

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ

INDUCTION SYSTEMS PARAMETERS DETERMINING

(Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет)
(St. Petersburg State Electrotechnical University)

Межотраслевая лаборатория современных электротехнологий (МОЛСЭТ)
Interindustrial laboratory of modern electrotechnologies (ILME)

Тихомиров Илья Сергеевич,

кандидат технических наук, младший научный сотрудник

I. Tihomirov,

candidate of technical sciences, junior researcher

Фадеев Алексей Алексеевич,

младший научный сотрудник

A. Fadeev,

junior researcher

Целикова Елена Николаевна,

аспирант

E. Tselikova,

postgraduate student

Ключевые слова: индукционная система, согласующее устройство, высокочастотный транзисторный источник питания.

Keywords: induction system, matching device, high-frequency transistor power supply.

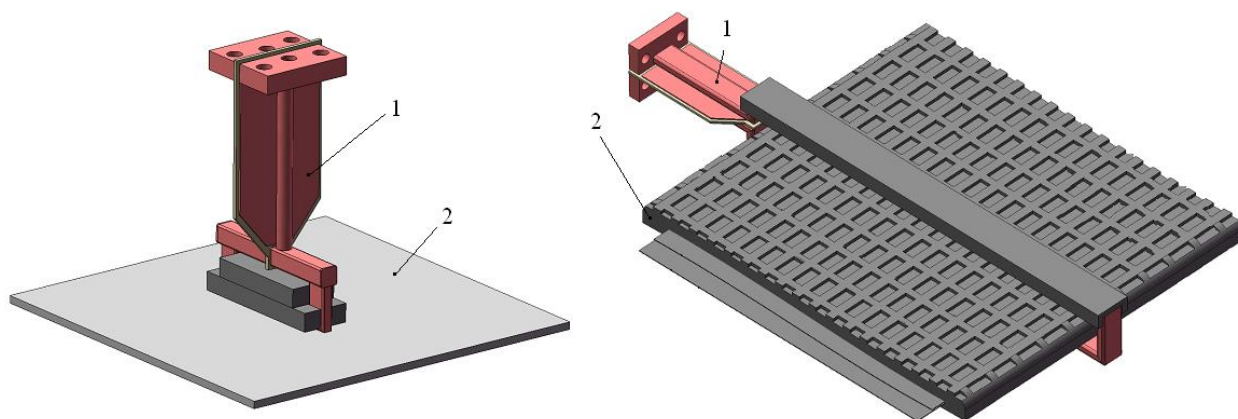
Аннотация: В статье были определены электрические параметры индукционных систем при нагреве листа из сплава алюминия и корда автомобильной покрышки. Параметры определялись с помощью программного обеспечения FEMM 4.2. Проверка результатов осуществлялась экспериментальным способом.

Abstract: Electrical parameters of induction systems for aluminum alloy sheet and the cord of tires heating were determined. Parameters were determined by using FEMM 4.2 software. Verification of the results was made by experimental method.

Основными элементами современных высокочастотных нагревательных комплексов являются транзисторный преобразователь частоты, согласующее устройство и индуктор. Согласующее устройство предназначено для согласования параметров индукционной системы с параметрами преобразователя частоты. Основными элементами согласующего устройства являются высокочастотный трансформатор (предназначен для согласования индукционной системы и преобразователя частоты по активному сопротивлению) и компенсирующий конденсатор (предназначен для компенсации реактивной мощности индукционной системы). Структура электрической схемы согласующего устройства зависит от схемы высокочастотного инвертора в преобразователе частоты. При использовании транзисторного инвертора тока применяется параллельная схема согласования, т.е. компенсирующий конденсатор устанавливается параллельно с индукционной системой. При использовании транзисторного инвертора напряжения применяется последовательная схема согласования, т.е. компенсирующий конденсатор устанавливается последовательно с индукционной системой. В обоих случаях конденсатор может быть установлен как на высокой стороне согласующего трансформатора, так и на низкой. Для определения параметров составляющих частей согласующего устройства (коэффициента трансформации высокочастотного трансформатора и ёмкости компенсирующего конденсатора) необходимо сначала определить параметры индукционной системы, которую необходимо согласовать с источником питания.

