

II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.315:621.3.025

Канд. техн. наук С. Т. Ярымбаш, канд. техн. наук И. М. Килимник,
канд. техн. наук Д. С. Ярымбаш

Запорожский национальный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ГЛАВНЫХ ШИННЫХ ПАКЕТОВ СЕКЦИЙ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Предложена математическая модель взаимосвязанных электротепловых процессов в главных шинных пакетах печей графитации переменного тока. Проведена оптимизация взаимного расположения шин, обеспечивающая снижение добавочных потерь.

Ключевые слова: математическая модель, короткая электрическая сеть, главный шинный пакет, электромагнитное поле, теплопередача, токораспределение, активные потери, реактивное сопротивление.

Короткая электрическая сеть является одной из важнейших составляющих электротехнических комплексов печных установок. Она связывает низковольтные выводы печных и компенсирующих трансформаторов с печью. Влияние короткой сети на характеристики электротехнического комплекса печей графитации весьма значительно, особенно при условии их работы на переменном токе [1]. Для мощных печей графитации параметры короткой сети относятся к основным факторам, определяющим электрические и технико-экономические показатели работы комплекса в целом. Правильный выбор конструктивного исполнения, формы и сечения проводников, их взаимного расположения и способа охлаждения имеет первостепенное значение для энергоэффективной работы графитировочной печи.

Для реализации задачи непрерывного энергоснабжения группы печей, составляющих секцию, монтируется главный шинный пакет (ГШП) [2]. ГШП обеспечивает работу всех графитировочных печей секции. Он является наиболее протяженной и нагруженной частью вторичного токопровода. ГШП обладает незначительным активным сопротивлением, но зато большим реактивным, что оказывает существенное влияние на КПД и электрические характеристики электропечного комплекса. Высокое реактивное сопротивление ГШП приводит к росту падения напряжения между питающими трансформаторами и печью, а также к перегрузке сети из-за необходимости компенсации большой реактивной мощности. В связи с этим создание рациональной конструкции главного шинного пакета является сложной, актуальной и важной научной и инженерной задачей.

С учетом значительных капитальных затрат на разработку новых конструкций ГШП секции печей графитации или на его реконструкцию возникает потребность в проведении исследований электрических и тепловых параметров, распределения токов в шинах на основе математических моделей. Это может существенно сократить затраты на технические мероприятия по энергосбережению и ускорить внедрение новых разработок в производство.

Цель работы – исследование электротепловых режимов работы различных конструктивных исполнений главного шинного пакета на основе математического моделирования с использованием сопряженной модели электромагнитных процессов в формулировках векторного магнитного потенциала и процессов теплопередачи.

Процессы преобразования электрической энергии переменного тока в энергию электромагнитного поля и тепловую в шинах ГШП описываются электротепловой моделью [3], включающей уравнения переменного электромагнитного поля в частотной формулировке для амплитуд векторного магнитного потенциала и уравнения теплопередачи в пространственной системе «главный шинный пакет (проводники) – охлаждающая и окружающая среда».

$$\begin{cases} j\omega\sigma_j(\theta_j)\mathbf{A}_j + \nabla\left[\left(\mu_0\mu_j(\theta_j)\right)^{-1}\nabla\times\mathbf{A}_j\right] = 0, \mathbf{B}_j = \mathbf{rot}(\mathbf{A}_j), \\ \rho(\theta_j)_j C_p(\theta_j)_j (\mathbf{w}_j, \nabla\theta_j) - \nabla\left(\lambda(\theta_j)_j \nabla\theta_j\right) = Q(\theta)_j, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma(\theta)$, $\mu(\theta)$ – удельная электропроводность, относительная магнитная проницаемость материалов;

ω – угловая частота; $\rho(\theta)$, $\lambda(\theta)$, $C_p(\theta)$ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность; \mathbf{W}_j – скорость охлаждающего газа во внутреннем закрытом (при водяном охлаждении) или внешнем открытом контурах охлаждения

$|\mathbf{W}|_j = 0, \forall j \neq 2; |\mathbf{W}|_j = W_{\theta}, j = 2; Q_j$ – удельная мощность источников тепла, обусловленная резистивным и индукционным нагревом проводников вихревыми токами; $j = 1, 2, 3$ – соответственно, области медного или алюминиевого проводников, охлаждающей и охлаждающей среды.

