

- мов векторного управління асинхронним двигателем / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 2. – С. 16–29.
12. Kubota H. DSP-based adaptive flux observer of induction motor / Kubota H., Matsuse K. and Nakano T. – IEEE Trans. on Industry Applications. – 1993. – Vol. 29, N2. – P. 344–348.
 13. Beguenane R. Induction motor thermal monitoring by means of rotor resistance identification / R. Beguenane, M. E. H. Benbouzid – IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, N3. – P. 566–570.
 14. Franceschini G. A Genetic Algorithm Approach to Design Flux Observer for Induction Servo Motors / Franceschini G., Piazzi A., Tassoni C. – In Proc. IECON '94. Italy, Bologna. Sept., 1994. – 1994. – Vol. 3. – P. 2132–2136.
 15. An extended model of induction machine for failure detection / [S. Ploix, O. Adrot, F. Kratz, C. Iung, J. Ragot]. – Preprints of IFIP / IFAC / IMACS Conf. On Control of Industrial Systems. – 1997. – Vol. 3/3. – P. 55–62.
 16. Душинова Є. В. Новий метод оцінки потокозчеплення та синхронних швидкостей асинхронного двигуна / Є. В. Душинова, А.Є. Казурова, Е. М. Потапенко. – Вісник Кременчуцького державного університету. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Випуск 4/2010, Ч. 2. – С. 37–40.

Стаття надійшла до редакції 17.06.2010

Потапенко Е. М., Душинова Є. В., Казурова А. Є., Деев С. Г. Лінійна динамічна модель асинхронного двигуна з векторним керуванням

Складена проста еквівалентна математична модель для системи векторного керування АД з нелінійної математичної моделлю, що досить точно описує роботу вихідної системи у всіх режимах роботи. Простота та лінійність еквівалентної системи дозволяють синтезувати закони керування вихідної нелінійної системи добре розробленими лінійними методами з істотно меншими витратами часу на моделювання. Чисельне моделювання динаміки вихідної нелінійної та еквівалентної лінійної систем показало добрий збіг перехідних і стаціонарних процесів.

Ключові слова: модель, лінійність, керування.

Potapenko E.M., Dushinova E., Kasurova A., Deev S. The linear mathematical model of induction drive with vector control

The simple equivalent mathematical model for system of vector control of induction drive with the nonlinear mathematical model, precisely enough describing work of initial system in all operating modes was made. Simplicity and linearity of equivalent system allow to synthesise laws of control of initial nonlinear system by well developed linear methods with essentially smaller expenses of time for simulation. Numerical simulation of dynamics initial nonlinear and equivalent linear systems has shown good coincidence of transitive and stationary processes.

Key words: model, linearity, vector control.

УДК 621.365.32:621.3.024

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

Запорожский национальный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПЕЧНОЙ ПЕТЛИ ПЕЧИ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Предложена методика синтеза схемы замещения печной петли печи графитации для оценки токораспределения в ее элементах, активных потерь и показателей энергоэффективности системы. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментом.

Ключевые слова: метод синтеза, печная петля, печь графитации, токораспределение, активные потери, энергоэффективность.

В настоящее время для обновления металлургической промышленности Украины требуется поиск новых решений в области энергоресурсосбережения. Произ-

водство электродной продукции является весьма энергозатратным, а ее конкурентоспособность на внутреннем и мировом рынках напрямую зависит от уровня

© С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш 2010 р.

качества и энергоемкости. Поэтому, с учетом тенденции роста тарифов на электроэнергию, необходимо уделять особое внимание поиску новых путей повышения энергоэффективности.

В технологическом цикле производства электродной продукции наиболее энергозатратным является технологический процесс графитации, который, как правило, проводится в печах графитации Ачесона [1]. Продолжительность этого процесса достигает 30 – 40 часов, а электрическая мощность – 10–11 МВт. Подвод этой мощности к керну осуществляется через печную петлю, которая подключается к главному шинному пакету и включает торцевые и боковые ошиновки.

Существующие конструктивные исполнения ошиновок печей графитации переменного тока не удовлетворяют в полной мере требованиям энергоэффективности и снижения затрат электроэнергии [1]. Известные работы в этой области относятся к исследованию отдельных элементов технологического комплекса и не позволяют в достаточном объеме оценить влияние эксплуатационных, конструктивных и технологических факторов, что затрудняет разработку высокоэффективных технических решений [2, 3].

С учетом больших капитальных затрат на реконструкцию сильноточных сетей графитировочных печей возникает потребность в проведении исследований их электрических параметров и распределения токов в ошиновках на базе математических и масштабных моделей, что может существенно сократить затраты на разработку уточненной методики оценки энергоэффективности при модернизации ошиновок промышленных печей. При этом важным требованием следует считать согласованность подходов, как для масштабной модели, так и для промышленной печи. Таким образом, имеется возможность существенно сократить затраты и ускорить внедрение новых разработок в производство.