В данной статье описывается определение параметров индукционных систем для двух различных технологий: правка настилов из сплавов алюминия [3], отделение металлического корда от резины при утилизации автомобильных покрышек [4]. Внешний вид индукционных систем показан на рис. 1. Все приведённые исследования проводятся в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 г.

Параметры индукционной системы можно определить либо применив аналитические методы, которые подробно описаны в соответствующей литературе [1,2], либо использовать специальное программное обеспечение. В данной статье описано определение параметров индукционных систем с помощью программы FEMM 4.2.



(а) (б)
Рис. 1. Индукционные системы (1 – индуктор, 2 – деталь)

На рис. 2 показана геометрия двумерной модели индукционной системы при нагреве поверхности плоским индуктором. В качестве детали принят лист из алюминия толщиной 4 мм. Нагревательная часть индуктора выполнена из профилированной трубки 12x6 мм с толщиной стенки 1 мм, магнитопровод выполнен из феррита 2500 НМС1, толщина магнитопровода 10 мм, длина нагревательной части – 70 мм. Обратный проводник выполнен из профилированной трубки 8x8 мм с толщиной стенки 1 мм. Зазор между индуктором и алюминиевой плитой равен 0.3 мм. При расчёте удельное сопротивление меди было взято для температуры 20 °С. Размер сетки магнитопровода равен 0.1 мм, размер сетки индуктора и сетки алюминиевого листа равен 0.05 мм. При расчете частота тока индуктора принята равной 66 кГц, а действующее значение тока – 1000 А. После решения электромагнитной задачи были получены следующие результаты (таблица 1). В них учтены активное сопротивление и индуктивность подводящих шин индуктора.

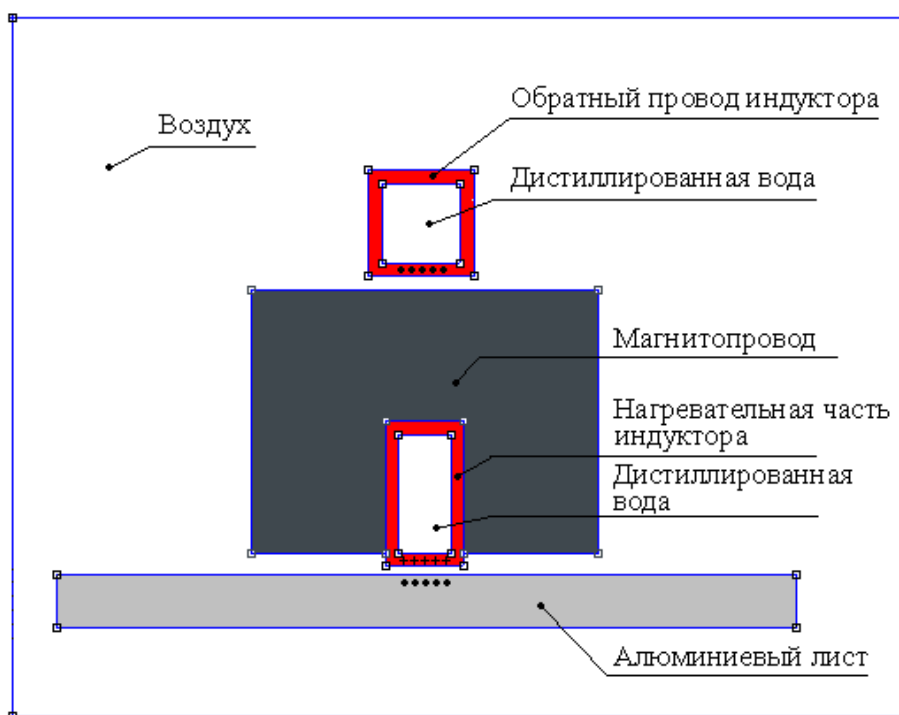


Рис. 2. Геометрия двумерной компьютерной модели индукционной системы при нагреве поверхности

Таблица 1: Результаты компьютерного моделирования

$P_{дет. Вт}$	$P_{инд. Вт}$	КПД %	$r_{э} Ом$	$L_{э} мкГн$
676	636	52	0.0045	0.093

$P_{дет.}$ – мощность, выделяемая в детали, $P_{инд.}$ – мощность, выделяемая в индукторе, $r_{э}$ – эквивалентное сопротивление индукционной системы, $L_{э}$ – эквивалентная индуктивность индукционной системы, КПД – коэффициент полезного действия индуктора.

