

П. П. Чердовских

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В ВАННЕ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

При выборе размеров рабочего пространства, расположения и сечения электродов руднотермической печи большое значение имеют общие картины распределения тока, позволяющие определить плотность тока в отдельных точках ванны, а также части тока, стекающие с отдельных участков поверхности одного электрода на два другие и на подину. Однако определение значений токов по линиям тока, построенным по эквипотенциалам, возможно только для равномерного, плоскопараллельного и плоскомеридианного поля. Поле трехфазной печи значительно сложнее вследствие сложности формы рабочего пространства, различия фаз приложенных напряжений и неоднородности сред. Построение картин линий поля, позволяющих определить указанные величины, в этом случае затруднительно.

Несмотря на это, в электротермии широко применяется метод построения поверхностей и линий равных модулей потенциалов (р. м. п.) [1, 2, 3, 4]. Линии, проведенные нормально к этим поверхностям, принимаются за линии тока. На первый взгляд может показаться, что эти поверхности и линии не имеют смысла. Тем более, обоснования этого метода в литературе нет. Однако применение этих картин в электротермии дает результаты, совпадающие с практикой.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы объяснить смысл линий р. м. п. и обосновать другой метод, позволяющий более строго и точнее находить распределение тока в определенных сечениях модели. Совместное применение этих методов позволит более полно исследовать распределение тока в ванне печи.

МОДЕЛЬ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ И ПОВЕРХНОСТИ Р.М.П.

В работах по исследованию распределения тока в руднотермических печах на моделях неоднородность малопроводящих сред печи (шихта, шлак и т. д), а также дуги не учитывались. Так как удель-

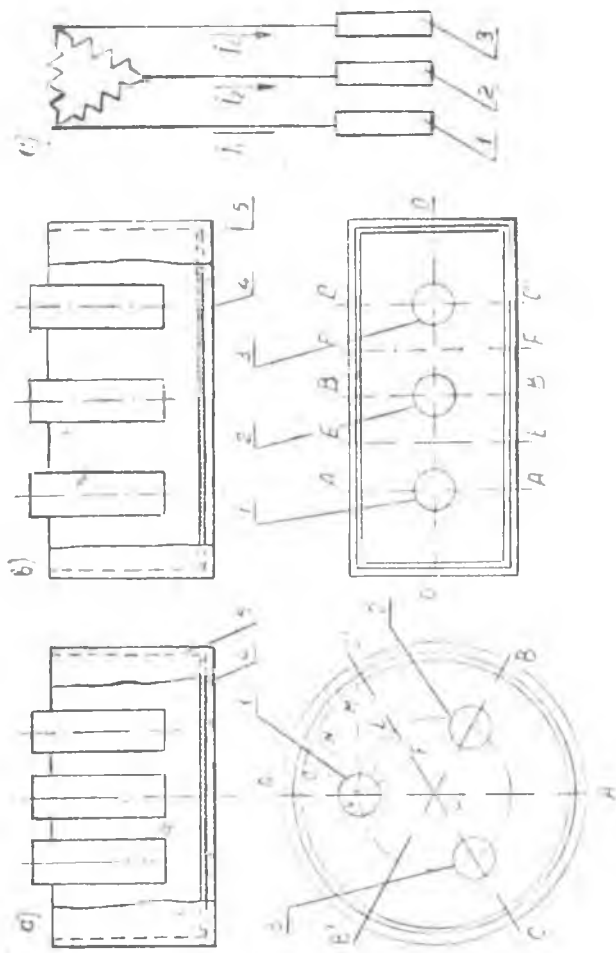


Рис. 1. Эскизы моделей круглой а и прямоугольной в руднестермических печей и схема включения электродов во вторичную обмотку трансформатора с:
 1, 2, 3 — электроды; 4 — лист, имитирующий поверхность подины или расплава; 5 — непроводящий сосуд, имитирующий футеровку; электродлит, имитирующий малопроводящие среды, и подвеска электродов не показаны.

ное сопротивление малопроводящих сред ρ несоизмеримо больше ρ электродов и проводящей подины, а также проводящего расплава поверхности электродов и поверхность подины или расплава можно считать эквипотенциальными. Напротив, поверхность боковой стенки печи, выполненной из непроводящего огнеупорного кирпича, можно считать совпадающей с линиями тока, так же, как и верхнюю поверхность малопроводящих сред. При этих условиях в малопроводящих средах можно пренебречь поверхностным эффектом и токами смещения и считать поле автоматическим.

