

УДК 621.3

DOI: 10.53297/18293328-2025.1-28

СНИЖЕНИЕ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПЛОСКИХ СИЛОВЫХ ШИН

Н.П. Бадалян¹, Ю.В. Молокин², И.В. Шилов², Р.А. Тонков³, Н.Е. Чашин⁴

¹ *Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

³ *Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева*

³ *ГК НПП имени М.В. Хруничева КБ «Арматура»*

⁴ *Московский институт электронной техники*

Предлагается способ снижения металлоемкости алюминиевых и медных плоских силовых неизолированных шин прямоугольного сечения за счет повышения пропускной способности электротехнических шин. Показано, что рифление боковой поверхности шины прямоугольного сечения посредством накатки согласно ГОСТ 21474-75 позволяет увеличить площадь поверхности прямоугольной шины более чем на 40%. Увеличение площади боковой поверхности накаткой не приводит к изменению площади поперечного сечения, поэтому термическая устойчивость электротехнических шин к воздействию токов короткого замыкания не изменяется. Результаты анализа тепловых процессов нагрева шин длительно протекающим током показали, что в установившемся режиме увеличение площади боковой поверхности приводит к интенсификации процессов теплоотдачи. Увеличение площади боковой поверхности шины при нормальных режимах эксплуатации сопровождается интенсификацией процессов теплоотдачи, что приводит либо к снижению температуры перегрева, либо, при условии сохранения предельно допустимых значений перегрева, к увеличению пропускной способности неизолированных плоских силовых шин в 1,19 раза. В свою очередь, рост пропускной способности электротехнических шин при длительном протекании тока позволяет применять взамен шины меньшего сечения, что позволяет снизить вес погонного метра (n/m) алюминиевых и медных плоских силовых электротехнических шин более чем на 20%.

Ключевые слова: шина, теплоотдача, перегрев, накатка, тепловой баланс.

Введение. В настоящее время в электросетях функционирует достаточно большое количество подстанций, распределительных пунктов, трансформаторных подстанций и т.п. рабочим напряжением до 35 кВ. Одним из конструктивных элементов таких подстанций является ошиновка жесткими неизолированными плоскими силовыми электротехническими шинами [1], выполненными из алюминия или меди. Учитывая, что с 2015 г. стоимость тонны алюминия выросла в 1,44 раза (с 1665 долл. США до 2400 долл. США), а стоимость тонны меди выросла в 1,59 раза (с 5510 долл. США до 8800 долл.

США) [2], снижение металлоемкости алюминиевых и медных плоских силовых неизолированных шин прямоугольного сечения за счет повышения пропускной способности электротехнических шин является актуальной задачей.

Материал и методы исследования. Известно [3], что пропускная способность электротехнических шин ограничивается температурой перегрева, т.к. при достижении температуры 90°C в контактных соединениях интенсифицируются электроэрозионные процессы, что приводит к росту контактных сопротивлений и, как следствие, выгоранию контакта. Поэтому, согласно требованиям [4], допускается нагрев электротехнических шин до температуры поверхности не более 90°C .

Рассмотрим процесс нагрева плоской силовой неизолированной шины с омическим сопротивлением R_a в приближении нагрева однородного проводника протяженностью L протекающим током с действующим значением I . В этом приближении количество тепла, выделяемого на участке шины за время dt , удобно представить, в виде

$$dQ = I^2 R_a dt. \quad (1)$$

Запишем уравнение теплового баланса для случая длительного протекания тока [5]:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (2)$$

где dQ_1 – количество тепла, затрачиваемого на нагрев участка шины; dQ_2 – количество тепла, отдаваемого за счет действия всех механизмов теплоотдачи.

В расчётах принимаем, что перегрев поверхности электротехнической шины по отношению к температуре окружающей среды составляет

$$\theta = \nu - \nu_0, \quad (3)$$

где ν – температура поверхности шины, K ; ν_0 – температура окружающей среды, K .