Двумерная модель индукционной системы с овальным индуктором показана на рис. 3. Индуктор выполнен из профилированной медной трубки 20x7.5 мм с толщиной стенки 1.5 мм. Высота окна индуктора равна 30 мм. Расстояние между слоями корда 1 мм, зазор между внешним слоем и индуктором составляет 20.4 мм (воздух 5 мм + резина 15.4 мм), а между внутренним слоем и индуктором 7.4 мм (воздух 5 мм + резина 2.4 мм). Размер сетки магнитопровода равен 0.1 мм, размер сетки индуктора и стального корда равен 0.05 мм. При расчётах в качестве материала корда была взята сталь 20. При расчете частота тока индуктора принята равной 66 кГц, а действующее значение тока – 1000 А. При моделировании было принято следующее допущение: каждый слой автомобильного корда заменён цельной стальной полосой толщиной 0.6 мм. После решения электромагнитной задачи были получены следующие результаты (таблица 2). Эти результаты учитывают активное сопротивление и индуктивность подводящих шин индуктора.

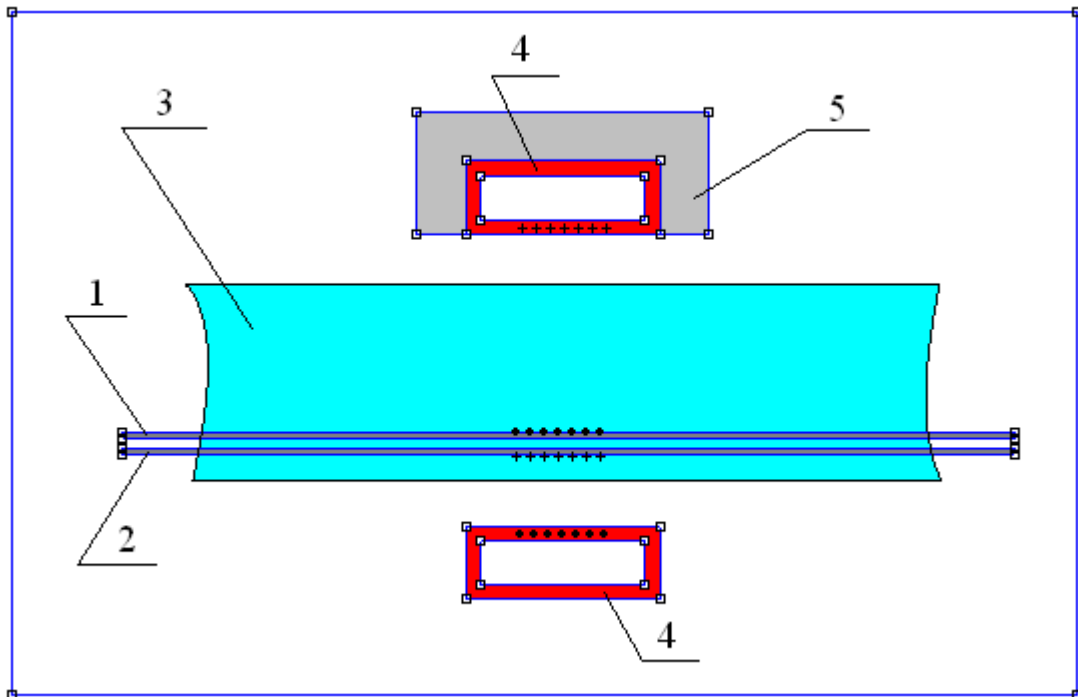


Рис. 3. Геометрия двумерной компьютерной модели индукционных систем при нагреве корда автомобильной покрышки (1 – внешний слой корда (ширина 240 мм), 2 – внутренний слой корда (ширина 240 мм), 3 – резина, 4 – индуктор, 5 – магнитопровод)