Электроды и поверхность проводящего расплава или подины должны моделироваться металлом, малопроводящие среды — электролитами, а футеровка — изоляционным материалом. На рис. 1 представлены эскизы моделей круглой и прямоугольной печей и схема включения электродов.

Для получения картин линий р. м. п. в круглой печи рассматривается обычно $1/6$ объема пространства модели, ограниченного плоскостями, проходящими через ось печи и, например, радиусы OA и OC' . Это пространство делится плоскостями, проходящими через ось электрода 1 и, например, линии KF , KL и т. д. В каждом таком сечении строят линии р. м. п. без учета фазы, считая потенциал листа 4 нулевым. По этим линиям, как в плоскомеридианном поле, строят нормальные к ним линии, которые принимаются за линии тока. В других аналогичных частях объема указанные картины будут подобны. По этим картинам определяют плотность тока в различных точках, определяют части тока, стекающие с отдельных участков поверхности электрода на подину и на другие электроды.

В прямоугольной печи рассматривается обычно $1/4$ объема, ограниченного плоскостями, проведенными нормально к подине через оси $O-O$ и $B-B$, и строят такие картины для сечений, проходящих через оси среднего и крайнего электродов.

Смысл линий р. м. п. можно показать на экспериментах с помощью плоских моделей сталеплавильных печей [1], на которых легко непосредственно наносить линии р. м. п., что трудно сделать на моделях рис. 1. Плоские модели сталеплавильных печей представляют из себя тонкие листы немагнитного металла, форма которого подобна зеркалу расплавленной стали. К точкам, соответствующим контактам дуг с металлом, припаивались проводники. С помощью реостатов, включенных последовательно с проводниками, в моделях устанавливалась симметричная нагрузка.

На рис. 2 представлены модели круглой и эллиптической печи и схемы их включения.

Как известно, в каждой точке поля трехфазного тока конец вектора плотности тока описывает эллипс или другую замкнутую кривую.

Эксперименты на моделях рис. 2 показывают, что при определенном выборе точки нулевого потенциала для соответствующих схем и расположений контактов модули нормальных составляющих

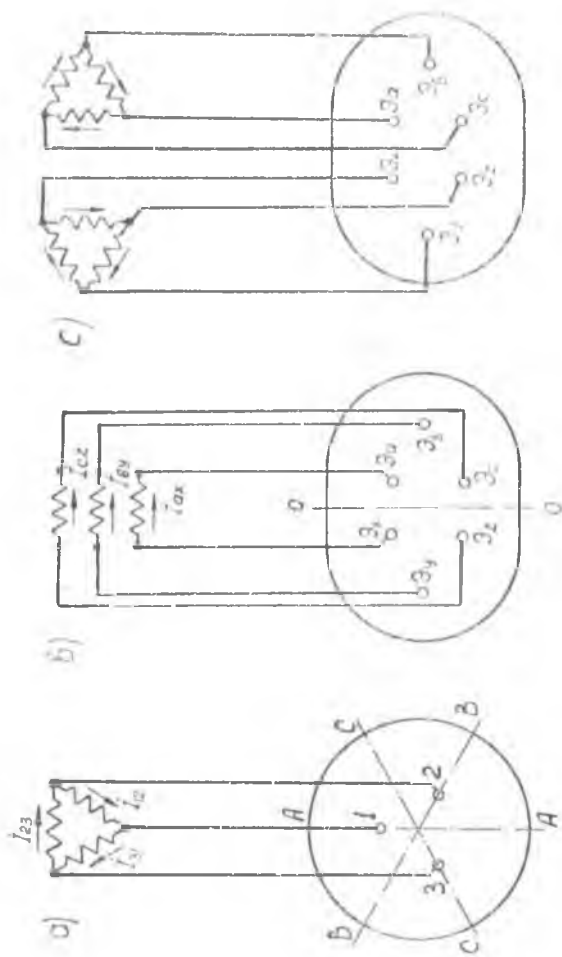


Рис. 2. Плоские модели сталеплавильных печей: а — круглой; б и в — эллиптической.

плотности тока к линиям р. м. п., в каждой точке этих линий имеют максимальное значение, а модули тангенциальных составляющих — минимальное значение.