Система уравнений электротепловой модели (1) замыкается условиями Кулона и соответствующими граничными условиями [4].

На границах сопряжения сред с разными электромагнитными свойствами

$$\mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0, \forall i, k \in (1,3), i \neq k, \quad (2)$$

магнитной изоляции

$$\mathbf{A}_k = 0, \quad (3)$$

сопряжения сред с различными теплофизическими свойствами

$$\mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = \mathbf{n}_k \cdot (\lambda(\theta_k)_k \nabla \theta_k), \forall i, k \in (1,3), i \neq k, \quad (4)$$

теплообмена

$$\mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = Q_0 + \alpha(\theta_{oc}, \theta_i, w) \cdot (\theta_{oc} - \theta_i), \forall i \in (1,3), \quad (5)$$

где i, k – индексы, обозначают внутренние и внешние границы подобластей в расчетной области; oc – окружающая среда; \mathbf{n} – вектор нормали к граничной поверхности подобласти.

Математическая реализация электротепловой модели (1)–(5) может быть существенно упрощена, если, с учетом соотношения геометрических размеров главного шинного пакета, перейти от пространственной формулировки к плоскопараллельной [3, 4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \bar{\mathbf{k}} \cdot A_z, \quad \mathbf{grad}(\theta) = \bar{\mathbf{i}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \bar{\mathbf{j}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}, \\ \mathbf{B} &= \bar{\mathbf{i}} \cdot B_x + \bar{\mathbf{j}} \cdot B_y, \quad \mathbf{H} = \bar{\mathbf{i}} \cdot H_x + \bar{\mathbf{j}} \cdot H_y \end{aligned} \quad (6)$$

при

$$\varepsilon_{Cu} = 1, \quad \varepsilon_{Al} = 1, \quad \mu_{Cu} = 1, \quad \mu_{Al} = 1. \quad (7)$$

Чтобы в расчетах электротеплового состояния шин ГПП исключить систему уравнений Эйлера для вектора скорости охлаждающего воздуха, принималось допущение, что преобладающую роль в теплообмене играет вертикальная составляющая скорости w_y , а остальными w_x, w_z можно пренебречь и рассматривать

$$\mathbf{w} \approx \bar{\mathbf{j}} \cdot w_y.$$

Для определения скорости потока воздуха в каналах между шинами ГПП применялась теория подобия и обобщенные критериальные уравнения для режимов свободной и вынужденной конвекции. Выделялись два условия [5]:

$$\text{Re}_{джс} \frac{\Delta}{b} \text{Pr}^{5/6} > 15,$$

когда необходимо учитывать изменение скорости свободной конвекции по высоте b шины ГПП, и

$$\frac{\Delta}{b} > 0,067 \text{Re}_{джс} \text{Pr}^{5/6}$$

когда скорость свободной конвекции вдоль шины ГПП стабилизируется.

Переход от одного режима к другому соответствует условию равенства подъемных сил f_g и сил вязкости f_{μ} .

Следовательно,

$$\frac{g\beta(t_{uu} - t_{oc})\delta\Delta}{2\nu w_y} \approx 1,$$

где $\delta = \lambda_{\text{air}}/\alpha_k$ или $\delta = \Delta/2Nu$.

Это позволяет оценить скорость движения воздуха в канале между шинами ГПП в режиме свободной конвекции соотношением вида [6]:

$$w_y \approx \frac{g\beta(t_{uu} - t_{oc})\delta\Delta}{2\nu} \quad (8)$$

и применять электротепловую модель (1)–(7) как для режима вынужденной конвекции, так и для режима свободной конвекции воздуха, охлаждающего ГПП.

При моделировании электротепловых режимов работы учитывались температурные зависимости удельного сопротивления, плотности, удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности. Для расчетов электромагнитного поля и поля температур применялся универсальный метод конечных элементов, который реализован в структуре средств COMSOL Multiphysics, что не требует дополнительных затрат времени и ресурсов на разработку алгоритмов, программ и их отладку. С учетом нелинейности системы уравнений электротепловой модели и граничных условий (1)–(8) проводились итерационные вычисления с варьированием амплитудных значений токов в проводниках ГПП, скорости свободной конвекции воздуха, коэффициентов теплообмена нагретой поверхности шин с окружающей средой на каждом шаге итерации.

