

УДК 621.3.01

А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, Э.К. Урбах, В.А. Промзелев

Исследование электрических параметров жесткого токоподвода руднотермических печей

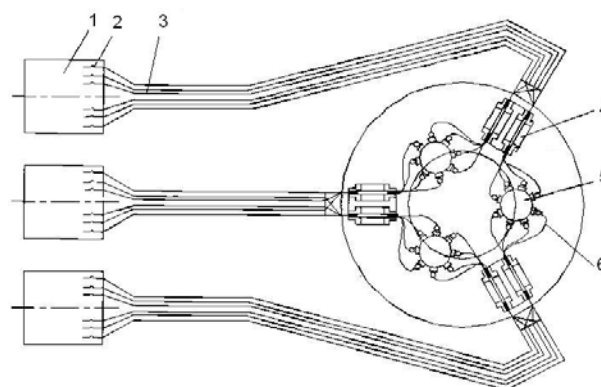
Предложен новый метод расчета активного и индуктивного сопротивлений шихтованных пакетов руднотермических электропечей. Метод разработан на основе регрессионного анализа результатов исследования зависимости активного и индуктивного сопротивлений шихтованных пакетов от их геометрических размеров, взаимного расположения и способа перешихтовки. В качестве инструмента исследования использовано численное моделирование с применением специализированного программного обеспечения. Результаты численного моделирования сравнивались с аналогичными результатами, полученными по традиционной методике.

Ключевые слова: руднотермическая печь, шихтованные пакеты проводников прямоугольного сечения и трубошин, активное сопротивление, индуктивное сопротивление, численное моделирование, программный комплекс ANSYS, регрессионный анализ.

Цель исследования

Современные мощные руднотермические печи в конструкции вторичного токоподвода имеют жесткий неподвижный участок (рис. 1), выполняемый в виде пакета прямоугольных шин или водоохлаждаемых трубошин. Зачастую он является самым протяженным из всех участков короткой сети. Параметры короткой сети оказывают большое влияние на технико-экономические показатели работы печи: коэффициент мощности, симметрию нагрузки фаз, удельный расход электроэнергии, электрический КПД и т.д. По проводникам короткой сети протекают весьма большие токи промышленной частоты, которые создают вокруг проводников сильные магнитные поля. Вследствие этого большое значение приобретают такие явления, как поверхностный эффект, эффект близости, неравномерное распределение тока по отдельным проводникам, перенос мощности между отдельными проводниками и фазами и др.

Рис. 1. Схема цепи электропитания руднотермической печи: 1 – трансформатор; 2 – компенсаторы; 3 – жесткий неподвижный токоподвод; 4 – гибкий токоподвод; 5 – электрод; 6 – трубки электрододержателя



Реактивное сопротивление короткой сети в значительной степени ухудшает электрические показатели печи и приводит к загрузке источников ее питания большой реактивной мощностью. Активное сопротивление вторичного токоподвода определяет величину электрического КПД печи.

С целью снижения индуктивного сопротивления жесткие участки коротких сетей (позиция 3 рис. 1) по возможности выполняются сбиблированными, т.е. проводники максимально сближаются с противоположным направлением тока. На практике бифилиция осуществляется перешихтовкой проводников в пакете. Применяемые варианты перешихтовки проводников в прямоугольном и трубчатом шинопакетах приведены на рис. 2 и 3. Видно, что максимальную степень бифилиции для прямоугольных шин обеспечивает вариант рис. 2, а, а для трубчатого шинопакета – вариант рис. 3, б. Поэтому здесь будут приведены результаты именно этих вариантов, хотя исследованы все, представленные на рис. 2 и 3.

Существующая на данный момент методика [1] была разработана на основе математического аппарата и программного обеспечения, существовавшего до 1980-х годов. Практика ее использова-

ния показывает, что индуктивное сопротивление еще можно рассчитать при некотором упрощении геометрии. При расчете же активного сопротивления возникает существенная неточность в определении поправочных коэффициентов.