Целью работы является синтез схемы замещения для уточненной оценки токораспределения в элементах печной петли печи графитации переменного тока.

Исследования и анализ электрических процессов в элементах короткой сети печи графитации переменного тока при графитации электродных изделий (рис. 1) целесообразно выполнять на основе адекватно отображающей ее схемы замещения. При синтезе схемы замещения печной петли торцевые и боковые ошиновки печи графитации можно представить как систему сложных пространственных электрически и магнитно связанных контуров, которые образованы шинами прямоугольного и кольцевого сечения (рис. 2), что обуславливает необходимость определения, кроме активных сопротивлений элементов печной петли, их собственной и взаимной индуктивности (рис. 2).

При этом участки печной петли (отводов от главного шинопакета – индекс «гшп», ошиновок переднего торца – индекс «пт» и заднего торца – индекс «зт», бокового шинопакета – индекс «бшп» или керна – индекс

«кern») могут быть представлены соответствующими ветвями схемы, в которые включаются активные сопротивления (R), индуктивные сопротивления самоиндукции ($j\omega L$) и источники э.д.с. (\dot{E}), наведенные переменными электромагнитными полями других токоведущих элементов ошиновок и пропорциональные действующим значениям токов в них.

Для нахождения параметров схемы замещения применение численных методов для реализации пространственных полевых моделей весьма затруднительно из-за значительных затрат времени и вычислительных ресурсов, что обусловлено существенными различиями геометрических размеров и электромагнитных свойств керна печи и элементов ошиновок печной петли. Это требует применения упрощенных подходов, обладающих достаточной точностью и простотой описания модели, например, на основе комбинации методов участков и средних геометрических расстояний, эффективность и точность которых подтверждается известными исследованиями [4, 5].

Для оценки параметров схемы замещения, как показано в работе [6], можно принять следующие допущения: магнитная проницаемость проводников и окружающей их среды одинакова и не зависит от напряженности магнитного поля; значения потокосцепления само- и взаимоиндукции пропорциональны обуславливающим их токам; индуктивность и взаимоиндуктивность контуров не зависит от токов и определяется их формой и геометрическими размерами, магнитной проницаемостью проводников и окружающей их среды, а также характером распределения тока по сечению проводников; собственную индуктивность контура можно считать величиной существенно положительной; значения взаимной индуктивности, обуславливающие воздействие двух контуров друг на друга, равны и зависят от расположения контуров в пространстве.

В соответствии с этими допущениями токи в контурах печной петли (рис. 1) можно представить как совокупность элементарных токов di (токовых нитей) [6]. Тогда магнитный поток Φ , сцепляющийся с какой-либо из токовых нитей di' , можно определить как совокупность потоков взаимной индукции, которые создаются другими нитями di'' и установить величину потокосцепления контура [7]:

$$\Psi = \frac{1}{i} \iint \overline{M} di'' di', \quad (1)$$

где \overline{M} – взаимная индуктивность нитей di' и di'' .

Собственная индуктивность контура n и взаимная индуктивность контуров m и n описываются соотношениями вида