Внешние границы расчетной области располагались на таком удалении от шин, чтобы можно было пренебречь их влиянием на электромагнитное поле и на температурный режим ГПП. Плотность распреде-

ления конечных элементов увеличивалась в области ГШП. Это позволило снизить требования к ресурсам вычислительной техники и обеспечить точность результатов расчета.

Расчеты проводились для шихтованных двухрядных и однорядных ГШП с медными и алюминиевыми шинами прямоугольного сечения, а также двухрядных ГШП с трубчатыми шинами коридорного и шахматного исполнения.

Электромагнитное поле ГШП с двумя рядами шин имеет характерные особенности (рис. 1, а). Оно практически отсутствует между рядами ГШП. Его интенсивность со стороны крайних шин почти в 2 раза ниже, чем у однорядных. Это весьма благоприятно влияет на уменьшение потерь в стальных конструкциях, окружающих ГШП. Потери в стали могут быть снижены в 4 раза по сравнению с однорядными ГШП при одинаковой токовой нагрузке. Уменьшение ширины ряда шин за счет снижения их толщины с 20 мм до 12 мм и ширины канала между ними снижает максимум векторного магнитного потенциала на 8,6 % и, следовательно, снижает максимум индукции и напряженности магнитного поля, а также добавочных потерь в ГШП.

Максимальное значение плотности тока в алюминиевых шинах при токе 100 кА достигает 2,003 А/мм², а в медных шинах – 2,773 А/мм². Таким образом, максимальная плотность тока в медных шинах больше в 1,384 раза при меньшем в 1,66 раза сечении по сравнению с алюминиевыми шинами. Распределение токов в шинах симметрично относительно середины ширины пакета, действующие значения токов, за исключением крайних шин, практически одинаковы. Относительное уменьшение активных потерь в медных шинах ГШП составляет 4,9 % по отношению к алюминиевым шинам.

Распределение температур в расчетной области ГШП показывает, что превышение температуры шин верхнего ряда над температурой окружающей среды на 21–28 % выше, чем нижнего (рис. 1, б). Это связано, прежде всего, с тем, что верхние шины охлаждаются потоком воздуха, который подогрет нижним рядом шин. В ГШП из медных шин зона высокого нагрева более локализована из-за меньших размеров каналов и шин. Однако максимальные значения температуры отличаются незначительно – на 1–3 °С. Температурный режим работы однорядных ГШП с медными шинами толщиной 10 мм (до 70 °С [7]) можно обеспечить при включении принудительного обдува со скоростью воздушного потока 5,71 м/с и его температурой на входе в ГШП не выше 35 °С, что увеличивает эксплуатационные затраты.

Следует отметить, что масса двухрядного ГШП с медными шинами будет в 1,98 раза больше, что потребует соответствующего усиления металлоконструкций и затрат для его монтажа. Кроме того, общая стоимость медных шин более чем 5 раз превышает сто-

