

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ ПРОВОЛОКИ В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКТОРЕ

Дзлиев С.В., Ершов Д.В.

(Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет,
Санкт-Петербург, Россия, dzlsv@mail.ru)

Введение

Индукционный нагрев движущейся проволоки имеет большие преимущества перед другими методами нагрева, так как обеспечивает бесконтактную передачу мощности и высокую производительность при небольших размерах нагревательного оборудования.

Примером возможного эффективного применения индукционного нагрева проволоки является производство самонесущего изолированного кабеля (СИП), которое включает операцию подогрева непрерывно движущихся алюминиевых жил до температуры 80–120°C перед нанесением полиэтиленовой изоляции.

Для индукционного нагрева в линиях производства проводов СИП используются спиральные индукторы, основным недостатком которых является низкий коэффициент полезного действия, как правило, не превышающий 18 – 25 %.

Низкий КПД спирального индуктора объясняется тем, что длина пути тока в индукторе существенно больше, чем в нагреваемой проволоке, а удельное сопротивление меди, из которой выполнен индуктирующего провод, лишь незначительно меньше, чем у нагреваемого алюминия. Нагрев проволоки различного диаметра в одном спиральном индукторе приводит к дополнительному снижению КПД при нагреве проволоки минимального диаметра из-за увеличения зазора между индуктором и проволокой.

Основные пути повышения КПД индукционной системы нагрева алюминиевой проволоки, это выравнивание длины пути тока в индукторе и в проволоке, концентрация тока в малом сечении проволоки при максимальном снижении плотности тока в индукторе [1], сохранение минимального зазора при изменении диаметра нагреваемой проволоки. Эти условия могут быть выполнены при использовании линейного проходного индуктора с оптимальной формой индуктирующего провода.

Работа посвящена теоретической оценке на математических моделях и экспериментальному исследованию эффективности нагрева алюминиевой проволоки в линейном индукторе при различной форме сечения индуктирующего провода и магнитопровода.

Моделирование линейных индукторов

Цель моделирования – выбор оптимальной формы и размеров индуктора путем оценки и сравнения КПД индукционных систем.

Моделирование электромагнитного поля выполнено в пакете программ MAXWELL 2D [2] методом конечных разностей.

Допущения, принятые при моделировании:

- Применяющийся при производстве проводов СИП повитый алюминиевый провод, состоящий из нескольких алюминиевых жил и центральной стальной жилы, представлен однородным алюминиевым цилиндром эквивалентного диаметра;
- Моделирование электромагнитного поля системы индуктор-провод выполнено без учета нагрева при одинаковой по сечению и по длине температуре провода, заданной как среднее значение температуры в установившемся режиме;
- Модель выполнена в двумерной постановке и не учитывает краевых эффектов;
- Моделирование проводилось при заданном постоянном значении тока индуктора.

Исследованный **индуктор без магнитопровода** представляет собой две медные трубки круглого сечения расположенные вдоль нагреваемой проволоки с двух сторон от нее (рис. 1а). На рис. 1б приведен расчетный график распределения плотности тока по периметру кругового сечения индуктирующего провода, нормированной относительно значения плотности тока в точке, ближайшей к нагреваемой проволоке.

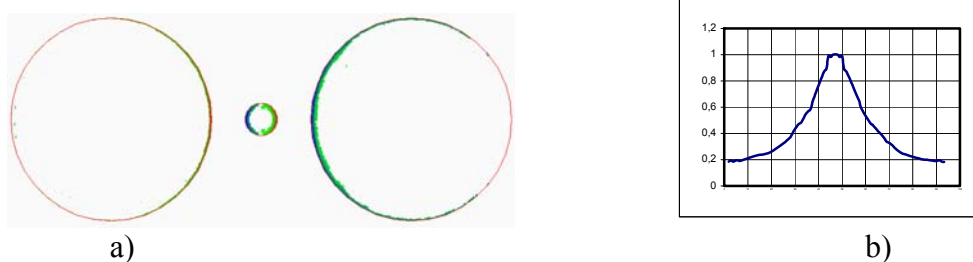


Рис. 1. Распределение плотности тока в индуктирующем проводе

Для этой конфигурации индукционной системы исследована зависимость КПД от соотношения диаметров индуктирующего провода и проволоки, а также от зазора между ними.

Для общности представления результатов расчетов введены относительные параметры $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d_2}$ и $\bar{d}_1 = \frac{d_1}{d_2}$, где Δ - зазор между индуктирующим проводом и нагреваемой проволокой, d_1 и d_2 – диаметр индуктирующего провода и нагреваемой проволоки. Такое обобщение справедливо при высокой частоте, когда глубина проникновения тока в материал детали и индуктора существенно меньше их линейных размеров.