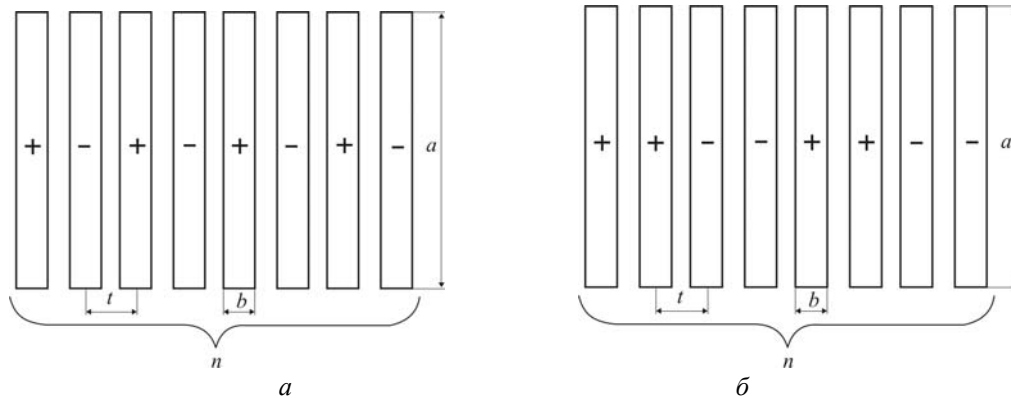


Рис. 2. Варианты перешихтовки шинопакета из прямоугольных шин

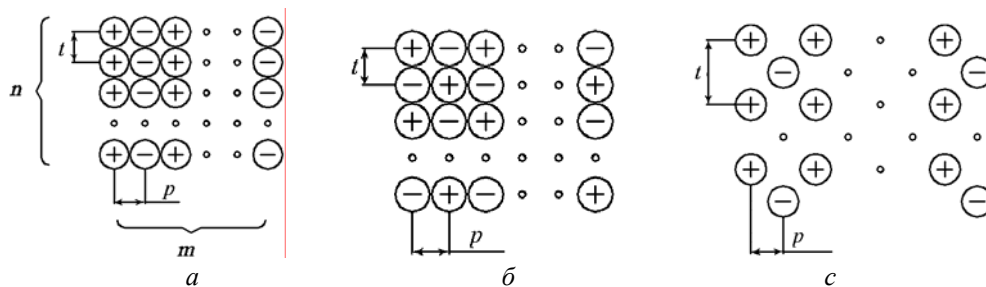


Рис. 3. Варианты перешихтовки пакетов трубошин:

a – коридорный, *б* – шахматный, *в* – коридорный со смещением по вертикали

Метод решения задачи

В настоящий момент разработан ряд прикладных программ, базирующихся на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитное поле. В настоящей работе использовался прикладной пакет ANSYS Multiphysics v 11.0 [2]. Процесс создания модели в ANSYS и расчета по ней был запрограммирован на языке APDL, поддерживаемом системой ANSYS. Это позволило параметризовать задание исходных данных при построении модели и организовывать циклические расчеты большого числа вариантов.

Выполнен сравнительный анализ полученных результатов численного моделирования и рассчитанных по традиционной методике. Следует отметить, что результаты расчета активного сопротивления дает только метод численного моделирования. Сравнение показывает, что количественные различия, полученные по традиционной методике и численному моделированию, составляют от 10 до 35%.

Результаты исследования и их анализ

При исследовании прямоугольных шинопакетов варьировались: количество шин ($n = 4, 8, 12$), межцентровое расстояние ($t = 0,02; 0,03; 0,04$ м), высота шины ($a = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ м), толщина шины ($b = 0,01; 0,012$ м). Результаты исследования приведены на рис. 4 и 5.

При исследовании пакетов медных трубошин (наружный диаметр 50 мм, толщина стенки трубы 10 мм) варьировались: количество проводников в вертикальных и горизонтальных рядах $n = 1, 2, \dots, 8$ и $m = 2, 3, \dots, 8$, расстояния между горизонтальными и вертикальными рядами $t = 0,055 \pm 0,1$ м и $p = 0,055 \pm 0,1$ м. Результаты приведены на рис. 6 и 7.