Таблица 2: Результаты компьютерного моделирования

$P_{внеш. кВт}$	$P_{внут. кВт}$	$P_{дет. кВт}$	$P_{инд. кВт}$	КПД %	$r_{э} Ом$	$L_{э} мкГн$
6.6	5.9	12.5	7.4	63	0.0168	0.259

$P_{внеш.}$ – мощность, выделяемая во внешнем слое корда, $P_{внут.}$ – мощность, выделяемая во внутреннем слое корда, $P_{дет.}$ – суммарная мощность, выделяемая в корде, $P_{инд.}$ – мощность, выделяемая в индукторе, $r_{э}$ – эквивалентное сопротивление индукционной системы, $L_{э}$ – эквивалентная индуктивность индукционной системы, КПД – коэффициент полезного действия индуктора.

Для оценки полученных значений $r_{э}$ и $L_{э}$ были проведены эксперименты. При нагреве листа из сплава алюминия использовался транзисторный преобразователь частоты ТГИ40/100 и согласующее устройство, имеющее коэффициент трансформации высокочастотного трансформатора, равный 30, и

компенсирующий конденсатор ёмкостью 40 мкФ. Компенсирующий конденсатор в используемом согласующем устройстве установлен последовательно с индуктором на низкой стороне согласующего трансформатора. Внешний вид индукционной системы показан на рис. 4.



Рис. 4. Нагрев листа из сплава алюминия

Были получены следующие результаты: входная мощность источника питания $P_d = 8.2$ кВт, выходной ток источника питания $I_a = 48.7$ А, частота выходного тока источника питания $f = 65.3$ кГц. Подробнее технология правки настилов из сплавов алюминия и эксперимент описаны в [3].

Определим активную мощность, которая выделяется в индукционной системе $P_{ис}$.

$$P_{ис} = P_d \cdot \eta_{ип} \cdot \eta_{бс} = 8.2 \cdot 0.96 \cdot 0.8 \approx 6.3 \text{ [кВт]}, \quad (1)$$

где $\eta_{ип}$ – КПД источника питания (для ТГИ40/100 КПД = 96%), $\eta_{бс}$ – КПД блока согласования (КПД = 80%). Значения КПД взяты из паспортных данных источника питания и блока согласования.

Определим эквивалентное активное сопротивление индукционной системы $r_{э}$.

$$r_{э} = \frac{P_{ис}}{I_{и}^2}, \quad (2)$$

где $I_{и}$ – ток индуктора, [А].

$$I_{и} = 0.95 \cdot I_a \cdot k_{мп}, \quad (3)$$

где $k_{мп}$ – коэффициент трансформации согласующего трансформатора (в рассматриваемом случае $k_{мп} = 30$); 0.95 – коэффициент, учитывающий ток холостого хода высокочастотного трансформатора, I_a – выходной ток преобразователя частоты [А].

$$r_{э} = \frac{P_{ис}}{I_{и}^2} = \frac{P_{ис}}{(0.95 \cdot I_a \cdot k_{мп})^2} = \frac{6300}{(0.95 \cdot 48.7 \cdot 30)^2} = 0.0033 \text{ [Ом]}$$

Определим эквивалентную индуктивность индукционной системы $L_{э}$.

$$L_{э} = \frac{X_L}{2\pi f}, \quad (4)$$

где f – частота тока индуктора [Гц], X_L – индуктивное сопротивление индукционной системы [Ом].

$$X_{\Sigma} = X_L - X_C \Rightarrow X_L = X_{\Sigma} + X_C, \quad (5)$$

где X_{Σ} – реактивное сопротивление нагрузочного контура состоящего из компенсирующего конденсатора и индукционной системы [Ом]; X_C – реактивное сопротивление компенсирующего конденсатора [Ом].