КПД

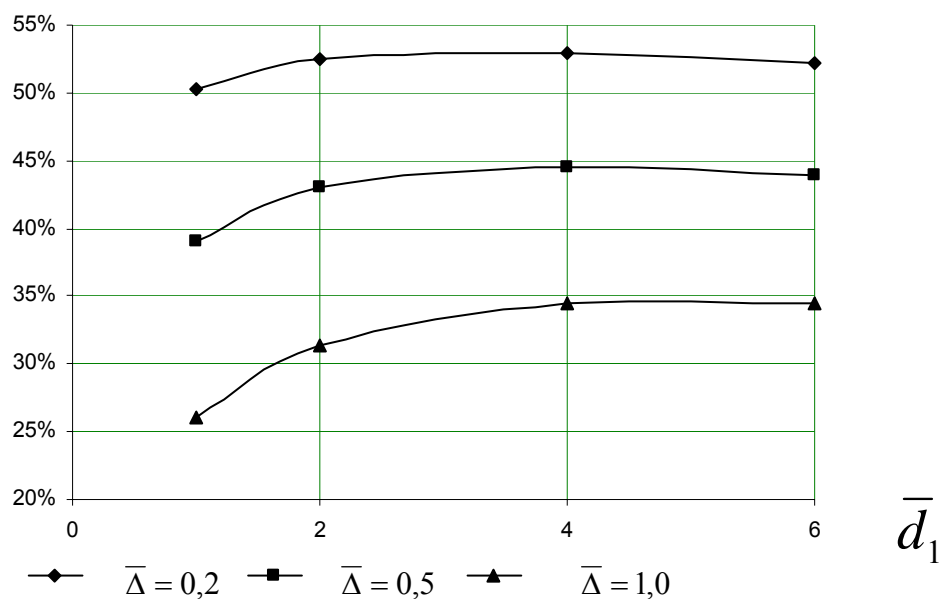


Рис. 3. Зависимость электрического КПД линейного индуктора от относительного диаметра проволоки \bar{d}_1 при различных значениях зазора $\bar{\Delta}$

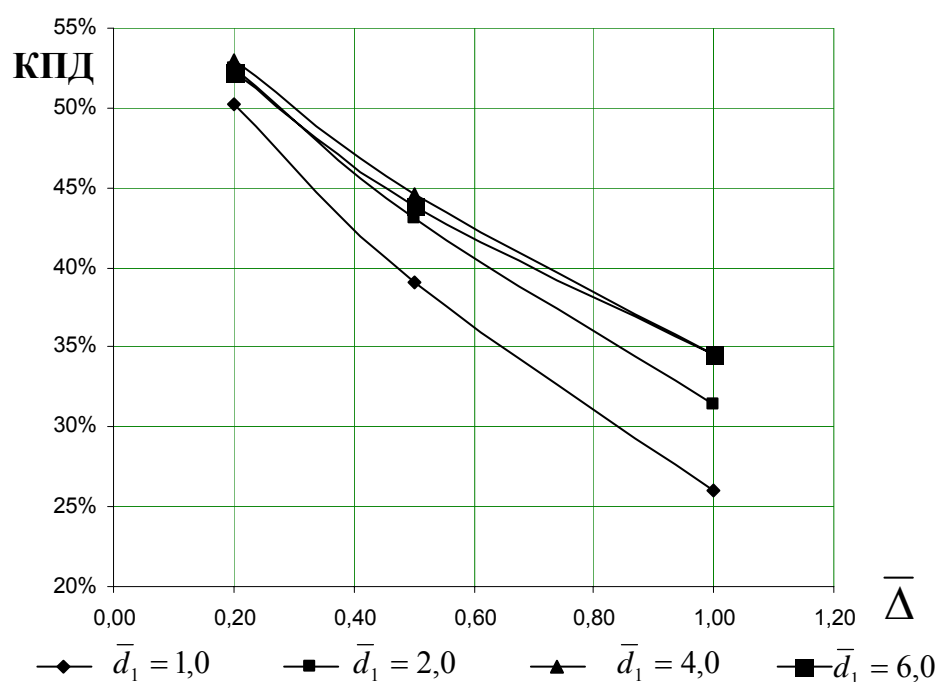


Рис. 4. Зависимость электрического КПД линейного индуктора от зазора $\bar{\Delta}$ при различных значениях диаметра индуктирующего провода \bar{d}_1 .