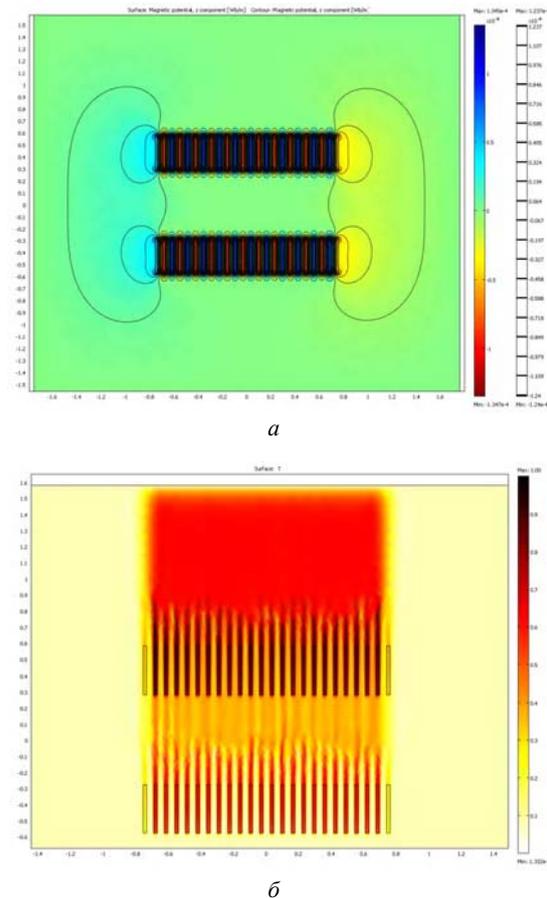


Рис. 1. Электромагнитное (а) и температурное (б) поля двухрядного ГШП

имость алюминиевых. Масса однорядного ГШП с медными шинами толщиной 10 мм будет на 17 % меньше, чем у двухрядного алюминиевого, однако общая стоимость медных шин будет больше в 2 раза, активные потери – в 2,5 раза.

Анализ существующих конструкций ГШП с водяным охлаждением показал, что наибольшее распространение получили ГШП так называемого «коридорного» исполнения. Это обуславливается удобством монтажа отводов ГШП, хотя ГШП «шахматного» типа обладают лучшими характеристиками по потерям и реактивности.

Так как шины одной полярности расположены в ряд, то электромагнитные поля ГШП коридорного типа с двумя рядами шин существенно отличаются от таких же ГШП с шахматным расположением медных труб. Максимальное значение векторного магнитного потенциала для коридорного расположения труб в 2,08 раза больше шахматного (рис. 2, а, б). При этом магнитное поле вытесняется в область металлоконструкций, на которые устанавливается ГШП (рис. 2, а), что вызовет повышенный нагрев вихревыми токами. Отводы ГШП коридорного типа должны размещаться с внешней стороны каждого из рядов вне зоны действия сильных электромагнитных полей. Если в зоне силь-

ных электромагнитных полей будут располагаться металлоконструкции ГПП, то это потребует их защиты экранами или использования дорогостоящей маломагнитной стали, удорожающей такую конструкцию.

При шахматном расположении труб магнитное поле локализуется в достаточно узкой области, прилегающей к рядам ГПП, но вытесняется за крайние шины. Даже для шахматного расположения труб (рис. 2, б) максимум векторного магнитного потенциала более чем в 3 раза превышает аналогичное значение для двухрядного ГПП с алюминиевыми шинами (рис. 1, а). Это будет вызывать увеличение их индуктивного сопротивления.

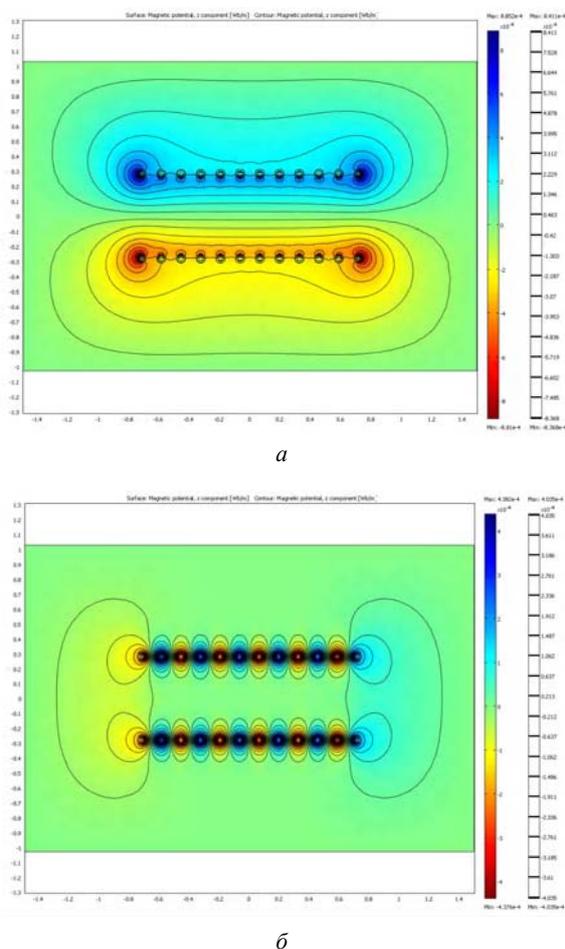


Рис. 2. Распределение векторного магнитного потенциала в двухрядных ГПП с медными трубами (60/30 мм):
а – коридорного типа, б – шахматного типа

Распределение токов в шинах также определяется типом расположения шин (рис. 3). При коридорном расположении действующие значения токов в шинах постепенно уменьшаются от края ряда к его середине с 6873 А до 3653 А. Для шахматного типа расположения шин крайние медные трубы наименее нагружены. Действующие значения токов увеличиваются от края к середине каждого ряда труб с 3274 А до 4542 А.