Как показали расчеты, в любом шихтованном пакете активное и индуктивное сопротивления уменьшаются с увеличением количества проводников в пакете (см. рис. 4, 6). Такое поведение сопротивлений связано с увеличением количества параллельно соединенных проводников.

В рассматриваемых вариантах перешихтовки увеличение расстояния между проводниками приводит к увеличению индуктивного сопротивления вследствие уменьшения степени бифиляции пакета (см. рис. 5, *б* и 7, *б*).

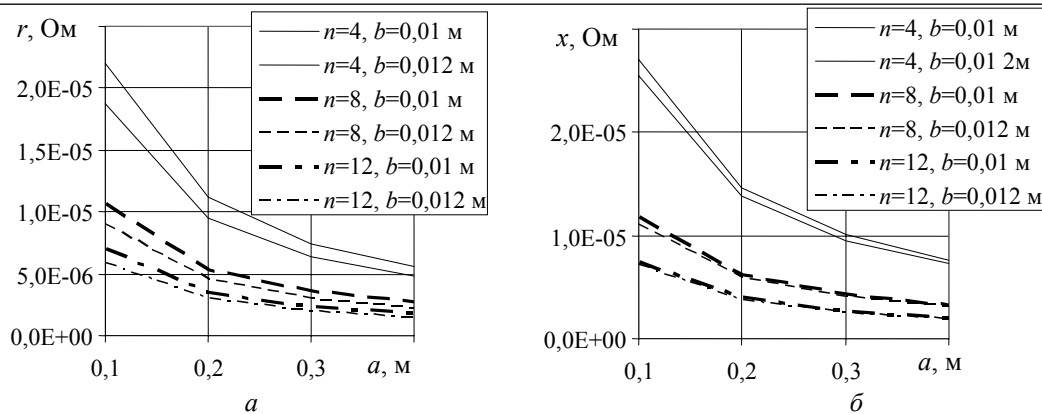


Рис. 4. Зависимость активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений шинопакета от высоты шин при изменении толщины шин b и числа проводников n для варианта перешихтовки рис. 2, a ($t = 0,03$ м)

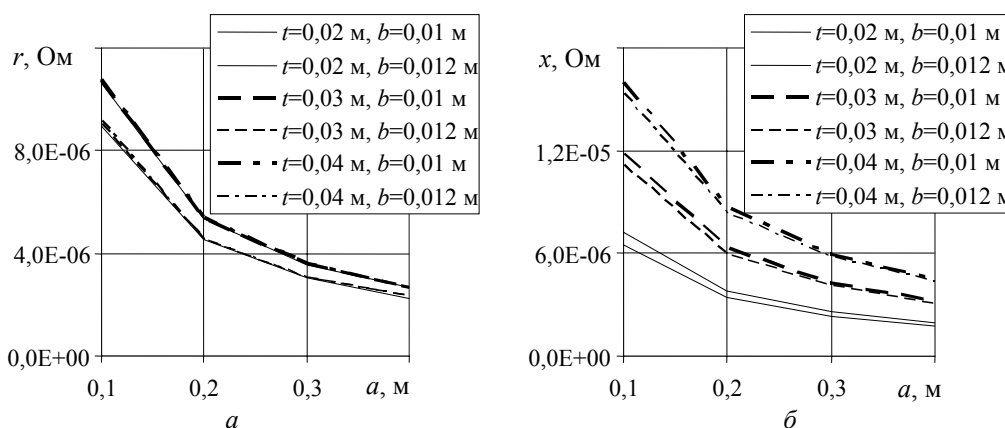


Рис. 5. Зависимость активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений шинопакета от высоты шин при изменении толщины шин b и межцентрового расстояния t для варианта перешихтовки рис. 2, a ($n = 8$)