КПД индуктора имеет слабо выраженный максимум при $\bar{d}_1 = 4$ (рис. 3), но при $\bar{d}_1 < 2$ резко падает. Такой характер зависимости позволяет выбрать единый диаметр индуктирующего провода, который обеспечивает высокий КПД для широкой номенклатуры нагреваемых проволок.

Оптимальный диаметр индуктирующего провода равен $2d_{2\max}$, где $d_{2\max}$ – максимальный диаметр нагреваемого провода.

При уменьшении зазора (рис. 4) КПД растет и слабо зависит от диаметра индуктирующего провода, поэтому целесообразно выбрать значение $\bar{\Delta}$ в диапазоне 0.2 – 0.5.

КПД линейного индуктора при нагреве алюминиевой проволоки достигает 50-52%, что существенно выше, чем КПД спирального индуктора.

Дальнейшего повышение КПД линейного индуктора можно ожидать при использовании магнитопровода, который позволит сконцентрировать ток индуктора в зоне, близкой к нагреваемой проволоке.

Исследованный **индуктор с магнитопроводом** представляет собой две медных трубки прямоугольного сечения со скругленными углами, окруженные с трех сторон магнитопроводом из феррита, а нагреваемая проволока помещается между ними (рис.5).

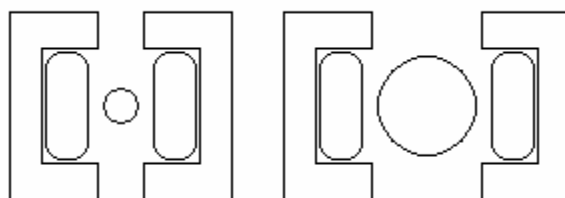


Рис. 5. Сечение линейного индуктора с магнитопроводом при нагреве проволоки разных диаметров с постоянным зазором

Размеры исследованных индукционных систем: индуктирующий провод – 14.5x7 мм, феррит толщиной 5 мм, выступ феррита 3.4 мм. Диаметры нагреваемой проволоки – 4.8мм и 14.2мм. В табл. 1 сведены основные результаты, полученные при моделировании.

Таблица 1.

D, мм	КПД	X_L , Ом	R, Ом	Cosφ	I_{in}/I_d	L, мкГн	C, мкФ	I_{in} , А	U_{in} , В	P, кВА
14.2	59.08%	0.224	0.024	0.104	1.02366	0.54049	10.76	1127.35	254.08	286.43
4.8	53.70%	0.249	0.021	0.083	1.73839	0.60026	9.69	1200.09	299.77	359.75

Использование феррита повышает КПД системы до 53-59%.

Экспериментальные исследования линейных индукторов

Экспериментальные исследования линейного индуктора выполнены на макетной установке, в состав которой входит транзисторный генератор ТГИ-40/100 (40 кВт, 66 кГц), согласующий трансформатор и конденсаторная батарея, компенсирующая реактивную мощность индуктора.

Нагреваемый кабель в эксперименте, также как и при моделировании, заменен алюминиевой трубкой с водяным охлаждением.

Эксперименты с **индуктором без магнитопровода** проводились на уровне мощности 3 кВт.

Индуктор и нагреваемая алюминиевая трубка имели независимые ветви водяного охлаждения. Для определения мощности, выделяющейся в них, и оценки КПД индукционной системы проводилось калориметрирование – измерение расхода воды и разности температур воды на входе и выходе каждой ветви охлаждения.

Измеренные значения КПД индукционной системы для различных значений зазоров между индуктором и нагреваемой трубкой ($\Delta 1$ и $\Delta 2$ – зазоры слева и справа от нагреваемой трубки) сведены в табл. 2.

Таблица 2.

№	$\Delta 1/\Delta 2$, мм	КПД, %	
		Расчет	Эксперимент
1	2/2	47	44
2	4/4	41	38
3	6/6	36	31
4	2/6	43	40

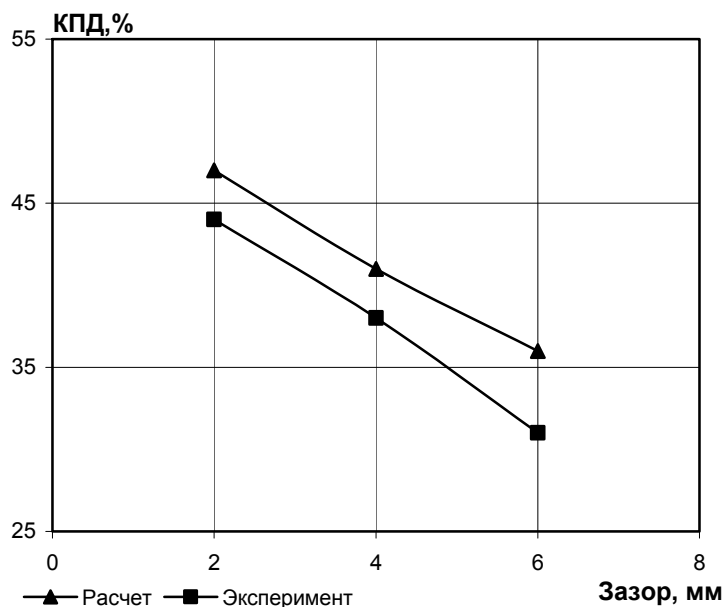


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений КПД индукционной системы