$$L_n = \Psi_{L,n} / i_n; \quad (2)$$

$$M_{m,n} = \Psi_{M,n} / i_m; \quad M_{n,m} = \Psi_{M,m} / i_n;$$

$$M_{m,n} = M_{n,m}; \quad m \neq n, \quad (3)$$

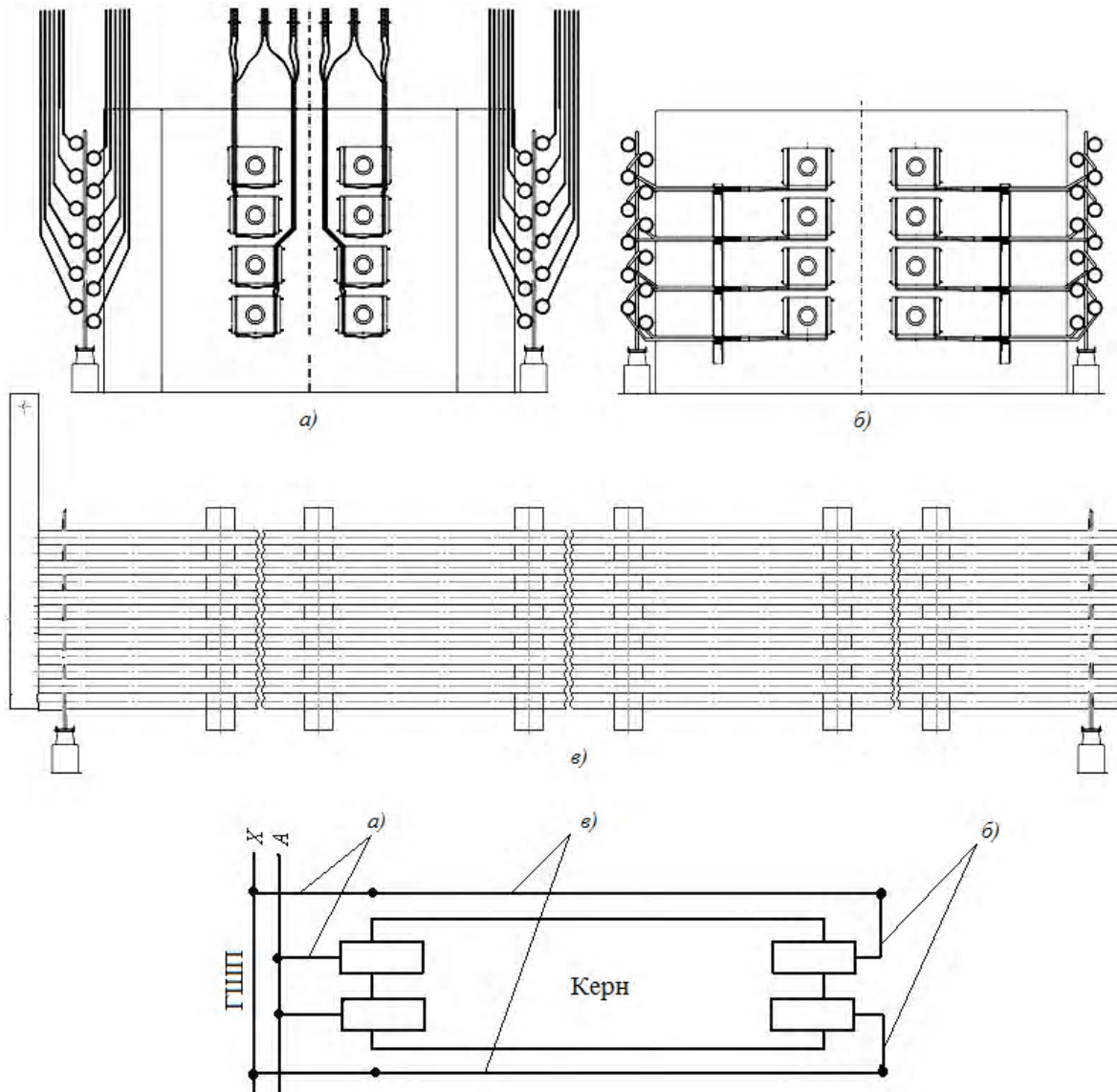


Рис. 1. Печная петля печи графитации переменного тока:

a – ошиновка переднего торца и шины от ГПП к боковому шинопакету, *б* – ошиновка заднего торца, *в* – боковой шинопакет

где $\Psi_{L,n}$ – потокосцепление самоиндукции контура n ,
 $\Psi_{M_m}, \Psi_{M_n}, i_m, i_n$ – потокосцепления взаимной индукции и токи в контурах m и n .

Поэтому соотношения (2), (3) с учетом (1) могут быть преобразованы к виду

$$L_n = \frac{1}{i_n} \int di' \int \overline{M} di'', \quad (4)$$

$$M_{m,n} = M_{n,m} = \frac{1}{i_m i_n} \int di' \int \overline{M} di'', \quad (5)$$

где, в соответствии с [6],

$$\overline{M} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{dl' dl''}{D} \cos \vartheta, \quad (6)$$

dl' и dl'' – элементы длины нитей токов i и i'' ; D и ϑ – расстояние и угол между этими элементами.

Для численной реализации соотношения (6) целесообразно использовать метод участков [6], когда элементы контура в ошиновке печной петли разбиваются на отдельные участки, как это показано на примере плети ошиновки переднего торца (рис. 3).

В этом случае при определении собственной и взаимной индуктивности ошиновок двойной интеграл в

