

УДК 621.313.3

А.И. Инкин, А.В. Бланк, А.И. Алиферов, Е.Г. Порсев, В.А. Промзелев

## Исследование электромагнитных параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами

Предложен приближенный аналитический метод расчета электромагнитного поля установки индукционного нагрева с постоянными магнитами с помощью каскадной схемы замещения, которая сформирована в цилиндрической системе координат на основе сопоставления общих законов и методов расчета электромагнитного поля и методов теории электрических цепей синусоидального тока.

**Ключевые слова:** установки индукционного нагрева, постоянные магниты, электромагнитное поле синусоидальных токов, каскадные схемы замещения, четырехполосники.

Для нагрева металлов перед горячей обработкой широко применяются установки индукционного нагрева. Во многих случаях индукционный нагрев весьма эффективен, однако при нагревании немагнитных материалов с низким сопротивлением (алюминий, медь) КПД индукционной установки оказывается весьма низким (около 50%). В последние годы для повышения КПД установок индукционного нагрева предлагается использовать новый метод, при котором нагреваемое изделие вращается посредством электродвигателя в поперечном стационарном магнитном поле. При этом магнитное поле может быть создано постоянными магнитами, изготовленными из интерметаллических соединений на основе редкоземельных металлов [1]. Полный КПД процесса нагрева в этом случае определяется потерями в двигателе и может достигать 90%.

Установка состоит из многополюсной системы возбуждения на постоянных магнитах, вращающейся садки и воздушного зазора между ними, в дальнейшем называемого рабочим зазором (рис. 1, а). По существу такая установка представляет собой систему возбуждения генератора, совмещенную со встроенным потребителем энергии, что позволяет рассматривать ее как электрическую машину нетрадиционной конструкции специального назначения.

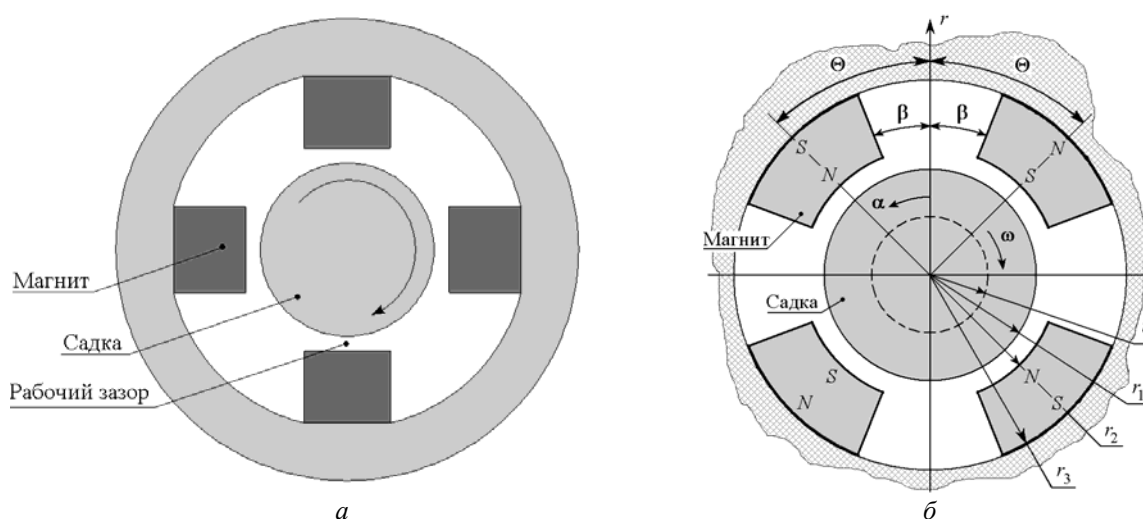


Рис. 1. Установка индукционного нагрева с постоянными магнитами: а – схема нагревательного узла; б – цилиндрическая слоистая модель

При проведении электромагнитных расчетов электрических машин нетрадиционных конструкций с составными активными объемами хорошо зарекомендовали себя универсальные каскадные схемы замещения [2, 3]. При синтезе каскадной схемы каждой конструктивной зоне машины ставится в соответствие активный или пассивный четырехполосник, после чего четырехполосники соединяются в каскад (рис. 2).