Тип расположения медных труб в рядах ГПП определяет совместное влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на распределение плотности тока в шинах (рис. 4). При шахматном расположении, распределение плотности тока в вертикальном сечении труб подобно и симметрично (рис. 4, б, г). Они отличаются по модулю, меньшие значения – от 3,5 А/мм² до 5,5 А/мм² – для крайних шин (рис. 4, б), большие – 4,8 А/мм² до 7,6 А/мм² – для средних шин (Рис. 4, г). В горизонтальном сечении средних шин плотность тока выше, она изменяется от 5,2 А/мм² до 10 А/мм² (рис. 4, в), сохраняя общий симметричный характер распределения. В горизонтальном сечении крайней трубы наблюдается сильно выраженная неравномерность плотности тока (рис. 4, а).

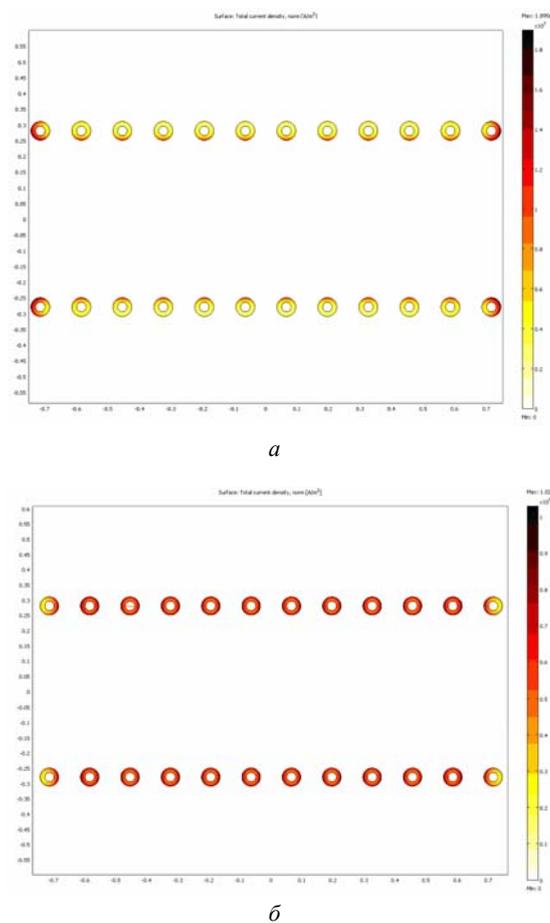


Рис. 3. Распределение плотности тока в двухрядных ГПП с медными трубами (60/30 мм):
а – коридорного типа, б – шахматного типа

На внешней образующей с внешней стороны ГПП она составляет 4,05 А/мм², на половине толщины стенки трубы – 2,7 А/мм², а на внутренней поверхности, которая охлаждается водой – 2,85 А/мм² (рис. 4, а). На внешней стороне, направленной вовнутрь ряда ГПП, плотность тока увеличивается от внутреннего радиуса к наружному с 4,6 А/мм² до 9,2 А/мм² (рис. 4, а).

Для всех сечений трубы рост плотности тока от внутреннего радиуса к наружному обуславливается, прежде всего, поверхностным эффектом. Большие значения плотности тока в горизонтальном сечении по сравнению с вертикальным вызваны эффектом близости к токам противоположного направления в смежных трубах.