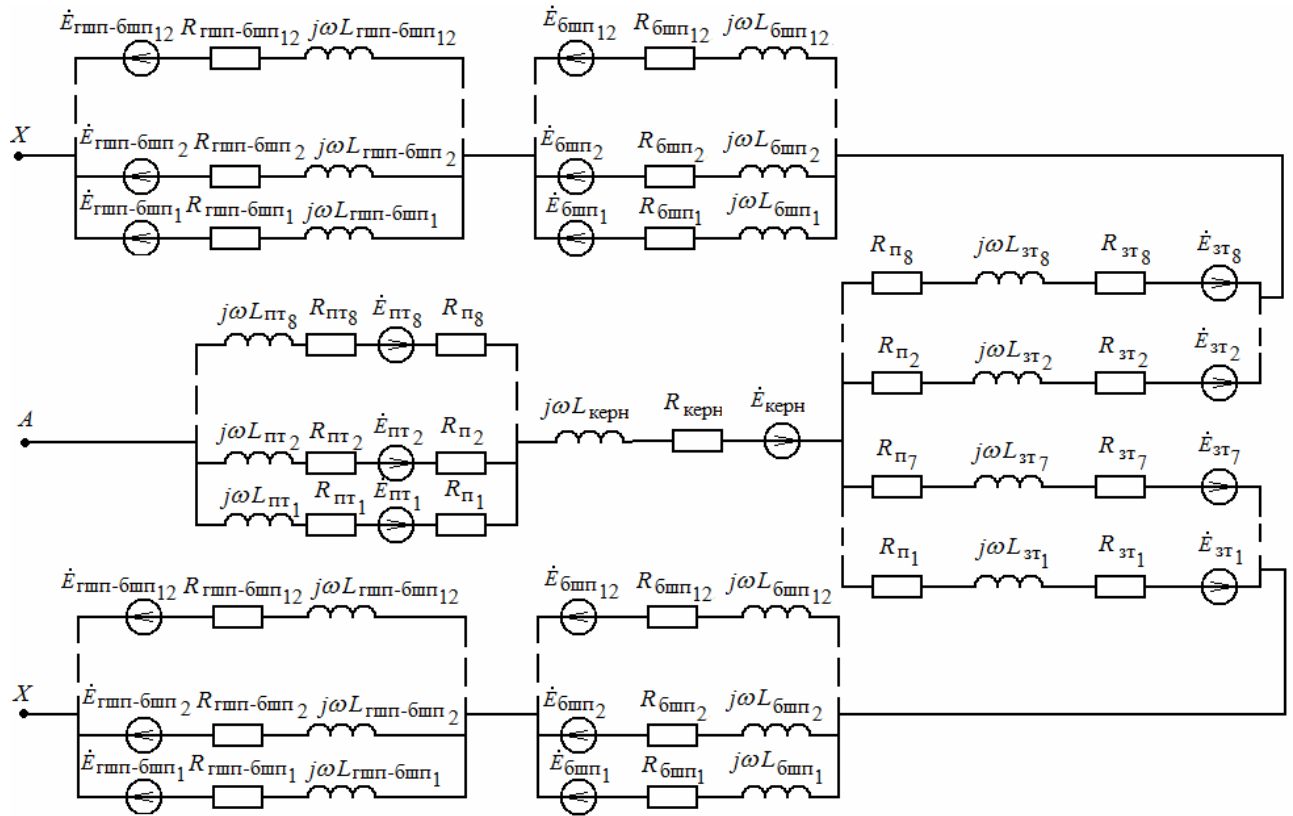


Рис. 2. Схема замещения печной петли

соотношении (6) можно заменить двойной суммой интегралов по этим линейным участкам. Таким образом, собственная индуктивность n -го контура ошиновки, состоящего из n_i участков, будет определена в виде [6]

$$L = \sum_{k=1}^{n_i} L_k + \sum_{k=li=1}^{n_i} \sum_{k=li=1}^{n_i} M_{ki}, \quad (7)$$

а взаимная индуктивность двух (m, n) контуров, состоящих из n_i и m_i участков

$$M = \sum_{k=li=n_i+1}^{n_i} \sum_{k=li=n_i+1}^{n_i+m_i} M_{ki}. \quad (8)$$

Определение собственной индуктивности и взаимной индуктивности линейных участков осуществляется на основе принципа среднегеометрических расстояний [8], когда собственная индуктивность шин постоянного сечения (при неравномерном распределении плотности тока) может быть представлена как взаимная индуктивность соответствующих эквидистантных нитей, отстоящих на расстояние друг от друга, равно периметру поперечного сечения шины от самой себя. Взаимная индуктивность двух плоских эквидистантных контуров принимается равной взаимной индуктивности двух тонких проводников, расположенных на кратчайшем расстоянии, идентичном среднему геометрическому рас-

стоянию для ближайших поперечных сечений контуров [6].

Таким образом, согласно [8]

$$L_k = l_k F_k \cdot 10^{-7}, \quad (9)$$

где $F_k = f(g_k/l_k)$,

$$g_k = k(b_k + c_k) \quad (10)$$

– для участков торцевых и боковых ошиновок прямоугольного сечения $(b \times c)$,

$$g_k = r_n + \exp \left[-\frac{r_{внк}^4}{(r_{нк}^2 - r_{внк}^2)^2} \ln \frac{r_{нк}}{r_{внк}} + \frac{1}{4} \frac{3r_{внк}^2 - r_{нк}^2}{r_{нк}^2 - r_{внк}^2} \right] \quad (11)$$

– для трубчатых участков боковых ошиновок с внутренним $r_{вн}$ и наружным r_n радиусами, l_k – длина k -го участка [6].

Расчеты ЭДС взаимной индуктивности участков торцевых и боковых ошиновок выполняются с учетом особенностей их взаимного расположения в пространстве. Если участки боковых шинопакетов параллельны друг другу, то участки ошиновок переднего и заднего торцов могут располагаться в пространстве как параллельно, так и под углом друг к другу (рис. 4).