Для этого точка нулевого потенциала должна быть взята на пересечении эквипотенциалей, которые являются осями симметрии полей, полученных при протекании однофазных токов через соответствующие электроды. Если указанных эквипотенциалей нет или они не пересекаются, то этой точки не существует и линии р. м. п. теряют упомянутые свойства. В модели рис. 2а таким условиям удовлетворяет точка O , которая находится на пересечении осей симметрии $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$. При протекании фазных токов I_{12} , I_{23} и I_{31} через указанные на рисунке контакты получим симметричные относительно этих осей однофазные поля, которые дают результирующее трехфазное поле. Линии р. м. п., построенные относительно другой точки, теряют указанные свойства. В модели эллиптической печи положение упомянутой точки, кроме этого, зависит от схемы включения. При включении модели по схеме 2в линии р. м. п., построенные относительно любой точки, находящейся на $O-O$, удовлетворяют указанным свойствам. В этом случае однофазные поля при протекании токов I_{ax} , I_{by} , I_{cz} будут симметричны относительно $O-O$. Если включить модель по схеме 2с, то точки, удовлетворяющей этим условиям, не будет и трехфазное поле не будет обладать указанными свойствами. В последнем случае однофазные поля при протекании однофазного тока через контакты $\mathcal{E}_a - \mathcal{E}_b$, $\mathcal{E}_b - \mathcal{E}_c$, $\mathcal{E}_x - \mathcal{E}_y$, $\mathcal{E}_y - \mathcal{E}_z$ несимметричны.

Чтобы получить поверхности р. м. п., удовлетворяющие указанным свойствам, в модели круглой руднотермической печи, точку нулевого потенциала необходимо выбирать на оси печи, являющейся линией пересечения плоскостей симметрии однофазных полей. (Эта линия соответствует точке O в модели рис. 2 а). Так как ось печи пересекает поверхность круга 4 (рис. 1 а), являющуюся эквипотенциалью, то поверхности р. м. п., построенные относительно любой точки этого круга, обладают упомянутыми свойствами. Эксперименты на модели рис. 1 а подтверждают, что нормальные составляющие плотности тока к поверхностям р. м. п. имеют максимальное значение модуля, а тангенциальные — минимальное.

В прямоугольной печи поверхности р. м. п. не удовлетворяют этим свойствам в полной мере, так как при включении однофазного тока к среднему и крайнему электродам поле несимметрично. Однако в значительной части пространства эти свойства практически сохраняются.

Следует отметить, что в местах, где густота линий р. м. п. сильнее, нормальные составляющие плотности тока к ним, больше. В непосредственной близости к электродам значение тангенциальных составляющих плотности тока к поверхности и линиям р. м. п. малы по сравнению с нормальными составляющими. Поэтому около электродов поле в какой-то мере можно считать однофазным плос-

комеридианным. Удаляясь от электродов, нормальные и тангенциальные составляющие плотности тока становятся соизмеримыми.

Следовательно, как в круглой, так и в прямоугольной печи густота линий р. м. п. характеризует значение наибольших составляющих плотности тока, а линии, проведенные нормально к ним, показывают направление этих величин. Поэтому картины поверхностей и линий р. м. п. могут качественно характеризовать распределение тока в ванне руднотермической печи, что позволяет делать определенные практические выводы.

Определение более точных значений плотности тока с их помощью, а также частей тока, стекающих с поверхности электрода на подину (I_{Γ}) и на два другие электрода (I_{Δ}), затруднительно. Особенно затруднительно определение токов $I_{\Gamma k}$ и $I_{\Delta k}$ являющихся аналогичными составляющими тока I_k , стекающего с элемента k поверхности электрода.

Разработка способа, позволяющего определить токи I_{Δ} , I_{Γ} , $I_{\Gamma k}$, $I_{\Delta k}$ и найти их распределение в определенных поверхностях, значительно расширит возможности исследования распределения тока.

Эпюры плотности тока в модели круглой печи. Более строго распределение тока с учетом фазы могут дать эпюры нормальных составляющих комплекса плотности тока δ_n , построенные для некоторых сечений. Эпюры δ_n по поверхности сектора $B'O'C'$ дают распределение тока I_{Γ} , стекающего с электрода 1 на два другие только через подину. Аналогичные эпюры в сечениях, проходящих через ось печи и радиусы OB' и OC' покажут распределение тока I_{Δ} , стекающего с электрода 1 и на два другие непосредственно через малопроводящие среды, минуя подину. В электротермии ток I_{Γ} называют током, текущим по схеме звезда, а ток I_{Δ} — током текущим по схеме треугольник.

