. Ст. 4. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>

For citation:

Markitantova N.K., Polekhina G.E. Udel'noe soprotivlenie bimetallicheskoj tokovedushchey zhily [Bimetallic Conductor's Specific Resistance]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education], 2013, no. 2, paper 3. Available at: <http://www.nso-journal.ru>