

12. **Бонч-Бруевич А.М.** Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем / **Бонч-Бруевич А.М., Быков В.Л., Чинаев П.И.** – М.: Машиностроение, 1967. – 292 с.
13. **Андреев С.Е.** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / **Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В.** – М.: Недра, 1980. – 415 с.
14. **Зверевич В.В.** Основы обогащения полезных ископаемых / **В. Зверевич, В. Перов.** – М.: Недра, 1971. – 216с.
15. **Божко М.П.** Машинист мельницы / **М. Божко, В. Маргулис.** – М.: Госнаучтехиздат лит. по горному делу, 1962. – 100 с.
16. **Скоров В.А.** Обогащение руд / **Скоров В.А.** – М.: Недра, 1969. – 276 с.
17. **Вальтер А.К.** Автоматический контроль плотности железорудной пульпы гамма-лучами / **Вальтер А.К., Плаксин И.Н., Гольдин М.Л.** – Харьков: Изд. ХГУ, 1962. – 244 с.
18. **Кондратец В.О.** Теоретичне обґрунтування системи адаптивного керування подрібненням руди кульовими млинами / **В.О. Кондратец, М.О. Карчевська** // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. праць.- 2011. – Вип.28. – С.196-200.
19. Пат. 62052 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення / **Кондратец В.О., Карчевська М.О.**: заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т.- №u201100657; заявл. 20.01.11; опубл. 10.08.11, Бюл.№7.
20. **Kondratets V.A.** Adaptive control of ore pulp thinning in ball mills with the increase of their productivity // *Metalurgical and Mining Industry.* – 2014, №6. – P.12-15.

Рукопис подано до редакції 18.04.2017

УДК 621.365.5, 621.314.5

Д. И. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, доц., Донбасский государственный технический университет

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ ИНДУКТОРОВ В УСТАНОВКАХ ЗОННОГО НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЗАГОТОВОК

Цель работы. Исследование вариантов питания индукторов в установках зонного нагрева с использованием изменения ферромагнитных свойств материала заготовок при различных температурах.

Методы исследования. На основании зависимостей активного и индуктивного сопротивлений от температуры магнитной заготовки параллельной схемы замещения индуктора и зависимостей добротности от температуры определялись параметры схем замещения четырех индукторов установки зонного индукционного нагрева. На схематической модели силовой части индукционной установки с питанием индукторов от одного преобразователя с параллельным включением индукторов определялось значение мощностей.

Научная новизна. Мощность индукторов природным образом, согласно свойствам материала заготовок, распределяется так, что заготовка с меньшей температурой потребит на нагрев большую мощность. Такое естественное распределение мощностей может использоваться в установках зонного нагрева. Однако для более точного нагрева необходимо иметь возможность регулировать мощность индукторов последних ступеней.

Результаты. Параметры эквивалентных электрических схем замещения изменяются таким образом, что при включении индукторов параллельно и питании их от одного преобразователя частоты мощности, потребляемые индукторами, при увеличении температуры уменьшаются. Однако для обеспечения оптимального распределения мощностей и точного нагрева индукторы последних ступеней должны иметь или другую конструкцию, с увеличенным числом витков, или получать питание от отдельного преобразователя частоты.

Практическое значение. В установках зонного индукционного нагрева первые индукторы могут быть одинаковыми и получать питание от одного преобразователя, а значит, количество преобразователей может быть меньше количества индукторов.

Ключевые слова: индуктор, зонный нагрев, схема замещения, модель, мощность.

Введение. В настоящее время индукционные установки с высокой производительностью строятся многоиндукторными с непрерывным перемещением нагреваемых заготовок последовательно через несколько индукторов. Каждый индуктор осуществляет нагрев части заготовок в определенной зоне пространства – такой способ нагрева называется зонным. При этом оптимальной программы нагрева и требуемой конечной температуры возможно достичь, обеспечив передачу заготовке соответствующей мощности каждым индуктором (в каждой зоне) отдельно. Такой подход ставит задачи формирования индукторами требуемой мощности, решение кото-

рых определяет конструкцию индукторов и схемотехнику силовой части преобразователя их питания. Вариантов решения задачи может быть масса, например:

применение одинаковых индукторов (с одинаковыми числами витков) каждый из которых получает питание от отдельного преобразователя;

применение разных индукторов (с различным числом витков) с питанием каждого от отдельного преобразователя;

применение одинаковых или разных индукторов с питанием от одного преобразователя.