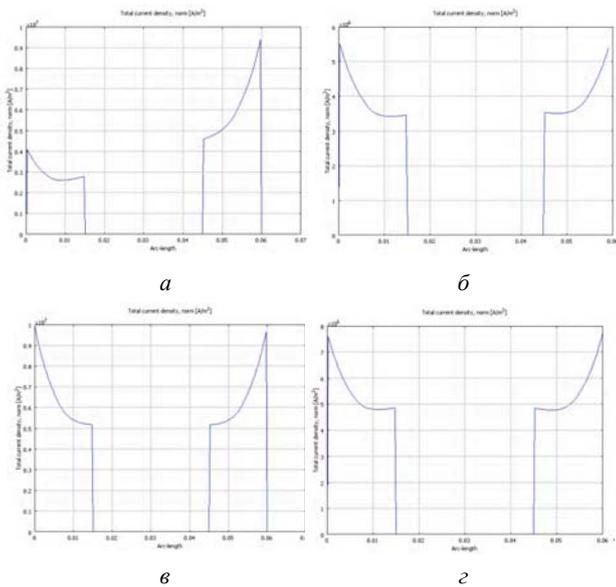


Рис. 4. Распределение плотности тока в сечениях медных труб (60/30 мм) двухрядных ГШП шахматного типа: а – горизонтальное сечение крайних труб, б – вертикальное сечение крайних труб, в – горизонтальное сечение средних труб, г – вертикальное сечение средних труб

При коридорном расположении труб симметричное распределение плотности тока наблюдается только в горизонтальном сечении средних труб (рис. 5, в). Плотность тока уменьшается от внешней поверхности к внутренней с $5,0 \text{ A/mm}^2$ до $3,5 \text{ A/mm}^2$, а минимальная плотность тока достигается в середине толщины стенки медной трубы и равна $3,4 \text{ A/mm}^2$.

Распределение плотности токов в остальных сечениях асимметричное: большие значения – на наружном, меньшие – на внутреннем радиусе (рис. 5, а, б, г), что объясняется влиянием поверхностного эффекта.

Распределение плотности тока по наружной поверхности таких труб неравномерное. Из-за эффекта близости ток вытесняется в сторону более слабого магнитного поля. Поэтому плотность тока в этих областях возрастает до максимальных значений $12,0\text{--}18,0 \text{ A/mm}^2$ (рис. 5), что может вызвать локальный перегрев медных труб, их деформацию и разрушение из-за методичного изменения термонапряженного состояния при работе печей графитации. Увеличение расстояния между трубами ГШП позволяет существенно уменьшить влияние эффекта близости. Активные потери в ГШП с трубошинами в 1,49 раза выше, чем для двухрядного ГШП с алюминиевыми шинами.

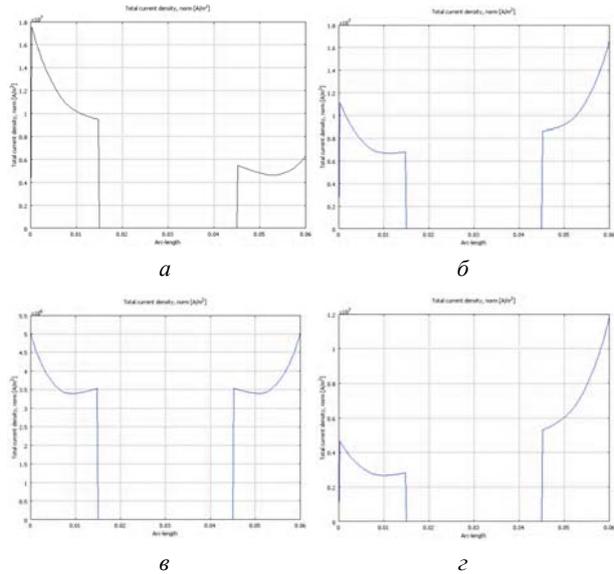


Рис. 5. Распределение плотности тока в диаметральной сечении медных труб (60/30 мм) двухрядных ГШП коридорного типа:

а – горизонтальное сечение крайних труб, б – вертикальное сечение крайних труб, в – горизонтальное сечение средних труб, г – вертикальное сечение средних труб