Подобные эпюры позволят найти распределение аналогичных составляющих $I_{\Gamma k}$, $I_{\Delta k}$ тока I_k , стекающего с участка k поверхности электрода, распределенного симметрично относительно плоскости, проходящей через ось печи и ось электрода.

Эта возможность следует из симметрии поля, которая имеет место при симметрии приложенных напряжений, а, следовательно, токов, протекающих через электроды. Рассматривая $1/3$ объема ванны, ограниченного плоскостями, проходящими через ось печи и радиусы OB' и OC' , можно отметить, что модули соответствующих составляющих плотности тока в точках, симметричных относительно плоскости, проходящей через ось печи и радиус OA , равны. Модули нормальных составляющих δ_n в точках OA , име-

ют наибольшее значение, а в точках радиусов OB' и OC' — наименьшее. Фазы δ_n в точках OA равны фазе тока электрода I , а в точках, симметричных относительно OA отличаются от фазы этого тока на одинаковую величину. В точках OB' и OC' фазы δ_n равны промежуточному значению фаз токов смежных электродов. Фазы нормальных составляющих δ_n к плоскости, проходящей через ось печи и радиус OB' одинаковы, и меньше фазы тока первого электрода на 30° .

Фазы δ_n , нормальных к плоскости, проходящей через ось печи и радиус OC' , тоже одинаковы, но больше фазы тока первого электрода на 30° . Аналогичная картина имеет место и в других частях объема.

Суммируя произведения δ_n на элементы площадок в круге 4 под электродом I , можно убедиться, что сумма будет равна I_{Δ} , когда площадь равна площади сектора $B'OC'$. При уменьшении угла $B'OC'$ часть I_{Δ} не учитывается, а при увеличении — учитывается часть I_{Δ} другого электрода. Следовательно, ток, падающий на сектор $B'OC'$ является током I_{Δ} , а эпюра δ_n в этом секторе дает распределение I_{Δ} на подине. Применяя принцип непрерывности тока, можно считать, что аналогичные эпюры в сечениях, проходящих через ось печи и радиусы OB' и OC' дадут распределение I_{Δ} .

Для определения величины составляющих $I_{\Delta k}$ и $I_{\Delta k}$ и построения эпюр δ_{nk} от этих токов в рассматриваемых плоскостях необходимо изготовить специальные электроды. На рис. 3 представлен один из таких электродов. На непроводящий стакан 1 крепятся отдельные участки боковой поверхности 3 и поверхности торца 2 . От каждого участка через крышу 6 сделаны наружу выходы 5 . Участки поверхности электрода разделены изоляционными промежутками 4 .

Деление поверхности электрода на участки и соединение их проводниками, имеющими несоизмеримо меньшее сопротивление, чем сопротивление электролита, не нарушит граничных условий. Поверхность электрода останется практически эквипотенциальной. Включая в провод каждого участка k тарированный шунт, можно компенсационным методом измерить комплекс I_k . Для опре-

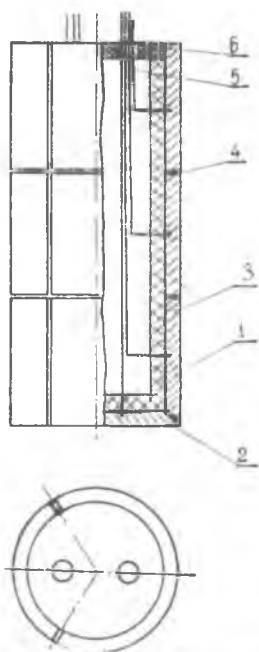


Рис. 3. Электрод модели

деления составляющих $I_{\Delta k}$ и $I_{\Delta k}$ необходимо через соответствующие участки k всех электродов пропустить соответствующие токи, а остальные участки отключить. При непосредственном включении участков к фазным проводам тока I_k возрастут. Сохранение их значений можно осуществить путем включения последовательно с участками реостатов. Это дает возможность найти распределение δ_{nk} в секторе $B'OC'$ и подсчитать $I_{\Delta k}$, а также найти δ_{nk} в плоскостях, проходящих через ось печи и радиусы OB' и OC' и подсчитать $I_{\Delta k}$.