комбинированные варианты, когда от одного преобразователя питаются несколько индукторов, а остальные от другого/других преобразователей.

Кроме того, при питании нескольких индукторов от одного преобразователя возможны варианты параллельного, последовательного или комбинированного подключения. Каждый из описанных вариантов имеет преимущества и недостатки: конструкционные - по критериям унификации конструкции, мощности и количеству преобразователей, надежности, стоимости и пр.; технологические - показатели качества и точности нагрева; энергетические - удельные затраты и потери мощности.

При анализе схем питания индукторов установок нагрева заготовок из ферромагнитных материалов следует учитывать, что электрофизические свойства материала заготовок зависят от температуры, что приводит к тому, что у одинаковых индукторов в разных зонах энергетические показатели их работы будут разными. Таким образом, при выборе конфигурации индукционной установки в вопросах конструкции индукторов и системы их питания необходимо опираться на анализ электрофизических свойств материала заготовок, которые зависят от температуры.

Цель работы. Исследование вариантов питания индукторов в установках зонного нагрева с использованием изменения ферромагнитных свойств материала заготовок при различных температурах.

Материалы исследования. Рассмотрим две основные конструкции для зонного нагрева заготовок, при котором на всех индукторах напряжение и рабочая частота одинаковы – параллельное соединение индукторов:

индукторы с одинаковым числом витков;

индукторы с различным числом витков.

Преимущества и недостатки этих конструкций будут продемонстрированы на примере типовой установки нагрева стальных заготовок, состоящей из четырех индукторов, длина каждого индуктора 1500 мм для диаметра заготовки 100 мм и номинальной производительности 5000 кг/ч.

Эквивалентные параметры схемы замещения индуктора с заготовкой зависят от температуры. На рис. 1 приведены типовые кривые изменения R и X в процессе нагрева для магнитного и немагнитного металла для параллельной схемы замещения. Параметры R и X соответствуют полному заполнению индуктора полностью разогретым металлом. Отношение максимального значения R к минимальному составляет 1,5-2,5. Значение X уменьшается по ходу нагрева в 1,3–1,6 раза. Соответственно добротность Q может изменяться в 2–3 раза [1].

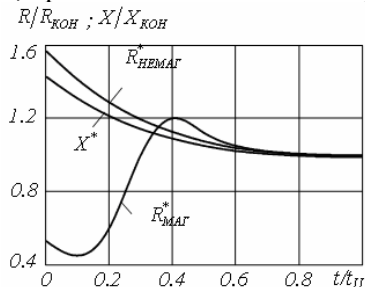


Рис. 1. Изменение в процессе нагрева параметров R для магнитной и немагнитной садки и X (по отношению к конечным значениям) в функции относительного времени $t/t_{ц}$, где $t_{ц}$ – длительность цикла нагрева

Эквивалентные активное r_H и индуктивное x_H сопротивления последовательной схемы замещения индуктора связаны с параметрами параллельной схемы (R и X) соотношениями

$$r_H = \frac{R}{Q_H^2 + 1}, \quad x_H = X \frac{Q_H^2}{Q_H^2 + 1} \quad (1)$$

где Q_H - добротность.

Добротности параллельной и последовательной схем замещения одинаковы

$$Q_H = \frac{x_H}{r_H} = \frac{R}{X} = \operatorname{tg} \varphi_H. \quad (2)$$

Для индукционного нагрева обычно $tg\varphi_H = Q_H = 4 \div 11$.

Экспериментально установлено [2], что добротность индуктора с магнитной садкой 2–2,3, с немагнитной заготовкой (заготовкой нагретой до температуры выше точки Кюри) 3,5–5, а пустого индуктора 6–8. Индуктивность пустого индуктора рассчитывается исходя из его геометрических размеров и числа витков [3]

$$L_0 = \frac{\pi D^2 \mu_0 W^2}{4l},$$

где D - средний диаметр индуктора; W - число витков; l - длина индуктора; μ_0 - магнитная постоянная.

