

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОПРОВОДА И ЗАГРУЗКИ НА ИНДУКТОР

Получены количественные соотношения для характеристики влияния магнитопровода на индуктор и проведен анализ коэффициента взаимосвязи магнитопровода и индуктора при различных геометрических соотношениях в системе нагрева.

Структурный анализ коэффициентов влияния магнитопровода и загрузки на индуктор показывает, что величина их в значительной степени зависит от электрофизических свойств электротехнической стали, применяемой для выполнения пакетов магнитопровода, и геометрических соотношений в системе нагрева. Последнюю зависимость определяет коэффициент взаимосвязи между индуктором и магнитопроводом, показывающий часть общего магнитного потока индуктора, проходящую через магнитопровод. Эта зависимость может быть представлена в следующем виде.

Рассмотрим систему, в которой магнитопровод расположен коаксиально индукционной системе. Предположим, что влияние вихревых токов, индуцированных в магнитопроводе на поле воздушного зазора, можно не учитывать. Векторный потенциал магнитного поля в воздушном зазоре может быть для двух измерений определен из уравнения:

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial A}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (1)$$

При граничных условиях:

$$-\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial R} = H_{\tau}(R = R_M) \quad R = R_M, \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial A}{\partial R} = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) относительно тангенциальной и радиальной составляющих напряженности магнитного поля имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\tau} &= -\frac{\partial A}{\mu_0 \partial R} = \frac{\dot{H}_{\tau n} \left(\frac{R_n}{R} \right)^2}{1 - \left(\frac{R_M}{R_n} \right)^2} \left[\left(\frac{R}{R_n} \right)^2 - \left(\frac{R_M}{R_n} \right)^2 \right] \sin \frac{\pi}{l_n} \alpha, \\ \dot{H}_R &= \frac{1}{\mu_0 R} \cdot \frac{\partial A}{\partial \alpha} = -\frac{\dot{H}_{\tau n} \left(\frac{R_n}{R} \right)^2}{1 - \left(\frac{R_M}{R_n} \right)^2} \left[\left(\frac{R}{R_n} \right)^2 - \left(\frac{R_M}{R_n} \right)^2 \right] \cos \frac{\pi}{l_n} \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Максимальный магнитный поток на единицу длины магнитопровода, проходящий в магнитном зазоре, определится

$$\dot{\Phi}_{\text{ИМ}} = \mu_0 \int_0^{2\pi} \left| \dot{H}_{\tau} \right|_{R=R_M} R_M \cdot d\alpha. \quad (5)$$

Полученное выражение устанавливает взаимосвязь только магнитопровода и индуктора. Пользуясь принципом наложения, задачу вычисления напряженности магнитного поля и соответствующих потоков можно свести к определению напряженности магнитного поля от загрузки и индуктора, представленных как однослойные цилиндрические катушки.

Для вычисления напряженности магнитного поля однослойной цилиндрической катушки Купо Foelsch дает следующие формулы для области вне катушки:

$$H_{\tau} = \frac{jW}{2\pi l} [B_2(n, \beta_2) \pm B_1(n, \beta_1)], \quad (6)$$

$$H_R = \frac{Jw}{2\pi l} \sqrt{\frac{R}{\rho}} \left\{ \left[\frac{2}{K_1} (F_1 - E_1) - K_1 F_1 \right] - \left[\frac{2}{K_2} (F_2 - E_2) - K_2 F_2 \right] \right\}, \quad (7)$$

где $B(n, \beta) = 2F_1 \sqrt{1-\beta} - A(n, \beta)$;

$$A(n, \beta) = \frac{\pi}{2} + F_1 \sqrt{1-\beta} \left(1 + \sqrt{1-n} \right) + F(b, \varphi) \cdot [F - E] - F \cdot E(b, \varphi);$$

$$K^2 = n \cdot \beta; \quad b^2 = 1 - K^2; \quad \sin \varphi = \frac{1-n}{1-K^2};$$

$$n = \frac{4R\rho}{(R+\rho)^2}; \quad \beta_1 = \frac{(R+\rho)^2}{(R+\rho)^2 + x_1^2}; \quad \beta_2 = \frac{(R+\rho)^2}{(R+\rho)^2 + x_2^2};$$

F_1, E_1 — полные эллиптические интегралы первого и второго рода; $F(b, j), E(b, j)$ — эллиптические интегралы первого и второго рода; R — радиус катушки; Jw — ампервитки катушки; x_1, x_2 — расстояния от концов катушки до рассматриваемой точки; l — высота катушки; r — расстояние от оси катушки до рассматриваемой точки.