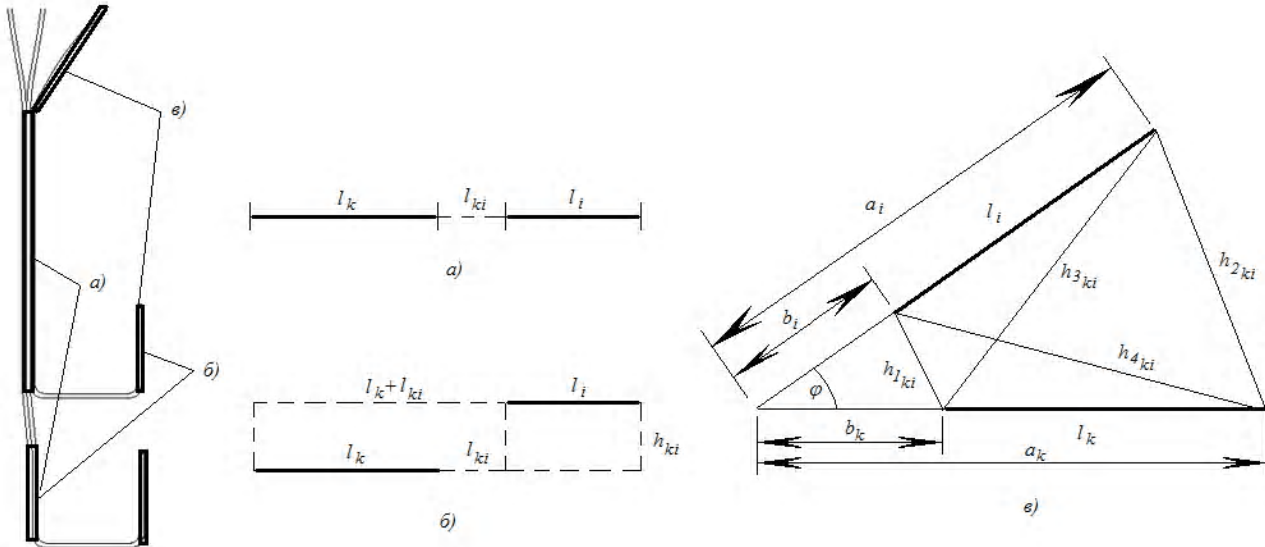


Рис. 3. Варианты (случаи) расположения участков ошинок:

а – на одной прямой; б – параллельно друг другу, в – под углом друг относительно друга

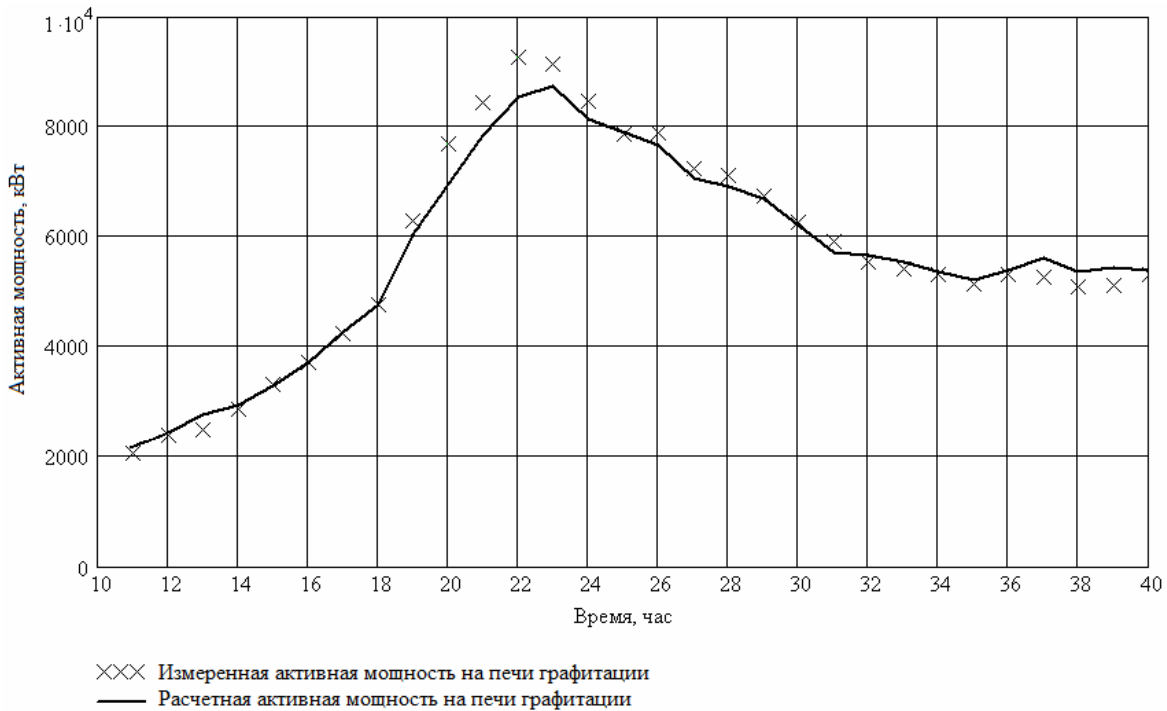


Рис. 4. Активная мощность на печи графитации

В первом случае для расчета взаимной индуктивности между двумя параллельными участками печной пегли (рис. 3, а) можно применить соотношение вида [8]