В расчетах принимаем также, что температура окружающей среды составляет 24°C . Тогда, согласно вышеуказанным требованиям, из выражения (3) видно, что допускаемый перегрев по отношению к окружающей среде составит

$$\theta = 363,1 - 298,1 = 65 \text{ K}.$$

При длительном протекании тока достигается установившееся значение температуры, т.к. одновременно протекают как процесс нагрева участка шины:

$$dQ_1 = \gamma q L c d\theta \quad (4)$$

(где γ – удельный вес металла шины; q – площадь поперечного сечения шины;

c – удельная теплоемкость материала проводника), так и процесс охлаждения за счет теплопроводности и механизмов излучения и конвекционной теплоотдачи:

$$dQ_2 = KF\theta dt \quad (5)$$

(где K – коэффициент, учитывающий все виды теплоотдачи; F – площадь боковой поверхности шины).

Перепишем уравнение теплового баланса (2). С учетом подстановки выражений (1), (3) - (5) получим дифференциальное неоднородное уравнение первого порядка

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{KF}{\gamma q L c} \theta = \frac{I^2 R_a}{\gamma q L c}. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) имеет вид

$$\theta = \frac{I^2 R_a}{KF} \left(1 - e^{-\frac{KF}{\gamma q L c} t} \right). \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что установившееся значение температуры поверхности участка шины при длительном протекании тока составит

$$\theta = \frac{I^2 R_a}{KF}. \quad (8)$$

Соответственно, длительно протекающий ток, нагревающий поверхность неизолированной электротехнической шины до допустимой температуры перегрева 65 K , составит

$$I = \sqrt{\frac{K\theta F}{R_a}}. \quad (9)$$

Пропускная способность электротехнической шины определяется величиной длительно протекающего тока. Тогда из выражения (9) вытекает, что пропускная способность плоских неизолированных электротехнических шин – это иррациональное выражение 2-й степени и зависит от площади боковой поверхности. Следует отметить, что площадь боковой поверхности шины F может быть увеличена посредством формовой прямой накатки роликом с V-образными зубьями [6]. Такая технология обработки поверхности шины предполагает продольное прокатывание ролика под давлением до 1400 МПа , что обеспечивает его вдавливание на глубину h , при этом материал поверхности не удаляется и площадь поперечного сечения q остается без изменения, а следовательно, термическая устойчивость электротехнических шин к воздействию токов короткого замыкания не изменяется.

В работе в соответствии с требованиями ГОСТ 21474-75 принимаем, что алюминиевые и медные шины накатываются с шагом накатки $P = 0,5$ мм, глубиной накатки $h=0,5 P$ и углом накатки $a=90$ град. Согласно требованиям инструкций по монтажу, неизолированные электротехнические шины монтируются на изоляторы, расстояние между которыми может достигать 6 м, т.е. допустимым является приближение, в котором накатка производится по всей поверхности шины. Расчет изменения площади боковой поверхности шины выполнялся в универсальной системе автоматизированного проектирования "КОМПАС" с применением встроенной функции "длина кривой". Результаты моделирования показали, что накатка электротехнических шин позволяет увеличить площадь боковой поверхности более чем на 40% по сравнению с исходной шиной без накатки для всей номенклатуры плоских неизолированных электротехнических шин, выполненных из алюминия или меди. В свою очередь, согласно приведенной выше зависимости (9), это приводит к увеличению пропускной способности неизолированных плоских силовых шин при нормальном режиме эксплуатации в 1,19 раза.

С целью проверки эффективности накатки, как способа повышения пропускной способности неизолированной электротехнической шины, проводился качественный эксперимент, направленный на определение величины температуры нагрева поверхности шины. В эксперименте к источнику тока последовательно подключался исследуемый образец. Ток, текущий через шину, задавался одинаковым для всех образцов шин и определялся уставками источника, исходя из условия, что температура поверхности образца в установленном режиме не должна приводить к интенсификации процессов окисления контактных соединений, т.е. не должна превышать 70 °С. Контроль температуры поверхности образца выполнялся контактным присоединением термопары с последующим пересчетом градусов цельсия в кельвины. В эксперименте сначала выполнялись измерения температуры поверхности эталонного образца участка алюминиевой шины с размерами $30 \times 10 \times 100$ мм (рис. а), а затем, при прочих равных условиях, образца с имитацией накатки, в котором накатка выполнялась только на двух поверхностях (рис. б).