В связи с тем, что радиальные составляющие напряженности магнитного поля в нижней и верхней частях магнитопровода равны друг другу и противоположно направлены [2], они могут не приниматься при рассмотрении. Такое допущение целесообразно с точки зрения упрощения расчета и, как показывают эксперименты, не вносит значительной погрешности в результаты аналитических расчетов.

Принимая это, определение необходимых коэффициентов для расчета напряженности магнитного поля свелось к определению значений коэффициентов B_1, B_2, n и β . Величина коэффициентов B_1 и B_2 по вычисленным n и β для каждой интересующей нас точки может быть найдена с помощью графиков (рис. 1), где приведены кривые изменения указанных коэффициентов. Эти зависимости даны в диапазоне изменения аргументов, охватывающих всю возможную область геометрических соотношений в индукционных системах нагрева.

Расчетные значения напряженности магнитного поля вне индуктора при различных геометрических соотношениях в системе нагрева приведены на рис. 2–4.

Графическое интегрирование зависимостей (см. рис. 2–4) на основании выражения (5) позволило получить зависимости (рис. 5), показывающие величину магнитного потока, проходящего через магнитопровод, в зависимости от его расположения относительно индуктора при различных диаметрах загрузки. Пунктиром на рисунке показаны экспериментальные величины, полученные при проведении экспериментального исследования ферромагнитного экранирования.

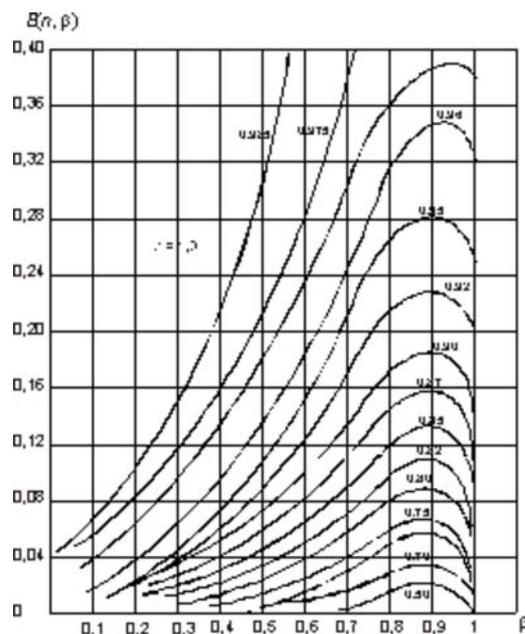


Рис. 1. Значение коэффициента B для расчета напряженности магнитного поля цилиндрической катушки на основании формулы (6)

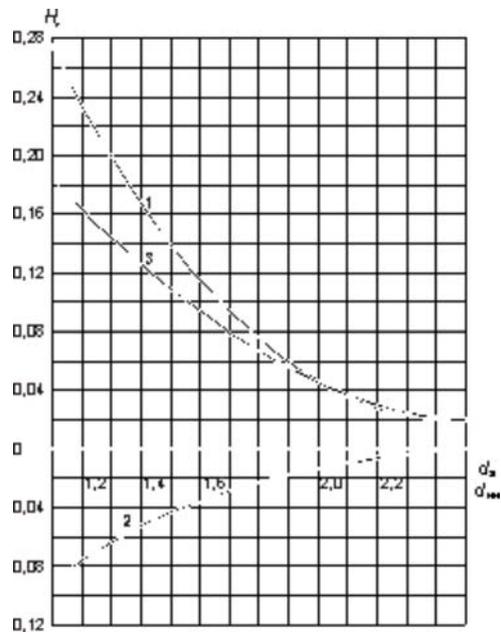


Рис. 2. Распределение напряженности магнитного поля

вне индуктора при $\frac{d_s}{d_{1B}} = 0,6$ (расчетные зависимости):

- 1 — составляющая напряженности от тока индуктора;
- 2 — составляющая напряженности от токов в нагрузке;
- 3 — результирующая напряженность магнитного поля