Участок k можно включить непосредственно в фазные провода и измерить I'_k , построить эпюры δ'_{nk} и подсчитать $I'_{\Gamma k}$ и $I'_{\Delta k}$. Реальные величины определяются путем пересчета по формулам:

$$\delta_{nk} = \frac{I_k}{I'_k} \delta'_{nk} \quad I_{\Delta k} = \frac{I_k}{I'_k} I'_{\Delta k} \quad I_{\Delta k} = \frac{I_k}{I'_k} I'_{\Delta k}.$$

Этот метод вытекает из линейности сред модели и симметрии поля, так как участки k расположены симметрично относительно плоскостей, проходящих через ось печи и оси электродов.

Необходимо отметить, что определение упомянутых токов методом р. м. п. проводится суммированием трубок по тем же плоскостям. Однако, токи $I_{\Delta k}$ и $I_{\Delta k}$ согласно этого метода приходится на определенные участки этих плоскостей. В действительности, как показывают эпюры δ_n , ток $I_{\Delta k}$ распределяется по всей поверхности сектора $B'OC'$, а ток $I_{\Delta k}$ по всем сечениям, проходящим через радиусы OB' и OC' . Правда, значительная часть $I_{\Delta k}$ и $I_{\Delta k}$ приходится все-таки на те участки поверхностей, которые получаются с помощью метода р. м. п.

Следовательно, эпюры δ_n и δ_{nk} в указанных сечениях дают возможность строго, более правильно найти распределение токов I_{Δ} , I_{Δ} , $I_{\Delta k}$, $I_{\Delta k}$ и определить их значение с учетом фазы.

Используя картины линий р. м. п. в точках ванны, расположенных ближе к электродам, где они отражают распределение тока в большей мере, и строя эпюры δ_n и δ_{nk} в упомянутых плоскостях, где линии р. м. п. практически не характеризуют распределение тока, можно составить полное представление о распределении тока по всему объему ванны. Это позволяет более правильно решать практические задачи.

ЭПЮРЫ ПЛОТНОСТИ ТОКА В МОДЕЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕЧИ

С помощью метода р. м. п. в модели прямоугольной печи токи определяются следующим образом. Ток $I_{\Delta 2}$ электрода 2 опреде-

ляется суммированием трубок, сходящихся на часть листа 4, ограниченную линиями $E—E$ и $F—F$, а ток $I_{\Delta 21}$, стекающий на электрод 1, суммированием трубок, падающих на поперечное сечение, проходящее через $E—E$. Аналогично определяются токи $I_{\Delta 1}$, $I_{\Delta 12}$, $I_{\Delta 3}$, $I_{\Delta 32}$, стекающие с электродов 1 и 3. Токи $I_{\Delta 1}$ и $I_{\Delta 3}$ определяются суммированием трубок, падающих на соответствующие крайние участки листа 4, ограниченные линиями $E—E$ и $F—F$. Принимается, что

$$I_{\Delta 12} = -I_{\Delta 21} \text{ и } I_{\Delta 12} = -I_{\Delta 31}.$$

Как и в круглой печи, более строго распределение токов и определение приближенных их значений можно осуществить путем построения эпюр δ_n в соответствующих плоскостях.

Эту возможность подтверждает симметрия поля относительно плоскостей, нормальных к подине и проходящих через оси $O—O$ и $B—B$. Модули соответствующих составляющих плотности тока в точках, симметричных относительно указанных плоскостей, равны.

Фазы нормальных составляющих δ_n к поверхности листа 4 в точках оси $B—B$ совпадают с током I_2 , а в точках симметричных относительно $B—B$ отличаются на одинаковую величину от фазы I_2 . В точках под электродами 1 и 3 фазы δ_n примерно совпадают с фазами соответствующих токов, а в точках линий $E—E$ и $F—F$ равны примерно промежуточным значениям фаз токов смежных электродов. Модули δ_n в точках листа 4 под электродами имеют наибольшее значение, а в точках $E—E$ и $F—F$ наименьшее.