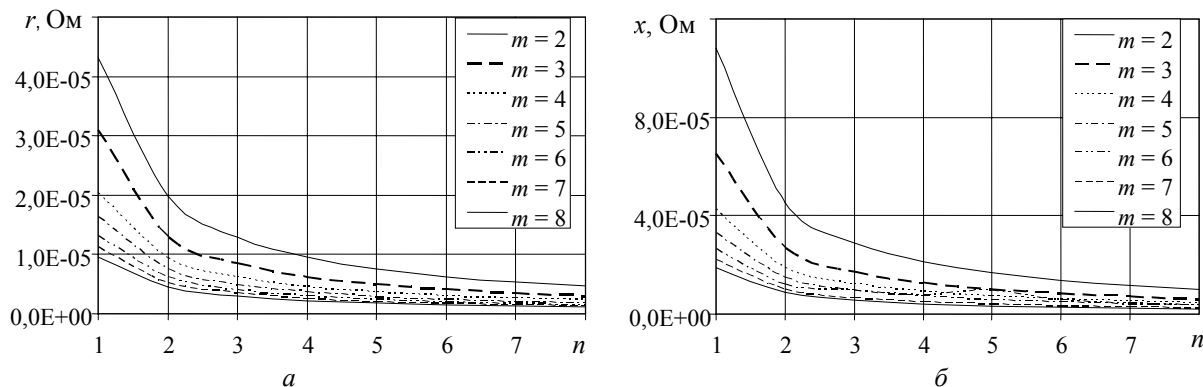


Рис. 6. Зависимость активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений трубчатого шинопакета при изменении числа трубок n в вертикальном ряду при фиксированных значениях числа трубок m в горизонтальном ряду ($t = 0,08$ м, $p = 0,06$ м)

Согласно методике [1], активные сопротивления обоих вариантов рис. 2 должны быть равны вследствие одинаковости геометрии системы. Однако же полученные значения активного сопротивления для этих вариантов перешихтовки не совпадают. Напрашивается вывод о том, что методика [1] при расчете активного сопротивления не учитывает неравномерности распределения тока по проводникам шинопакета и разности фаз между отдельными проводниками.

Следует отметить, что при всех рассмотренных сочетаниях исходных данных прямоугольных шинопакетов и при наиболее применяемом соотношении для пакетов трубок ($n \geq 6$ и $m \geq 2$) активное сопротивление соизмеримо с индуктивным сопротивлением, хотя принято считать, что активное сопротивление настолько мало, по сравнению с индуктивным сопротивлением, что его можно не учитывать.

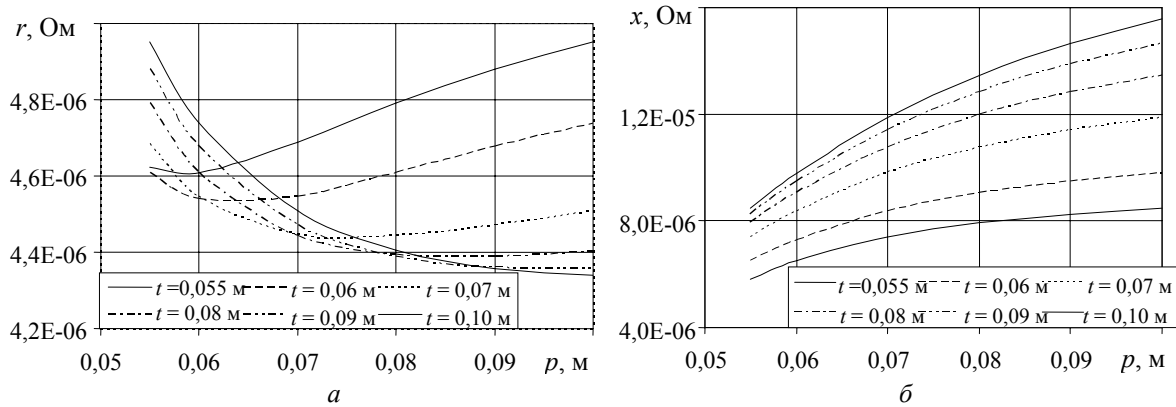


Рис. 7. Зависимость активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений трубчатого шинопакета при изменении горизонтального расстояния p между трубошинами при фиксированных значениях вертикального расстояния t между трубошинами ($n = m = 4$)

Из рис. 5, а видно, что с увеличением расстояния между рядами проводников в пакете t , активное сопротивление не изменяется. Это связано с тем, что расстояние между шинами намного меньше размера сторон шин, которыми они обращены друг к другу. Изменение расстояния между шинами в рассматриваемых пределах не изменяет влияния эффекта близости.