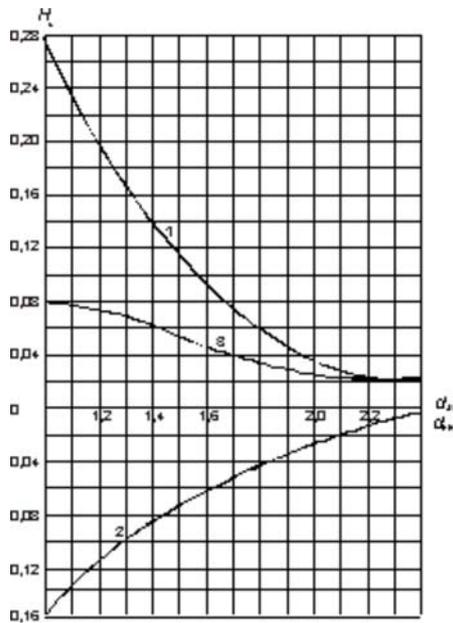


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля

вне индуктора при $\frac{d_s}{d_{1B}} = 0,7$ (расчетные зависимости):

- 1 — составляющая напряженности от тока индуктора;
- 2 — составляющая напряженности от токов в нагрузке;
- 3 — результирующая напряженность магнитного поля

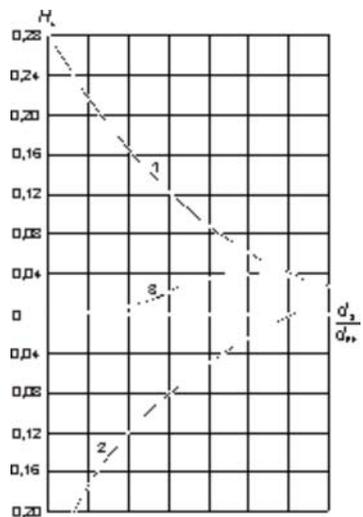


Рис. 4. Распределение напряженности магнитного поля

вне индуктора при $\frac{d_s}{d_{1B}} = 0,8$ (расчетные зависимости):

- 1 — составляющая напряженности от тока индуктора;
- 2 — составляющая напряженности от токов в нагрузке;
- 3 — результирующая напряженность магнитного поля

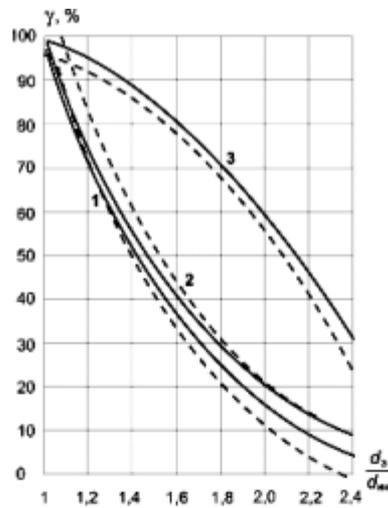


Рис. 5. Величина магнитного потока в % от общего потока индуктора, проходящая через магнитопровод, в зависимости от диаметра расположения пакетов при 1 — $\frac{d_s}{d_{1B}} = 0,6$; 2 — $\frac{d_s}{d_{1B}} = 0,7$; 3 — $\frac{d_s}{d_{1B}} = 0,8$.
Пунктиром показаны экспериментальные значения

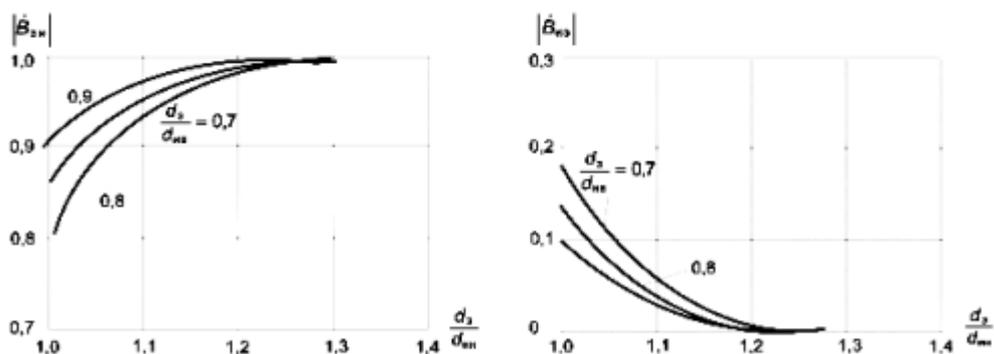


Рис. 6. Зависимость коэффициентов влияния загрузки и магнитопровода на индуктор от геометрических соотношений в системе нагрева

Зависимости коэффициента взаимосвязи между индуктором и магнитопроводом от геометрических соотношений в системе нагрева неоднозначно определяют коэффициент влияния магнитопровода и загрузки на индуктор. Как уже указывалось, коэффициент влияния в равной мере зависит от электрофизических свойств электротехнической стали, используемой для магнитопровода. Однако здесь представляет интерес рассмотреть частный случай зависимости коэффициентов влияния от геометрических соотношений в системе для определенного сорта стали — электротехнической стали Э-42. Такие зависимости при постоянном сечении магнитопровода приведены на рис. 6.