Расчетные и экспериментально снятые зависимости КПД индуктора от зазора отличаются в среднем на 7%, что связано, по-видимому, с расхождениями свойств материалов, принятых при моделировании и использованных в эксперименте. Кроме того, более высокий расчетный КПД связан с тем, что в модели не учтены потери в перемычках и выводах индуктора.

Смещение нагреваемого кабеля от оси индуктора приводит к незначительному повышению КПД (строка 4 табл. 2).

Экспериментальные исследования индукционной системы с магнитопроводом выполнялись на той же макетной установке на уровне мощности 15 и 30 кВт

Полученные в ходе экспериментов результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Мощность, потребляемая от сети, кВт	14,4	30,0
Мощность потерь в индукторе, кВт	6,31	12,80
Мощность в нагреваемой алюминиевой трубке (макет проволоки), кВт	7,35	15,27
Мощность потерь в генераторе ТГИ 40/100-3 и согласующем устройстве, кВт	0,63	1,60
Суммарная мощность, кВт	14,29	29,67
КПД индукционной системы	53,80	54,41
Общий КПД	51,44	51,47

Проведен также эксперимент по нагреву неподвижного повитого алюминиевого провода в индукторе с магнитопроводом. Ввиду сложности отвода тепла нагрев производился в импульсном режиме при различном значении уставки мощности. Длительность импульса включения 0.5с. График мощности, потребляемой от транзисторного генератора ТГИ 40/100-3 (рис. 7), записан с помощью микропроцессорной системы управления генератора.

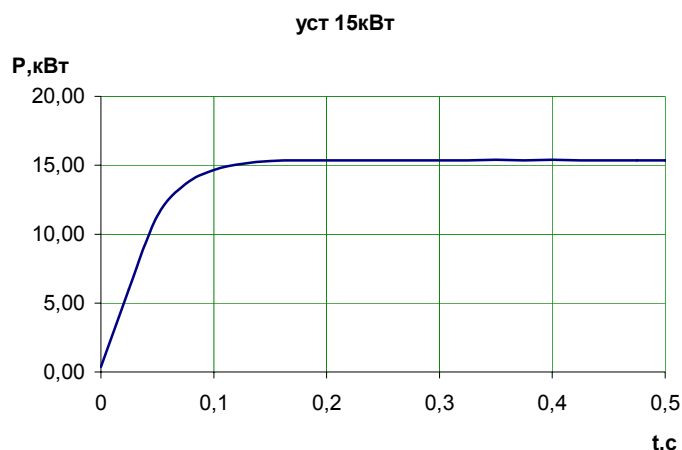


Рис. 7. График мощности при импульсном нагреве повитого провода

Для более детального исследования степени влияния повива требуется проведение экспериментальных исследований в промышленных условиях на линии по производству кабельной продукции. Для этих целей изготовлен промышленный образец линейного индуктора с магнитопроводом.

Экспериментально установлено также, что при увеличении тока линейного индуктора выше определенного порогового значения, возникают механические автоколебания провода, которые препятствуют нормальной работе нагревательной установки. Природа этих колебаний понятна, однако, для создания надежно работающей установки необходимы дополнительные

исследования, направленные на оценку параметров колебаний и условий их возникновения.

Заключение.

Линейный индуктор имеет следующие существенные преимущества перед традиционно применяемым спиральным многовитковым индуктором:

- КПД при нагреве алюминиевой проволоки 55 % по сравнению с 25%, то есть в 2.2 раза выше);
- возможность поддержания минимального зазора при нагреве проволоки разных диаметров;
- возможность смещения индуктора с линии движения проволоки без нарушения ее целостности.

Линейный индуктор может быть рекомендован для внедрения в установках производства проводов СИП.

Список использованных источников

1. Maxwell 2D Field Simulator v6.3 (1995). User's Reference Ansoft Corporation..
2. Вологдин В. В., Злотин В. Е. Способ индукционного нагрева плоских металлических изделий, в частности ленты. Патент РФ RU 2187214 С2. 10.08.2002.