Рисунок 7, а показывает, что при варианте рис. 3, б активное сопротивление минимально при равенстве горизонтального и вертикального расстояний между центрами проводников.

Предложения по созданию методики расчета сопротивлений шихтованных пакетов проводников

Результаты данного исследования были аппроксимированы зависимостями, позволяющими достаточно точно и просто проводить расчеты активного и индуктивного сопротивлений шихтованных шинопакетов. На основе таких зависимостей предполагается создать инженерную методику расчета параметров шинопакетов руднотермических электропечей. Обработка результатов по методикам регрессионного анализа [3] позволила получить эмпирические формулы вида

$$R(\text{или } X) = b_0 \cdot n^{b_n} \cdot m^{b_m} \cdot p^{b_p} \cdot t^{b_t}, \text{ Ом/м}, \quad (1)$$

для трубчатого пакета и

$$R(\text{или } X) = b_0 \cdot n^{b_n} \cdot a^{b_a} \cdot b^{b_b} \cdot t^{b_t}, \text{ Ом/м}, \quad (2)$$

для пакета прямоугольных шин, описывающие результаты серий численных экспериментов. Качество описания эмпирической формулой оценивалось коэффициентом детерминированности r_2 , который нормирован от 0 до 1 и определяется на основе сравнения фактических значений функций и значений, получаемых по эмпирической формуле.

Процесс расчета в таком случае сводится к подготовке исходных данных, подстановке их в формулу и получению результата.

В таблице для примера представлены коэффициенты регрессионного уравнения (1) для пакета прямоугольных шин.

Коэффициенты для расчета активных и индуктивных сопротивлений жесткого токопровода из прямоугольных проводников

Способ перешихтовки	R/X	b_0	b_n	b_a	b_b	b_t	r_2
Чередование полуфаз	R	$1,552 \cdot 10^{-7}$	-1,0566	0,01235	-0,9916	-0,9144	0,99
	X	$2,44 \cdot 10^{-4}$	-0,9188	-0,3185	18,85	2,711	0,99

Работа выполнена по интеграционному проекту в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, заявка 7.1230.2011.

Литература

1. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: справ. изд./ Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.

2. ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com>, свободный (дата обращения: 20.04.2011).

3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. школа, 1988. – 239 с.

Алиферов Александр Иванович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского гос. тех. университета (НГТУ)

Тел.: 8 (383-3) 46-30-32

Эл. почта: alif@ngs.ru

Бикеев Роман Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных электротехнологических установок НГТУ

Тел.: 8 (383-3) 46-30-32

Эл. почта: bikeev@ngs.ru

Горева Людмила Павловна

Канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных электротехнологических установок НГТУ

Тел.: 8 (383-3) 46-30-32

Эл. почта: elterm@ngs.ru

Урбах Эрих Кондратьевич

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник

Института теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе

Тел.: 8 (383-3) 30-80-92

Эл. почта: elterm@ngs.ru

Промзелев Владислав Алексеевич

Аспирант каф. автоматизированных электротехнологических установок НГТУ

Тел.: 8 (383-3) 46-30-32

Эл. почта: elterm@ngs.ru

Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P., Urbakh E.K., Promzelev V.A.

Investigation of electrical parameters of unbladed rigid current contact jaws of ore-thermal furnaces

The new method of calculation of active and inductive resistance of unbladed bus-bars package of ore-thermal furnace is offered. The method is developed on a base of a research results regression analysis of dependence of pure resistance and inductive reactance of unbladed bus-bars packages on their geometrical sizes, a relative positioning and unblad variants. As the research tool a numerical modeling with application of the specialized software is used. Numeric simulation results have been compared with similar results given by the traditional method.

Keywords: an ore-thermal furnace, a rectangular bus-bars package and tubular bus-bars package, a pure resistance, a inductive reactance, a numerical modeling, the program complex ANSYS, a regression analysis.