Суммируя произведения δ_n на элементы площадок в плоскости листа под электродом 1, можно заметить, что эта сумма достигнет значения $I_{\Delta 1}$, когда площадка будет ограничена линией $E—E$. Остальная часть тока этого электрода, проходящая через поперечное сечение, опирающееся на $E—E$, равна приближенному значению $I_{\Delta 1}$. Ток $I_{\Delta 3}$ проходит через упомянутое сечение, минуя подину. Аналогичные рассуждения показывают, что построение эпюр δ_n в соответствующих плоскостях дает возможность найти приближенные значения и распределения и других токов с учетом фаз. Следует заметить, что линии $E—E$ и $F—F$ проходят примерно в середине между электродами.

Распределение токов, стекающих с отдельных участков поверхности электрода, и определение их значений может быть также получено с помощью эпюр δ_{nk} в тех же плоскостях. Легче всего это сделать для торца и участков длины поверхности электрода. Естественно, что и в этом случае при включении отдельных участков необходимо токи сохранить такими же, какие они были при полном включении электродов. Это осуществляется с помощью реостатов, как и в круглой печи.

1. В значительной части объема ванны, и особенно около электродов, поверхности и линии р. м. п. характеризуют распределение тока. Однако, определение токов I_{Δ} , I_{Δ} , $I_{\Delta k}$, $I_{\Delta k}$, по которым часто судят о рациональном расположении и сечении электродов, с их помощью затруднительно.

2. Эпюры плотности тока, построенные в сечениях между электродами и по поверхности листа, имитирующего подину, позволяют не только определить значения токов I_{Δ} , I_{Δ} , $I_{\Delta k}$, $I_{\Delta k}$, но и найти их распределение в указанных поверхностях.

3. Совместное применение поверхностей р. м. п. и эпюр плотности тока дают более полное представление о распределении тока по всему объему ванны, что позволяет более правильно подойти к выбору сечения и расположения электродов, а также размеров рабочего пространства печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. С и с о я н Г. А. — Электрическая дуга в электрической печи, Metallurgizdat, Москва, 1961.

2. Г. Ф. П л а т о н о в — Выбор методики изучения распределения мощности в слабопроводящей среде электропечей для прикладных целей «Известия ВУЗов», «Энергетика» № 4, 1959.

3. Е. П. В ы с о ц к и й — Распределение тока шихтовой проводимости трехфазных дуговых ферросплавных печей в зависимости от величины диаметра спада электродов. Кандидатская диссертация, Куйбышев, индустриальный институт, 1955.

4. Д. А. Д и а м и д о в с к и й — Печи цветной металлургии. Metallurgizdat, Москва, 1956.

5. П. П. Ч е р д о в с к и х — Моделирование распределения электрического тока в ванне металла сталеплавильной печи большой емкости. Доклады четвертой Межвузовской конференции по применению физического и математического моделирования в различных отраслях техники. Сборник № 1, Москва, 1962.

Принятые обозначения

- ρ — удельное сопротивление
 O, A, B, C, K, F, L — обозначают точки, через которые проведены линии на чертеже
 A', B', C' — те же буквы, со штрихами
 I_{12}, I_{23}, I_{31} — комплексы фазных токов в плоской модели круглой сталеплавильной печи
 12, 23, 31 — индексы
 $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ — контакты в плоской модели круглой печи
 1, 2 3 — индексы
 I_{ax}, I_{by}, I_{cz} — токи в плоской модели эллиптической печи
 ax, by, cz — индексы
 $\mathcal{E}_a, \mathcal{E}_b, \mathcal{E}_c, \mathcal{E}_x, \mathcal{E}_y, \mathcal{E}_z$ — контакты в плоской модели электрической печи
 a, b, c, x, y, z — индексы
 I_{Δ} — комплекс тока, стекающий со всего электрода и замыкающийся по схеме звезда

- Δ — индекс (звезда)
- I_{Δ} — комплекс тока, стекающий со всего электрода и замыкающийся по схеме треугольник
- Δ — индекс (треугольник)
- I_K — комплекс тока стекающий с участка „K“ поверхности электрода
- k — индекс, означающий номер участка
- $I_{\Delta k}$ — комплекс тока, стекающий с участка k поверхности электрода и замыкающийся по схеме звезда
- $I_{\Delta k}$ — комплекс тока, стекающий с участка k поверхности электрода и замыкающийся по схеме треугольник
- $\Delta k, \Delta k$ — индексы
- δ_n — комплекс нормальной составляющей плотности тока в каком-либо сечении печи
- δ_{nk} — то же при включении участков K поверхности всех электродов
-