Таким образом, методика определения параметров схемы замещения индуктора на каждой зоне состоит в использовании зависимостей индуктивности, сопротивления и добротности от температуры учитывая, что температура заготовок в от индуктора к индуктору увеличивается. Для пустого индуктора $Q=7,8$, исходя из чего определяем R_H . Для индуктора, заполненного заготовками, индуктивность при увеличении температуры изменяется от 1,13 до 0,83 индуктивности пустого индуктора. Добротность при увеличении температуры изменяется от 2 до 6,5.

Рассмотрим способ зонного нагрева, при котором все зонные индукторы подключены параллельно к одному источнику питания и имеют одинаковое число витков. Для моделирования режима работы установки с указанными параметрами индукторов в соответствии с известными характеристиками изменения их параметров были определены эквивалентные параметры активного и реактивного сопротивлений для всех зон нагрева. Полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопротивления и индуктивности схемы замещения индукторов для зон нагрева ($f = 1000$ Гц)

Параметры	Пустой	1 зона	2 зона	3 зона	4 зона
R_H , Ом	0,028	0,112	0,036	0,025	0,025
L_H , мкГн	31,5	35,7	28,9	26	26
Q	6,8	2	5	6,5	6,5
W , шт	44	44	44	44	44

Распределение мощностей проверялось на схемотехнической модели в пакете OrCAD. Схема модели представлена на рис. 2. В качестве источника питания принята модель генератора с амплитудным значением напряжения 846 В (соответствует действующему значению 600 В) и частотой 975 Гц, обеспечивающие резонанс в контуре.

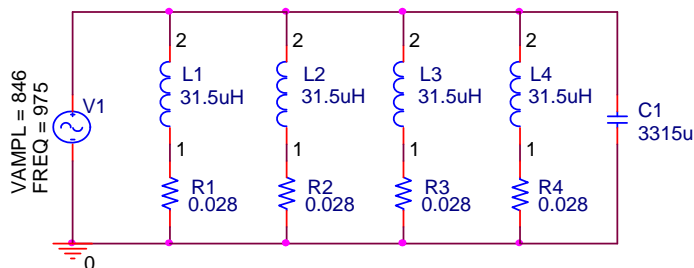


Рис. 2. Схема модели в пакете OrCAD

Для анализа работы установки многозонного нагрева были рассмотрены режимы работы начиная с пустых индукторов и заканчивая полностью загруженными.

Результаты моделирования работы с пустыми индукторами сведены в табл. 2.

Включение источника питания на пустые индукторы не приводит к перегрузке по установленной мощности, но при этом будет большое потребление электроэнергии из сети (63% от номинальной).

Таблица 2

Показатели распределения мощностей при пустых индукторах ($U = 600$ В, $f = 975$ Гц)

Номер индуктора	L_H , мкГн	R_H , Ом	Q	I , А	P , кВт	C , мкФ
1	31,5	0,028	6,8	3077	264,4	570
2	31,5	0,028	6,8	3077	264,4	845
3	31,5	0,028	6,8	3077	264,4	950
4	31,5	0,028	6,8	3077	264,4	950
Σ				12308	1057,6	3315

Далее проведен анализ работы установки по мере загрузки индукторов. Результаты моделирования работы с первым загруженным и тремя пустыми индукторами сведены в табл. 3.

Из представленных данных видно, что при загрузке первого индуктора выросла на нем и мощность, вследствие этого и увеличилась потребляемая мощность источника питания до 1543 кВт.

Результаты моделирования работы с первым и вторым загруженным и двумя пустыми индукторами сведены в табл. 4.

Из представленных данных видно, что при загрузке следующего индуктора также выросла на нем и мощность, вследствие этого и увеличилась потребляемая мощность источника питания до 1665,9 кВт, что не приводит к перегрузке по установленной мощности.