$$M_{ki} = \frac{\mu_0}{4\pi} [(l_k + l_{ki} + l_i) \ln(l_k + l_{ki} + l_i) + \sqrt{(l_k + l_{ki} + l_i)^2 + h_{ki}^2} - (l_k + l_{ki}) \ln(l_k + l_{ki}) + \sqrt{(l_k + l_{ki})^2 + h_{ki}^2} - (l_{ki} + l_i) \ln(l_{ki} + l_i) + \sqrt{(l_{ki} + l_i)^2 + h_{ki}^2} + l_{ki} \ln(l_{ki} + \sqrt{d^2 + h_{ki}^2}) - \sqrt{(l_k + l_{ki} + l_i)^2 + h_{ki}^2} + \sqrt{(l_k + l_{ki})^2 + h_{ki}^2} + \sqrt{(l_{ki} + l_i)^2 + h_{ki}^2} - \sqrt{l_{ki}^2 + h_{ki}^2}]. \quad (12)$$

Для участков ошинок, расположенных на одной прямой (рис. 3, б), выражение (12) можно упростить до вида

$$M_{ki} = \frac{\mu_0}{4\pi} [(l_k + l_i + l_{ki}) \ln(l_k + l_i + l_{ki}) + l_{ki} \ln l_{ki} - (l_k + l_{ki}) \ln(l_k + l_{ki}) - (l_i + l_{ki}) \ln(l_i + l_{ki})]. \quad (13)$$

В первом случае, для участков ошинок, расположенных в пространстве под углом друг относительно друга (рис. 3, в), взаимная индуктивность может быть определена выражением [8]

$$M_{ki} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \varphi (a_k \operatorname{Arth} \frac{l_i}{h_{2ki} + h_{4ki}} + a_i \operatorname{Arth} \frac{l_k}{h_{2ki} + h_{4ki}} - b_k \operatorname{Arth} \frac{l_i}{h_{1ki} + h_{3ki}} - b_i \operatorname{Arth} \frac{l_k}{h_{1ki} + h_{3ki}}), \quad (14)$$

где $h_{1ki}, h_{2ki}, h_{3ki}, h_{4ki}$ – расстояния, показанные на рис. 3, в.

ЭДС взаимной индукции для участков ошиновок, согласно [7], определяется выражением

$$\dot{E}_k = j\omega \sum_{i=1}^{n_i} M_{ki} \dot{I}_i. \quad (15)$$

При расчете активных сопротивлений ветвей схемы замещения (участков печной петли) учитываются добавочные потери, обусловленные неравномерным распределением плотности тока в поперечных сечениях керна печи и ошиновок, и, согласно [7], вводится коэффициент добавочных потерь. В этом случае

$$R_k = \rho \frac{l_k}{S_k} k_{\partial}, \quad (16)$$

где ρ – удельное сопротивление, l, S – длина и площадь поперечного сечения участка.

Для исследования распределения токов в ошиновках печной петли по схеме замещения (рис. 2) и описа-

ниям параметров ее ветвей в соответствии с (7)–(15) применялся метод узловых потенциалов, позволивший редуцировать эту задачу к решению системы алгебраических уравнений и применить стандартные программы для его реализации. Затраты времени на численную реализацию не превышают нескольких минут.

Для оценки достоверности и точности предложенной методики расчета были проведены экспериментальные исследования на масштабной модели (1:10) печной петли печи графитации переменного тока (рис. 5). При этом в качестве керна печи применялся графитовый блок, что соответствовало условию минимума сопротивления керна и, следовательно, максимальной мощности процесса графитации. Следует отметить, что применение для исследований масштабных моделей с масштабом 1:10 существенным образом изменяет соотношение электрических параметров и характеристик взаимодействия элементов печной петли. При таком масштабировании сила тока в элементах модели уменьшается в 100 раз по отношению к силе тока в реальной графитировочной печи. Активные составляющие сопротивлений моделей ошиновок и керна увеличиваются в 10 раз, в то время как реактивные индуктивные и взаимоиндуктивные составляющие уменьшаются в 10 раз. Таким образом, соотношение активных и реактивных составляющих сопротивлений ветвей масштабной модели с масштабом 1:10 изменяется от 100 до 1000 раз по отношению к промышленной печи.