Применение каскадных схем к системам с постоянными магнитами затруднено тем обстоятельством, что магнитные свойства структуры «межполюсное пространство – постоянный магнит» скачкообразно изменяются на границе раздела сред, и поэтому строгое решение задачи приводит к бесконечным рядам по кусочно-непрерывным собственным функциям задачи Штурма–Лиувилля. Однако для синтеза каскадной схемы, возможно воспользоваться приближенным расчетным методом, в котором решение задачи теории поля формируется на базе одной кусочно-непрерывной функции, соответствующей первому собственному числу задачи Штурма–Лиувилля [4].

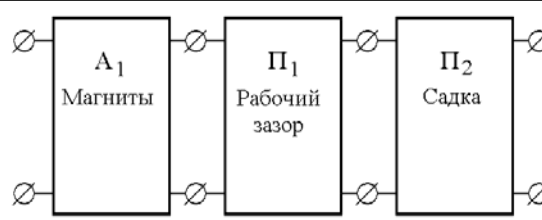


Рис. 2. Четырехполюсники, соединенные в каскад

В настоящей статье описывается каскадная *A-H*-схема замещения, разработанная на основе слоистой модели индукционной установки с постоянными магнитами в цилиндрической системе координат.

**Каскадная *A-H*-схема замещения системы «постоянные магниты – рабочий зазор – немагнитная садка»**

При аналитическом расчете электромагнитного поля в системе с постоянными магнитами призматическим постоянным магнитам искусственно придана клиновидная форма (см. рис. 1, б). После этого принято допущение, что в объеме расчетного клиновидного магнита вектор магнитной индукции имеет одну радиальную составляющую, а магнитная проницаемость магнита в направлении намагничивания равна

$$\mu_i = \frac{B_r}{H_c}, \tag{1}$$

где  $B_r, H_c$  – остаточная индукция и коэрцитивная сила исходного призматического магнита.

В направлении, перпендикулярном намагничиванию, магнитная проницаемость магнита равна магнитной постоянной  $\mu_0$ .

В каскадной *A-H*-схеме замещения системы «постоянные магниты – рабочий зазор – немагнитная садка» аналогом напряжения является векторный магнитный потенциал, а аналогом тока – касательная составляющая вектора магнитной напряженности, умноженная на текущий радиус. На рис. 3 слева направо изображены три четырехполюсника: первый (активный) четырехполюсник соответствует зоне постоянных магнитов, второй и третий (пассивные) четырехполюсники соответствуют рабочему зазору и садке.

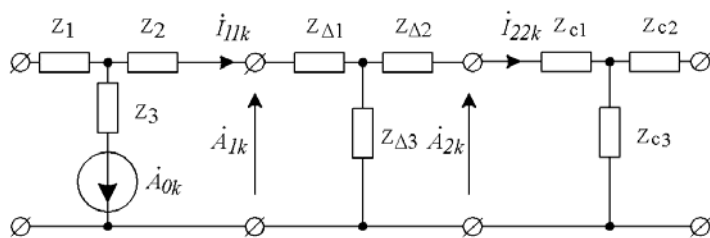


Рис. 3. Каскадная *A-H*-схема замещения системы «постоянные магниты – рабочий зазор – садка»

Ярмо, на котором укреплены постоянные магниты, является идеальным ферромагнетиком, на поверхности которого касательная составляющая вектора магнитной напряженности равна нулю. Поэтому входные зажимы первого четырехполюсника, соответствующие поверхности ярма, разомкнуты. Величина  $r_0$  (см. рис. 1, б) выбрана таким образом, чтобы магнитная напряженность при  $r=r_0$  была пренебрежимо мала. Это позволяет оставить разомкнутыми выходные зажимы третьего четырехполюсника.

Источник  $\dot{A}_{0k}$  в активном четырехполюснике аналогичен источнику ЭДС и для каждой гармоники поля описывается выражением

$$\dot{A}_{0k} = j8\Theta B_r \frac{r_2}{k^2 \pi^2} \sin \frac{k\pi}{2} \sin kp(\Theta - \beta), \tag{2}$$

где  $k=1,3,5,\dots, p$  – число пар полюсов в установке.