Таблица 3

Показатели распределения мощностей при загруженном первом индукторе ($U = 600$ В, $f = 940$ Гц)

Номер индуктора	L_n , мкГн	R_n , Ом	Q	I, А	P, кВт	C, мкФ
1	35,7	0,112	2	2496	698,2	570
2	31,5	0,028	6,8	3174	281,6	845
3	31,5	0,028	6,8	3174	281,6	950
4	31,5	0,028	6,8	3174	281,6	950
Σ				12018	1543	3315

Таблица 4

Показатели распределения мощностей при двух загруженных индукторах ($U = 600$ В, $f = 945$ Гц)

Номер индуктора	L_n , мкГн	R_n , Ом	Q	I, А	P, кВт	C, мкФ
1	35,7	0,112	2	2486	692,7	570
2	28,9	0,036	5	3398	416,4	845
3	31,5	0,028	6,8	3154	278,4	950
4	31,5	0,028	6,8	3154	278,4	950
Σ				12192	1665,9	3315

Результаты моделирования работы с загруженными тремя индукторами и одним пустым сведены в табл. 5. При загрузке третьего индуктора мощность на нем также выросла и, вследствие этого и изменилась потребляемая мощность источника питания до 1675,1 кВт, что также не приводит к перегрузке по установленной мощности.

Таблица 5

Показатели распределения мощностей при трех загруженных индукторах ($U = 600$ В, $f = 975$ Гц)

Номер индуктора	L_n , мкГн	R_n , Ом	Q	I, А	P, кВт	C, мкФ
1	35,7	0,112	2	2443	667,6	570
2	28,9	0,036	5	3322	397,2	845
3	26	0,025	6,5	3719	345,8	950
4	31,5	0,028	6,8	3075	265,1	950
Σ				12559	1675,1	3315

Результаты моделирования работы с загруженными четырьмя индукторами сведены в табл. 6.

Таблица 6

Показатели распределения мощностей при четырех загруженных индукторах ($U = 600$ В, $f = 1000$ Гц)

Номер индуктора	L_n , мкГн	R_n , Ом	Q	I, А	P, кВт	C, мкФ
1	35,7	0,112	2	1066	634,3	570
2	28,9	0,036	5	627,7	375,1	845
3	26	0,025	6,5	547,8	326,8	950
4	26	0,025	6,5	547,8	326,8	950
Σ				2789,3	1663	3315

Из представленных диаграмм видно, что при загрузке всех индукторов мощность распределилась между ними, таким образом, что в результате зависимости теплофизических свойств заготовок от температуры мощность на первом индукторе выделяется больше чем на последующих. Потребляемая мощность источника питания составила до 1663 кВт.

Как видно из табл. 6, мощности, потребляемые индукторами, при параллельном включении уменьшаются с увеличением температуры заготовки, т.е. мощность индукторов природным образом, согласно свойствам материала заготовок, распределяется так, что заготовка с меньшей температурой потребит на нагрев большую мощность.

Такое естественное распределение мощностей может использоваться в установках зонного нагрева, а работа с такой программой нагрева, вероятно, будет оптимальной с точки зрения потребляемой энергии.

Обеспечить необходимую конечную температуру заготовок в этом случае можно при регулировании производительности или напряжения на индукторах. При нагреве с заданной производительностью распределение мощностей индукторов должно быть другим.

Как ранее было установлено [4], чтобы достичь эффективного теплового процесса нагрева заготовок необходимо иметь соотношение мощностей в индукторах 8:4:2:1.

Для этого были выполнены расчеты параметров индукторов и проведено исследование другого способа зонного нагрева, при котором все зонные индукторы подключены параллельно к тому же источнику питания, но имеют различное число витков W . Результаты моделирования работы с загруженными четырьмя индукторами сведены в табл. 7, а показания мощности на каждом индукторе представлены в виде гистограммы на рис. 3, где так же отражены результаты, представленные в табл. 2-6.

Таблица 7
Показатели распределения мощностей при загруженных четырех индукторах с разным числом витков
($U = 600 \text{ В}$, $f = 1000 \text{ Гц}$)

Номер индуктора	L_n , мкГн	R_n , Ом	Q	W	I , А	P , кВт	C , мкФ	
1	24,6	0,067	2,3	35	1412	840,2	860	
2	27	0,039	5	43	770	459,4	890	
3	38,1	0,038	6,35	63	387	231,1	648	
4	66,57	0,066	6,35	70	221	131,3	372	
Σ						2790	1662	2770