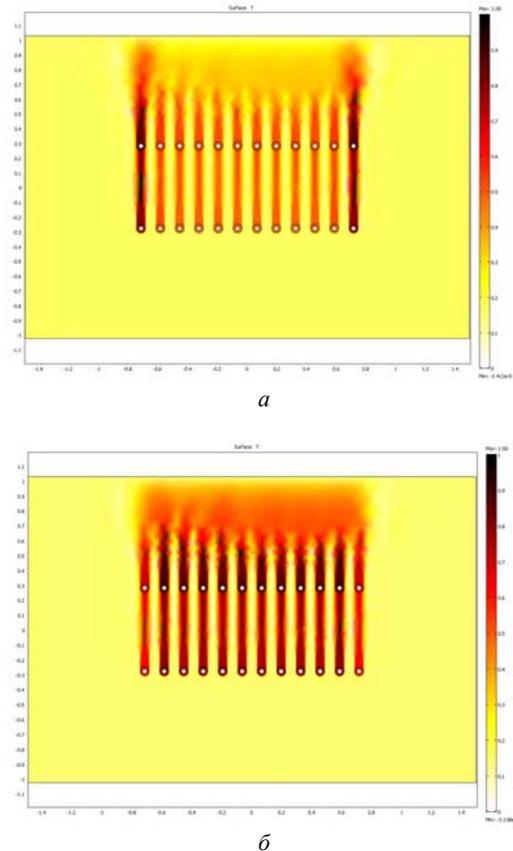


Рис. 6. Распределение безразмерных температур в расчетной области двухрядных ГШП:

а – коридорное расположение труб, б – шахматное расположение труб

Поля температур для каждого типа ГШП с медными трубами и водяным охлаждением определяются распределением мощности тепловыделения в поперечном сечении пакета шин. Для ГШП коридорного типа мощность тепловыделения в крайних шинах выше, следовательно, выше интенсивность теплоотдачи от них и температура (рис. 6, а). В ГШП шахматного типа этот эффект проявляется для средних труб пакета (рис. 6, б). Допустимые температуры шин обеспечиваются интенсивным водяным охлаждением ГШП.

Выводы

Численным методом была проведена оптимизация расположения шин ГШП на основе метода упорядоченного перебора по критерию минимума активных потерь, обеспечивающая уменьшение добавочных потерь до 12,5 %.

На основе результатов численного моделирования сопряженных электромагнитных и тепловых полей, анализа электротепловых режимов работы рассмотренных конструктивных исполнений ГШП установлено, что лучшими техническими характеристиками обладают ГШП с плоскими шинами. Однорядные ГШП с плоскими шинами требуют принудительного воздушного охлаждения только при достижении 80–100 % максимальной мощности графитации. ГШП с трубами обладают высокой реактивностью и увеличенным почти в 2 раза падением напряжения. Хотя масса такого ГШП на 40 % меньше массы двухрядного ГШП с алюминиевыми шинами, стоимость медных шин будет в 1,5 выше. Кроме того, необходимо учесть допол-

нительные затраты, связанные с водоподготовкой и работой системы охлаждения ГШП, которая должна обеспечивать скорость охлаждающей воды не ниже 0,8 м/с. При этом объемный расход воды составит 195 м³/час.

Оптимизация расположения шин ГШП по критерию минимума активных потерь обеспечивает снижение добавочных потерь до 12,5 % по отношению к существующей конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данцис Я. Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Я. Б. Данцис, Г. М. Жиров. – М. : Металлургия, 1987. – 320 с.
2. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов: Учебное пособие для вузов / Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1990. – 238 с.
3. Идентификация характеристик системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора методами математического моделирования / [С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш, Д. А. Литвинов] // Материалы МНТК «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков, 2010. – С. 320–324.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов – М. : Высшая школа, 2003. – 317 с.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М., «Энергия», 1977. — 344 с.
6. Исаченко В. П. Теплопередача. Учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сухомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
7. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. – Харьков : ООО Форт, 2010. – 704 с.

Надійшла до редакції 28.12.2011

Ярымбаш С.Т., Килимник І.М., Ярымбаш Д.С. Особливості електротеплових режимів головних шинних пакетів секцій печей графітації змінного струму

Запропоновано математичну модель взаємозв'язаних електротеплових процесів у головних шинних пакетах печей графітації змінного струму. Проведено оптимізацію взаємного розташування шин, що забезпечило зменшення додаткових втрат.

Ключові слова: математична модель, коротка електрична мережа, головний шинний пакет, електромагнітне поле, теплопередача, струморозподіл, активні втрати, реактивний опір.

Yarymbash S., Kylymnyk I., Yarymbash D. Features of electrothermal conditions of main bus packets of AC graphitizing furnace sections

The authors propose a mathematical model of interrelated electrothermal processes in main bus packets of AC graphitizing furnaces. Optimal relative position of buses has been determined reducing stray-load loss.

Key words: mathematical model, short electric supply lines, main bus packet, electromagnetic field, heat transfer, current distribution, active loss, reactance.