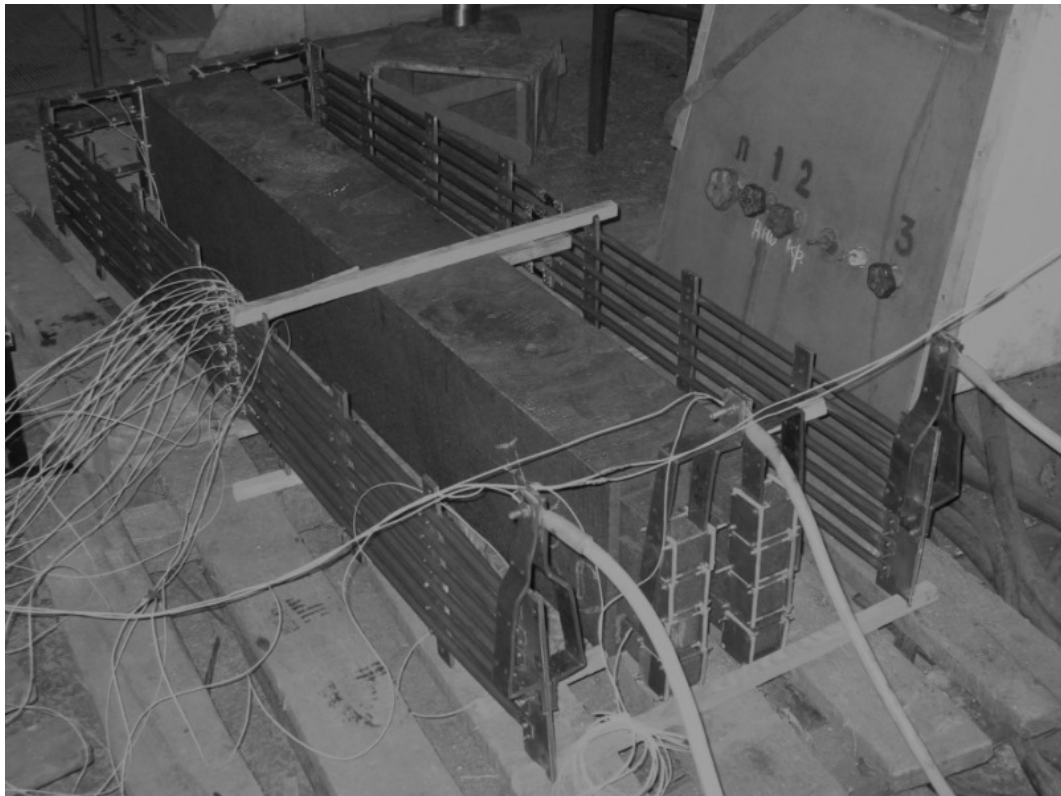


Рис. 5. Масштабная модель печной петли печи графитации переменного тока

Распределение токов в параллельных ветвях ошинок и, прежде всего, в боковом шинопакете определяется соотношением активных сопротивлений, что при условии их равенства приводит к выравниванию токо-распределения по этим ветвям. Поэтому оценить влияние реактивных индуктивных и взаимоиндуктивных связей на сопротивления ошинок модели печной петли по общепринятым методикам измерения действующих значений напряжений, токов и активной мощности невозможно.

Это потребовало применения специальной методики регистрации и обработки результатов измерений на основе измерительного комплекса, позволяющего измерять с заданным тактом и шагом мгновенные значения переменных токов и падение напряжения на отдельных участках печной петли, обеспечивающего передачу данных на компьютер высокого уровня для высокоточной аппроксимации дискретных сигналов во времени [9].

На основе массивов дискретных мгновенных данных измерений рассчитывались осциллограммы токов и падения напряжения, их действующие значения, амплитуды и сдвиги по фазе.

При сравнении данных экспериментальных исследований на масштабной модели с расчетными данными было установлено, что при определении распределения токов (действующие значения) по трубам боковых ошинок максимальная относительная погрешность, которая наблюдалась для токов крайних (верхней и нижней) труб, не превысила 2,3 %. При этом фазовый сдвиг токов в параллельных трубах боковой ошиновки относительно друг друга не превысил 0,25–0,34 эл. градуса. Действующее значение тока в керне составило 494 А, а расчетное – 473 А (относительная погрешность – 4,2 %), при действующем значении падения напряжения на керне: 340,3 мВ – по данным измерений и 326,6 мВ – по результатам расчетов. Сдвиг по фазе между током керна и напряжением на отводах составил соответственно 17,4 эл. градуса (на масштабной модели) и 21,2 эл. градуса (по расчетам) при действующем значении напряжения на отводах модели, равном 430 мВ. Эти данные подтверждают достаточно высокую точность и достоверность предложенной методики для определения параметров схемы замещения на основе методов участков и средних геометрических расстояний.

Экспериментальная проверка на промышленной печи графитации показала, что относительная токовая погрешность для токоподводов переднего торца не превысила 6,2 %, заднего торца – 5,8 %, относительная погрешность для падения напряжения в керне печи с токоподводами составила 5,1 %, для активной мощности, выделяющейся в керне – 7,9 % (рис. 5). Это было достигнуто путем введения корректирующих коэффициентов при расчете составляющих сопротивлений, учитывающих влияние температурных режимов работы

ошинок в процессе графитации, а также результаты исследований электротеплового состояния печи графитации и ее керна [2].