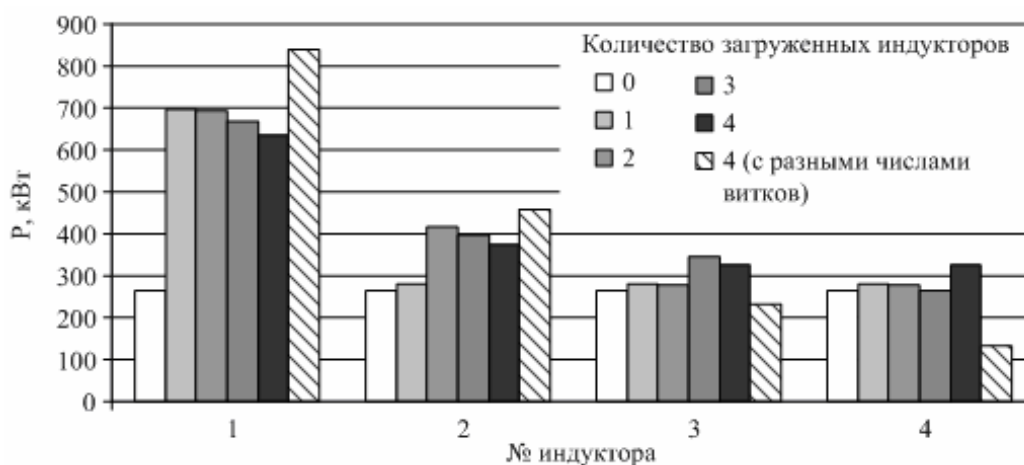


Рис. 3. Распределение мощностей при различном количестве загруженных индукторов

Из представленных диаграмм видно, что при 100% нагрузке всех индукторов мощность распределилась между ними в соответствии с установленным соотношением 8:4:2:1.

Вследствие этого потребляемая мощность источника питания составила те же 1662 кВт, но при этом потребовалась меньшая компенсирующая емкость конденсатора резонансного инвертора частоты. Таким образом, для достижения оптимального распределения мощности индукторов при питании их от одного источника числа витков индукторов каждой зоны должны быть разными, а значит, индукторы должны иметь различные конструкции.

Вариант приближения распределения мощностей к оптимальному может быть реализован с одинаковыми индукторами каждой зоны при питании индукторов последней или нескольких последних зон от индивидуальных преобразователей.

Полученные в статье распределения мощностей опирались интегральные показатели, которые имеют большой разброс и не претендуют на однозначность. Определенная неточность исследования вызвана неточностью выбора относительных значений параметров эквивалентных электрических схем замещения индукторов.

Для более точных оценок и окончательных рекомендаций выбора системы питания индукторов интегральные показатели значений параметров должны быть проверены путем конечно-элементного моделирования.

Не исключается, что с уточненными значениями схем замещения распределение мощностей индукторов может быть ближе к оптимальному.

Выводы. Зависимость от температуры электромагнитных свойств материала ферромагнитных заготовок приводит к тому, что в каждой зоне индукционного нагрева параметры эквивалентных электрических схем замещения будут различными.

Такие свойства материала могут быть использованы при выборе схемы включения индукторов при построении силовых частей установок зонного индукционного нагрева. Параметры эквивалентных электрических схем замещения изменяются таким образом, что при включении индукторов параллельно и питании их от одного преобразователя частоты мощности, потребляемые индукторами, при увеличении температуры уменьшаются.

Мощности распределяются в соответствии с температурой, причем такой характер их распределения близок к оптимальному.

Однако для обеспечения оптимального распределения мощностей и точного нагрева индукторы последних ступеней должны иметь или другую конструкцию, с увеличенным числом витков, или получать питание от отдельного преобразователя частоты.

Таким образом, первые индукторы в установке зонного индукционного нагрева могут быть одинаковыми и получать питание от одного преобразователя, а значит, количество преобразователей может быть меньше количества индукторов.

Список литературы

1. Беркович Е. И. Тиристорные преобразователи высокой частоты / Е. И. Беркович, Г. В. Ивенский, Ю. С. Иоффе и др. – Л.: Энергия, 1973. – 200 с.
2. Земан С. К. Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемый объект» / С. К. Земан, А. В. Осипов, М. С. Макаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – № 1(310). – С. 191-196.
3. Слухоцкий А. Е. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 326 с.
4. Морозов Д. И. Алгоритм определения программ нагрева в многоиндукторных нагревательных установках / Д. И. Морозов, Е. С. Руднев, Д. В. Ушаков // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 20. – С. 56-62.

Рукопись подано до редакції 18.04.2017