Сопrotивления активного четырехполюсника равны:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{\mu_0 \left( \frac{r_3}{r_2} \right)^n + \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^n - 2}{n \left( \frac{r_3}{r_2} \right)^n - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^n}, \quad (3)$$

$$Z_3 = \frac{\mu_0}{n} \frac{2}{\left( \frac{r_3}{r_2} \right)^n - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^n}, \quad (4)$$

где постоянная  $n$  является первым собственным числом задачи Штурма–Лиувилля и вычисляется как первый положительный корень трансцендентного уравнения

$$\operatorname{ctg} n\beta = \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_0}} \operatorname{tg} n \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_0}} (\Theta - \beta). \quad (5)$$

Сопrotивления четырехполюсника, соответствующего рабочему зазору, равны

$$Z_{\Delta 1} = Z_{\Delta 2} = \frac{\mu_0 \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{kp} + \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{kp} - 2}{kp \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{kp} - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{kp}}, \quad (6)$$

$$Z_{\Delta 3} = \frac{\mu_0}{kp} \frac{2}{\left( \frac{r_2}{r_1} \right)^{kp} - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{kp}}. \quad (7)$$

Сопrotивления четырехполюсника, соответствующего садке, равны

$$Z_{c1} = \frac{\mu_0}{v_k r_1} \cdot \frac{H_{kp}^{(2)'}(v_k r_0) \left[ H_{kp}^{(1)}(v_k r_1) - H_{kp}^{(1)}(v_k r_0) \right] - H_{kp}^{(1)'}(v_k r_0) \left[ H_{kp}^{(2)}(v_k r_1) - H_{kp}^{(2)}(v_k r_0) \right]}{H_{kp}^{(1)'}(v_k r_1) H_{kp}^{(2)'}(v_k r_0) - H_{kp}^{(1)'}(v_k r_0) H_{kp}^{(2)'}(v_k r_1)}, \quad (8)$$

$$Z_{c3} = \frac{\mu_0}{v_k r_1} \cdot \frac{H_{kp}^{(2)'}(v_k r_0) H_{kp}^{(1)}(v_k r_0) - H_{kp}^{(1)'}(v_k r_0) H_{kp}^{(2)}(v_k r_0)}{H_{kp}^{(1)'}(v_k r_1) H_{kp}^{(2)'}(v_k r_0) - H_{kp}^{(1)'}(v_k r_0) H_{kp}^{(2)'}(v_k r_1)}, \quad (9)$$

где  $H_{kp}^{(1)}$ ,  $H_{kp}^{(2)}$  – функции Ганкеля первого и второго рода порядка  $kp$ ;  $v_k = \sqrt{-j k p \omega \mu_0 \gamma_c}$ ;  $\omega$  – круговая частота вращения садки;  $\gamma_c$  – проводимость садки.

После расчета каскадной  $A$ - $H$ -схемы любым известным методом теории цепей становятся известны касательные составляющие векторного магнитного потенциала и вектора магнитной напряженности на границах конструктивных зон индукционной установки. Далее определяются электрические напряженности и нормальные составляющие вектора магнитной индукции:

$$\dot{E}_k = -j \omega_k \dot{A}_k, \quad (10)$$

$$\dot{B}_{nk} = j \frac{kp}{r} \dot{A}_k. \quad (11)$$

#### Расчет электромагнитного поля установки индукционного нагрева с постоянными магнитами

Для проверки разработанной каскадной схемы была произведена серия расчетов двумя различными методами: по каскадной схеме (аналитически) и численно. Рассчитывались нормальная составляющая вектора магнитной индукции и электрическая напряженность на поверхности садки.

Исходные данные для расчета:  $r_0 = 5$  мм;  $r_1 = 20$  мм;  $r_2 = 30$  мм;  $r_3 = 50$  мм;  $\Theta = \frac{\pi}{4}$ ;  $\beta = \frac{\pi}{8}$ ;  $p = 2$ ;

$B_r = 0,8$  Тл;  $\mu_i = 1,45 \mu_0$ ;  $\gamma_c = 3,445 \cdot 10^7$  Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ ; скорость вращения садки 1500 оборотов в минуту.