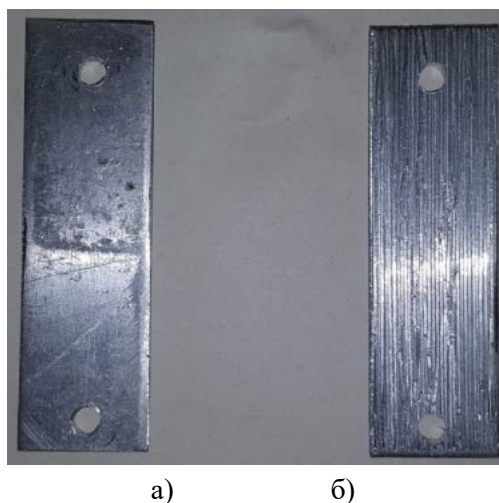


Рис. Экспериментальные образцы

Определение температуры поверхности шины выполнялось термопарой, соединенной с мультиметром Mastech MY62, с пределом измерения температуры 1000 °С, погрешностью измерения температуры 2% в диапазоне 0...400 °С. В качестве источника тока использовался сварочный аппарат Helvi PROFi 270 с выходным током до 230 А. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температура поверхности неизолированной шины		
Параметр	Без накатки	С накаткой
v_0, K	303,15	
v, K	337,15	323,15
θ, K	34	20

Результаты исследования и их обсуждение. Видно, что накатка поверхности позволяет понизить температуру поверхности в 1,28 раза (с 64 °С до 50 °С), при этом перегрев поверхности уменьшается в 1,7 раза (с 34 К до 20 К). Полученное уменьшение качественно соответствует теоретическим предпосылкам (8), что подтверждает достоверность предположений о возможности увеличения пропускной способности неизолированной электротехнической шины в нормальных условиях эксплуатации (9).

В табл. 2 приведены сведения о пропускной способности плоских неизолированных электротехнических шин традиционной конструкции [7] и тех же шин с накаткой поверхности, величина которых рассчитана по зависимости (9).

Таблица 2

Электротехнические шины прямоугольного сечения

№	Типоразмер, мм	Алюминий			Медь		
		Длительно допустимый ток, А		Масса 1 п/м, кг	Длительно допустимый ток, А		Масса 1 п/м, кг
		без накатки	с накаткой		без накатки	с накаткой	
1	3×15	165	196,4	0,12	210	249,9	0,41
2	3×20	215	255,9	0,17	275	327,3	0,54
3	3×25	265	315,4	0,2	340	404,6	0,68
4	4×30	365	434,4	0,35	475	565,3	1,08
5	4×40	480	571,2	0,43	625	743,8	1,44
6	5×40	540	642,6	0,54	700	833	1,8
7	5×50	665	791,4	0,68	860	1023,4	2,25
8	6×50	740	880,6	0,8	955	1136,5	2,7
9	6×60	870	1035,3	1	1125	1338,8	3,24
10	10×60	1155	1374,5	1,6	1475	1755,3	5,4
11	8×80	1320	1570,8	1,73	1690	2011,1	5,76
12	10×100	1820	2165,8	2,7	2310	2748,9	9
13	10×120	2070	2463,3	3,24	2650	3153,5	10,8