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 65300 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 0.061 \text{ [Ом]}, \quad (6)$$

где C – ёмкость компенсирующего конденсатора [Ф].

$$Z = \sqrt{r_{э}^2 + X_{\Sigma}^2} \Rightarrow X_{\Sigma} = \sqrt{Z^2 - r_{э}^2}, \quad (7)$$

где Z – полное сопротивление нагрузочного контура [Ом].

$$Z = \frac{U_2}{I_{и}}, \quad (8)$$

где U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора [В].

$$U_2 = \frac{U_1}{k_{mp}}, \quad (9)$$

где U_1 – напряжение на первичной обмотке трансформатора [В] (в нашем случае $U_1 = 450$ В).

$$U_2 = \frac{U_1}{k_{mp}} = \frac{450}{30} = 15 \text{ [В];}$$

$$Z = \frac{U_2}{I_{II}} = \frac{U_2}{0.95 \cdot I_a \cdot k_{mp}} = \frac{15}{0.95 \cdot 48.7 \cdot 30} \approx 0.0108 \text{ [Ом];}$$

$$X_{\Sigma} = \sqrt{Z^2 - r_{\text{э}}^2} = \sqrt{0.0108^2 - 0.0033^2} \approx 0.0103 \text{ [Ом];}$$

$$X_L = X_{\Sigma} + X_C = 0.0103 + 0.061 = 0.0713 \text{ [Ом];}$$

$$L_{\text{э}} = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.0713}{2 \cdot 3.14 \cdot 65300} \approx 0.174 \text{ [мкГн].}$$

При нагреве корда автомобильной покрышки использовался транзисторный преобразователь частоты ТГИ40/100, согласующее устройство, имеющее коэффициент трансформации высокочастотного трансформатора, равный 27, и компенсирующий конденсатор ёмкостью 40 мкФ. Компенсирующий конденсатор в используемом согласующем устройстве установлен последовательно с индуктором на низкой стороне согласующего трансформатора. Внешний вид индукционной системы показан на рис. 5.



Рис. 5. Нагрев проволочного корда автомобильной покрышки

Были получены следующие результаты: входная мощность источника питания $P_d = 5$ кВт, выходной ток источника питания $I_a = 16$ А, частота выходного тока источника питания $f = 45$ кГц. Подробнее технология отделения корда от резины при утилизации автомобильных покрышек и эксперимент описаны в [4]. Проведя вычисления по формулам (1) – (9), получим следующие значения $r_{\text{э}} = 0.0228$ Ом, $L_{\text{э}} = 0.432$ мкГн.

Значения параметров индукционных систем, определённые экспериментально и полученные с помощью компьютерного моделирования, сведены в таблицу 3.

Таблица 3: Результаты компьютерного моделирования и эксперимента

	Нагрев листа из сплава алюминия		Нагрев проволочного корда автомобильной покрышки	
	$r_{\text{э}}$ Ом	$L_{\text{э}}$ мкГн	$r_{\text{э}}$ Ом	$L_{\text{э}}$ мкГн
Компьютерное моделирование	0.0045	0.093	0.0168	0.0259
Эксперимент	0.0033	0.174	0.0228	0.432

Результаты, полученные экспериментально отличаются от результатов, полученных при компьютерном моделировании. Это связано с тем, что при моделировании были приняты следующие допущения:

- 1) в качестве материала листа рассматривался чистый алюминий;
- 2) проволочный корд был заменён лентой;
- 3) не учитывалась нелинейность магнитопроводов;
- 4) не учитывалась температурная зависимость удельного сопротивления.

Разработанные упрощенные двумерные модели подходят для ориентировочного определения параметров согласующих устройств. Для получения же более точных результатов, необходимых для оптимизации индукционной системы, правильнее будет применять более сложное программное обеспечение, позволяющее работать с трехмерными моделями.

Список литературы

1. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. - 264 с.
2. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер; Под ред. А. Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981.- 328 с., ил.
3. Тихомиров И.С., Фадеев А.А., Целикова Е.Н. Применение токов высокой частоты для правки конструкций из сплавов алюминия, // Индукционный нагрев. - 2011 № 4 (18)
4. Тихомиров И.С., Фадеев А.А. Применение высокочастотного нагрева для отделения металлического корда от резины при утилизации автомобильных покрышек, // Индукционный нагрев. - 2012 №1 (19)