Таким образом, предложенная методика на основе методов электрических цепей и среднегеометрических расстояний позволяет с высокой точностью выполнить расчет печной петли, распределения токов по параллельным участкам ошинок и в керне, фазовые сдвиги между токами и напряжениями, а, следовательно, активные потери в них и показатели энергоэффективности системы.

Достаточная точность и высокая вычислительная эффективность обеспечивают возможность применения соотношений этой методики в системе ограничений при оптимизации процесса графитации, систем компенсации реактивной мощности и для разработки новых технических решений по модернизации печной петли и снижения затрат на компенсацию перетоков реактивной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярымбаш Д. С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, О. В. Тютюнник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ, 2006. – Вип. 3/2006(38), – С. 53–55.
2. Применение численного моделирования для совершенствования процесса графитации электродной продукции в печах Ачесона / [Е. Н. Панов, С. В. Кутузов, О. Ю. Уразлина и др.] // Сб. докладов XII Международной конф. «Алюминий Сибири – 2006» 5–7 сентября 2006 г. – Красноярск, 2006. – С. 373–380.
3. Методика экспериментальных исследований тепловых режимов и построения энергобалансов печей графитации / [Е. Н. Панов, И. Л. Шилович, С. В. Кутузов и др.] // Доклады научно-технической конференции «Электротермия–2004», 1–4 июня 2004 г. – г. Санкт-Петербург, 2004. – С. 106–117.
4. Земан С. Особенности работы высокочастотного трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора / С. Земан, А. Осипов, О. Сандырев // Силовая электроника. – М., 2007. – № 1. – С. 36–42.
5. Мирзаабдулаев А. О. Возможности физического моделирования наведенного напряжения на воздушных линиях / А. О. Мирзаабдулаев, Б. П. Папков // Энергоэффективность : опыт, проблемы, решения. – Нижний Новгород : Нижегородский инвестиционный центр энергоэффективности, 2005. – Вып. 1. – С. 28–32.
6. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей : справ. кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – [3-е изд.] – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 2003. – 317 с.
8. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей : справочник. / [Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жилов Г. М. и др.]. – [2-е изд.]. – М. : «Металлургия», 1987. – 320 с.
9. Килимник И. М. Повышение эффективности обработки информации при регистрации контролируемых параметров в системах автоматического управления / И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2007. – № 1(17). – С. 68–73.

Стаття надійшла до редакції 13.07.2010 р.

Ярымбаш С. Т., Килимник І. М., Ярымбаш Д. С. Особливості визначення параметрів електричної схеми заміщення пічної петлі печі графітації змінного струму
Запропоновано методику синтезу схеми заміщення пічної петлі печі графітації для оцінки струморозподілу в її елементах, активних втрат та показників енергоефективності системи. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментом.

Ключові слова: метод синтезу, пічна петля, піч графітації, струморозподіл, активні втрати, енергоефективність.

Yarymbash S., Kylymnyk I., Yarymbash D. Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace

The method of equivalent circuit synthesis proposed for the graphitizing furnace loop permits to assess current distribution in its elements, resistance loss and energy efficiency of the system. Simulation and experimental results are compared.

Key words: method of synthesis, furnaces loop, graphitizing furnace, current distribution, resistance loss, energy efficiency.

УДК 621.314

А. А. Шавѐлкин, канд. техн. наук

Донецкий национальный технический университет

ГИБРИДНЫЙ МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрены основные принципы реализации гибридного многоуровневого преобразователя частоты на базе четырехуровневого инвертора напряжения с «реактивной ячейкой» в выходных фазах при соотношении уровня напряжения в звене постоянного тока базового инвертора и «реактивной ячейки» 3:1. Приведены результаты моделирования предложенных решений.

Ключевые слова: несимметричный гибридный многоуровневый инвертор, релейный регулятор, реактивная ячейка, предварительная модуляция.

Введение

В настоящее время применительно регулируемого электропривода среднего напряжения (6–10кВ) наиболее полно соответствуют стандартам многоуровневые преобразователи частоты (МПЧ). Вместе с тем, существует известное противоречие: высокие показатели вход-выход достигаются при сложной схеме (каскадный МПЧ на напряжение 6кВ имеет 60 или 72 IGBT и трансформатор с 15 или 18 комплектами вторичных обмоток) и соответствующей стоимости, что оправдано толь-

ко при мощностях свыше 2МВт. Наиболее распространенный, простой и относительно недорогой вариант МПЧ базируется на схеме трехуровневого автономного инвертора напряжения (ТАИН) [1]. Качество их выходного напряжения не соответствует стандарту, и предполагает использование громоздких фильтров.

Поэтому актуальной проблемой является поиск компромиссных решений, обеспечивающих высокие энергетические показатели при минимизации схемных решений, что способствует повышению эффективности применения МПЧ.