Как видно из сопоставления зависимостей (рис. 5 и 6), при отсутствии зазора между магнитопроводом и индуктором основная часть магнитного потока (95–100 %) замыкается по ферромагнитным участкам магнитопровода. Возможное появление потоков утечки (до 5 %) обусловлено наличием паразитных зазоров между витками индуктора, т. е. отличием коэффициента заполнения индуктора по высоте от единицы и возникающими вследствие этого разностями магнитных потенциалов на соответствующих участках. Этим объясняются наиболее значительные различия расчетных и экспериментальных данных, полученных при исследовании данного вопроса.

При помещении пакетов магнитопровода на расстоянии $\frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{и}}} > 1$ от индуктора внешний магнитный поток разделяется на два параллельных потока, среди которых наибольший по величине проходит по ферромагнитным участкам. При расположении пакетов непосредственно возле индуктора без зазора коэффициент взаимосвязи γ увеличивается, что не всегда играет положительную роль. В случае, когда γ максимален, расчет активного сечения магнитопровода необходимо вести по потоку, мало отличающемуся от потока индуктора, и, как следствие, потребуется значительное количество электротехнической стали, чтобы

обеспечить допустимую рабочую индукцию в пакете. Расположение пакетов непосредственно около индуктора хотя и может обеспечить улучшение охлаждения магнитопровода, прилегающего пусть даже через изоляционное покрытие витков к водоохлаждаемому индуктору, но одновременно и осложнит в определенной мере конструирование индуктора, в частности, приведет к затруднениям в оформлении устройств, обеспечивающих осевую стяжку индуктора. Кроме того, зависимость коэффициента влияния ($B_{3и}$) от

геометрических соотношений в системе (рис. 6) показывает, что при изменении $\frac{d_{II}}{d_{III}}$ от 1,0 до 1,2 влияние магнитопровода на энергетический режим работы оказывается существенно, что выражается в увеличении числа витков индуктора, изменении сопротивления и возрастании потерь активной энергии в индукторе. Все это свидетельствует о том, что пакеты магнитопровода необходимо располагать на некотором удалении от

индуктора, так чтобы $\frac{d_{II}}{d_{III}} > 1,2$.

Удаление магнитопровода от индуктора влечет за собой увеличение длины окружности расположения пакетов и увеличение или количества пакетов при постоянной ширине, или ширины пакетов при постоянном их количестве. При этом в любом случае произойдет уменьшение ширины шихтованных пластин, что обеспечит лучший отвод тепла от внутренних частей пакета и увеличение общей поверхности пакетов, участвующей в отдаче тепла в окружающее пространство. Однако изменение зазора между индуктором и магнитопроводом вызывает увеличение длины пакетов и веса магнитопровода. Поэтому вопрос о выборе рационального положения пакетов должен решаться параллельно с расчетом экономических затрат на различное исполнение экранирующих элементов электропечи.

Выводы

1. Проведен анализ коэффициента взаимосвязи магнитопровода и индуктора при различных геометрических соотношениях в системе нагрева.
2. Получены количественные соотношения для характеристики влияния магнитопровода на индуктор.
3. Внесение в систему нагрева ферромагнитного экрана производит изменение энергетических соотношений в системе.

Литература

1. Круг К. А. и др. Основы электротехники. 1952.
2. Торопов И. А. Экранирование индукционных тигельных печей // Науч.-техн. сб. «Электротермия». 1964. Вып. 31.

A. P. Kislov

INVESTIGATION OF CORRELATION INDICES WITH RESPECT TO THE EFFECT PRODUCED BY THE MAGNETIC CORE AND LOADING ON THE INDUCTION HEATER

The author obtained quantitative correlations used to describe the effect of the magnetic core on the induction heater investigating correlation indices with respect to the magnetic core and the induction heater under different geometric proportions in the heating system.