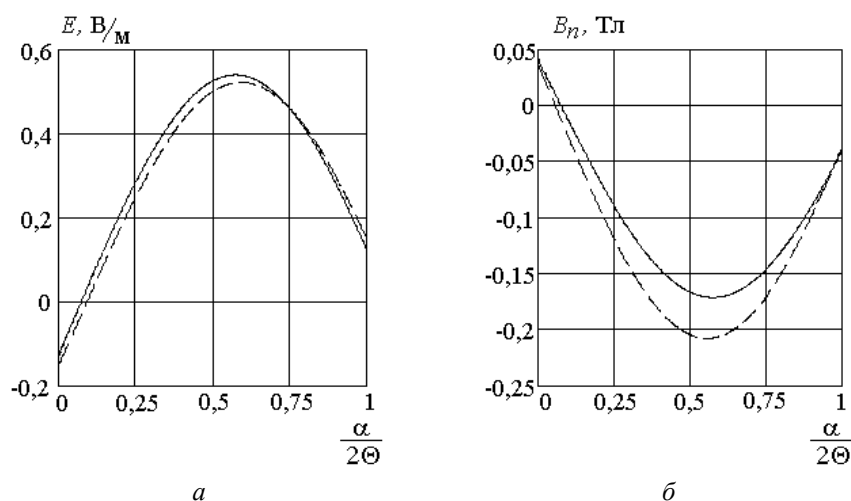


Рис. 4. Расчет электромагнитного поля на поверхности садки:  
 а – первая гармоника вектора электрической напряженности;  
 б – первая гармоника нормальной составляющей вектора магнитной индукции;  
 сплошная линия – расчет по каскадной схеме; пунктир – численный расчет

На рис. 4 представлены кривые распределения первой гармоники вектора электрической напряженности и нормальной составляющей вектора магнитной индукции на поверхности садки. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности предлагаемого аналитического метода.

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

#### Заключение

По результатам представленной работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. В настоящей статье задача по расчету электромагнитного поля установки индукционного нагрева с постоянными магнитами сводится к аналитическому расчету эквивалентной каскадной схемы замещения, полученной на основании сопоставления общих законов и методов расчета электромагнитного поля и методов теории электрических цепей синусоидального тока.
2. При расчете каскадной схемы могут быть использованы универсальные средства компьютерной математики (пакеты *Mathcad*, *MATLAB* и т.п.), более доступные пользователям по сравнению с коммерческими пакетами для численных расчетов электромагнитного поля.
3. Предлагаемый аналитический метод хорошо согласуется с результатами численных расчетов электромагнитного поля и может быть использован при разработке методик оптимизационных расчетов установок индукционного нагрева с постоянными магнитами.

#### Литература

1. A new high efficiency technology for the induction heating of non magnetic billets / F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi et al. // Heating by electromagnetic sources HES-10. – Padua, 2010 – P. 531–538.
2. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: учеб. пособие. – Новосибирск: ЮКЭА, 2002. – 464 с.
3. Литвинов Б.В. Типовые звенья и каскадные схемы замещения электрических машин / Б.В. Литвинов, О.Б. Давыденко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 215 с.
4. Инкин А.И. Приближенный аналитический расчет поля возбуждения электрических машин, основанный на кусочно-непрерывной собственной функции / А.И. Инкин, А.В. Бланк // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 52–56.

**Инкин Алексей Иванович**

Д-р техн. наук, профессор каф. теоретических основ электротехники  
Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)  
Тел.: 8 (383-3) 46-04-42  
Эл. почта: kaftoe@ngs.ru

**Бланк Алексей Валерьевич**

Канд. техн. наук, докторант каф. теоретических основ электротехники НГТУ  
Тел.: 8 (383-3) 46-04-42  
Эл. почта: kaftoe@ngs.ru

**Алиферов Александр Иванович**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. автоматизированных электротехнологических установок НГТУ  
Тел.: 8 (383-3) 46-30-32  
Эл. почта: alif@ngs.ru

**Порсев Евгений Георгиевич**

Д-р техн. наук, профессор каф. электротехнических комплексов НГТУ  
Тел.: 8 (383-3) 46-17-91  
Эл. почта: porseve@ngs.ru

**Промзелев Владислав Алексеевич**

Аспирант каф. автоматизированных электротехнологических установок НГТУ  
Тел.: 8 (383-3) 46-30-32  
Эл. почта: promzelev@mail.ru

Inkin A.I., Blanc A.V., Aliferov A.I., Porsev E.G., Promzelev V.A.

**Researching the electromagnetic parameters of induction heating systems with permanent magnets**

The analytical method is offered to solve the electromagnetic problems in induction heating system with permanent magnets using the cascade equivalent circuits obtained in the cylindrical coordinate system by means of comparison of the electromagnetic field theory and the sinusoidal circuit theory.

**Keywords:** induction heating systems, permanent magnets, the time-harmonic electromagnetic field, cascade equivalent circuits, quadripoles.

---