Из табл. 1 видно, что для алюминиевых шин, начиная с типоразмера 4×40 мм и далее (порядковые номера 5-13), нормируемый правилами установки электрооборудования (ПУЭ) [8] ток могут пропускать шины меньшего размера (порядковые номера 5-13). Т.е. для эксплуатации в нормальном режиме с длительно допустимым током, например 540 А, можно применять вместо плоской шины традиционной формы сечением 5×40 мм плоскую шину с накаткой сечением 4×40 мм, что приводит к снижению массы 1 п/м шины на 26% (с 0,68 до 0,54 кг). С увеличением типоразмеров размеров шин разница в массе 1 п/м шины снижается. В частности, для длительно допустимого тока 2070 А вместо шины традиционной формы сечением 10×120 мм можно применять плоскую шину с накаткой сечением 10×100 мм, что позволяет снизить массу 1 п/м шины до 20%. Аналогичная картина наблюдается и для плоских неизолированных медных шин, начиная с типоразмера 5×50 мм. Например, для электроснабжения с длительно допустимым током 955 А вместо плоской шины традиционной формы сечением 6×50 мм можно применять плоскую шину с накаткой сечением 5×50 мм, что приводит к снижению массы 1 п/м шины на 20% (с 2,7 до 2,25 кг).

Заключение. Накатка поверхности плоских неизолированных электротехнических алюминиевых и медных электротехнических шин прямоугольного сечения позволяет увеличить площадь боковой поверхности

более чем на 40%. Увеличение площади боковой поверхности накаткой не приводит к изменению площади поперечного сечения, поэтому термическая устойчивость электротехнических шин к воздействию токов короткого замыкания не изменяется. Результаты анализа тепловых процессов нагрева шин длительно протекающим током показали, что в установившемся режиме увеличение площади боковой поверхности приводит к интенсификации процессов теплоотдачи. Интенсификация процессов теплоотдачи при нормальных режимах эксплуатации сопровождается снижением температуры перегрева, что качественно подтверждено результатами сравнительных экспериментов, показавшими уменьшение температуры перегрева в 1,7 раза. Это, в свою очередь, позволяет увеличить уровень длительно протекающего тока неизолированных плоских силовых шин в 1,19 раза. Увеличение пропускной способности шин позволяет применять шины меньшего типоразмера, что дает возможность снизить массу на 20% и более.

Литература

1. **Ополева Н.Г.** Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник.– М.: Форум-Инфра-М, 2006. - 480 с.
2. **Маслакова Г.В., Митрофанов А.А., Чащин Е.А., Шурыгин Ю.А.** Потери энергии в электрических сетях и установках: Учеб. пособие.- Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2018.- 79 с.
3. Ресурсы и полезные ископаемые.- Текст: электронный // TopicRu: [сайт].- URL: <https://topic.ru/statistics/chemicals/mining-metals-and-minerals/srednie-tseny-na-aluminiumy-po-godam/> (дата обращения: 28.03.2025).
4. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме [Текст]: ГОСТ 8024-90. – Взамен ГОСТ 8024-84; введ. 01.01.91.
5. **Руцкий А.И.** Электрические станции и подстанции.– Минск: Изд-во "Наука и техника", 1967. - 546 с.
6. **Балашова С.А., Чащин Е.А., Шилов И.В., Митрофанов А.А.** Повышение эксплуатационных характеристик керамических покрытий // Вестник Саратовского государственного технического университета.- 2009.- Т.2, N 1(38).- С. 73-80.
7. **Медведков В.Л., Маркеева Л.Н.** Инструкция по монтажу шинопроводов переменного тока напряжением до 1000 В, постоянного тока напряжением до 1200 В / Самарское проектно-технологическое бюро концерна "Электромонтаж".- М.: Кэнди, 1993.- 91 с.
8. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий.- М.: ЭНАС, 2019.- 672 с.- ISBN 978-5-4248-0162-4.-

Текст: электронный // Лань: Электронно-библиотечная система.- URL: <https://e.lanbook.com/book/173340> (дата обращения: 29.03.2025).

Поступила в редакцию 20.03.2025.
Принята к опубликованию 31.10.2025.

ՉՄԵԿՈՒՍԱՑՎԱԾ ՈՒՓԱՅԻՆ ՀԱՂՈՐԴԱԾՈՂԱԼԱՐԵՐԻ ՄԵՏԱՂԱՏԱՐՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՈՒՄԸ

Ն.Պ. Բադալյան, Յու.Վ. Մոլոկին, Ի.Վ. Շիլով, Ռ.Ա. Տոնկով, Ն.Ե. Չաշչին

Առաջարկվում է այլումինե և պղնձե հարթ ուղղանկյուն կտրվածքով, չմեկուսացված հզոր էլեկտրատեխնիկական հաղորդաձողալարերի մետաղատարության նվազեցման մեթոդ՝ էլեկտրատեխնիկական հաղորդաձողալարերի թողունակության բարձրացման հաշվին: Ցույց է տրվել, որ ուղղանկյուն կտրվածքով հաղորդաձողալարի կողային մակերեսի անհարթությունների ստեղծումը գլորմամբ, համաձայն ԳՕՍՏ 21474-75-ի, թույլ է տալիս ուղղանկյուն կտրվածքի մակերեսը մեծացնել մինչև 40%: Կողային մակերեսի մեծացումը գլորմամբ չի առաջացնում լայնական կտրվածքի մակերեսի փոփոխություն, ուստի հաղորդաձողալարերի կարճ միացման հոսանքի ազդեցության նկատմամբ ջերմակայունությունը չի փոփոխվում: Հաղորդաձողալարի՝ հոսանքով երկարատև տաքացման վերլուծության արդյունքները ցույց են տվել, որ հաստատված ռեժիմում կողային մակերեսի մեծացումը հանգեցնում է ջերմատվության պրոցեսների ինտենսիվացմանը: Հաղորդաձողալարի կողային մակերեսի աճը նորմալ շահագործման պայմաններում ուղեկցվում է ջերմատվության գործընթացների ինտենսիվացմամբ, ինչը հանգեցնում է կամ գերտաքացման ջերմաստիճանի նվազմանը, կամ, եթե պահպանվեն առավելագույն թույլատրելի գերտաքացման արժեքները, չմեկուսացված հարթ հաղորդաձողալարերի հզորության 1.19 անգամ մեծացմանը: Դա, իր հերթին, թույլ է տալիս երկարատև ժամանակահատվածում հաղորդաձողալարերի հոսաթողունակության աճը կիրառել ավելի փոքր կտրվածքով հաղորդաձողալարերի փոխարեն, ինչը ավելի քան 20%-ով նվազեցնում է այլումինե և պղնձե հարթ էլեկտրական լարերի քաշը մեկ գծամետրի դեպքում:

Առանցքային բառեր. հաղորդաձողալար, ջերմատվություն, գերտաքացում, անհարթություն, ջերմային հավասարակշռություն:

REDUCING THE METAL CAPACITY OF NON-INSULATED FLAT POWER BUSBAR

N.P. Badalyan, Yu.V. Molokin, I.V. Shilov, R.A. Tonkov, N.E. Chashchin

A method for reducing the metal conductivity of aluminum and copper flat rectangular cross-section, non-insulated high-power electrical conductors is proposed. It has been shown that the formation of irregularities on the lateral surface of rectangular cross-section by rolling in accordance with GOST 21474-75 allows to increase the area of the rectangular cross-section by more than 40%. An increase in the area of the side surface by rolling does not lead to a change in the cross-sectional area, therefore, the thermal stability of electrical

busbars to short-circuit currents does not change. The results of the analysis of the thermal processes of heating busbars with a long-term flowing current showed that in the established mode, an increase in the side surface area leads to an intensification of heat transfer processes. The increase in the lateral surface under normal operating conditions is accompanied by an intensification of heat exchange processes, which leads either to a decrease in the overheating temperature, or, if the maximum permissible overheating values are maintained, to an increase in the power of non-insulated flat conductors 1.19 times, which, in turn, allows the use of conductors with a smaller cross-section for a long time, reducing the weight of aluminum and copper flat electrical wires per linear meter by more than 20%.

Keywords: wire, heat transfer, overheating, unevenness, thermal equilibrium.