

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ ЗОННОГО НАГРЕВА ДВИЖУЩЕЙСЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЗАГОТОВКИ

Д. И. Морозов

Донбасский государственный технический университет

Аннотация. В пакете Comsol реализована конечно-элементная модель четырехиндукторной нагревательной установки с учетом движения заготовки и нелинейными зависимостями электрофизических свойств материала ферромагнитной заготовки от температуры. На модели исследованы тепловые процессы при питании индукторов неизменными токами, напряжениями или работы с постоянными мощностями. Характер изменения температуры и приведенных параметров схемы замещения индукторов определяется свойствами материала заготовки и тепловым состоянием.

Ключевые слова: зонный индукционный нагрев, конечно-элементная модель, нелинейность, ферромагнитная заготовка, переходный процесс, питание индукторов.

Введение

Установки индукционного нагрева с высокой производительностью реализуются как установки непрерывного нагрева, в которых заготовки движутся непрерывно. Для обеспечения точности нагрева в установках с непрерывной подачей их создают многоиндукторными – заготовки движутся перемещаясь из одного индуктора в другой. Такой нагрев называется зонным. Основными вопросами при создании и использовании установок зонного нагрева являются определение количества индукторов и их конструкции и формирование управления индукторами для обеспечения требований к нагреву. Решить поставленные вопросы на этапе проектирования возможно только прибегая к моделированию электротепловых процессов в установках индукционного нагрева ввиду сложности процессов.

Сложность процессов вызвана тем, что в пространстве происходят электромагнитные и тепловые процессы, причем параметры заготовки как электрофизические так и теплофизические нелинейны и зависят от температуры. Кроме того свойства материала заготовки дополнительно изменяются в пространстве за счет движения заготовки. Для обмотки индуктора, как объекта в пространстве, управляющее воздействие формируется как интегральный показатель свойств и состояния определенной области заготовки.

Зависимости удельных показателей электромагнитных свойств материала заготовки от температуры известны [1] и на их основе получены зависимости от температуры приведенных параметров электрической схемы замещения индуктора. Однако эти зависимости [2] существенно нелинейны и отражают общий характер изме-

нения сопротивления и добротности. Определение же по этим зависимостям конкретного значения затруднительно, тем более при движущейся заготовке, так как температура заготовки в зоне индуктора не одинакова. В связи с этим наиболее целесообразным методом исследования тепловых и электромагнитных процессов в заготовке в рассматриваемой задаче представляется конечно-элементное моделирование.

Цель. Исследование на конечно-элементной модели тепловых процессов и электромагнитных свойств ферромагнитных заготовки в четырехиндукторной установке зонного нагрева.

1. Описание установки зонного нагрева

Построим модель индукционной установки с такими параметрами. Установка четырехиндукторная, индукторы одинаковые, длина каждого индуктора 1,5 м, расстояние между индукторами 0,1 м. Внутренний диаметр индукторов 14 см. Диаметр заготовки 10 см. Производительность установки 5 т/ч. Для стальной заготовки с плотностью материала 7,85 т/м³ для обеспечения указанной производительности скорость движения заготовок составляет 0,022 м/с. Конечная температура нагрева 1000–1200°C. Частота тока индукторов 1000 Гц.

2. Математическая модель электротепловых процессов

Геометрия системы рассматриваемой индукционной установки позволяет рассматривать пространственную задачу как двумерную осесимметричную. Модель включает описание взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов. Таким образом, рассматриваемая задача является мультифизической.

2.1. Електромагнитная задача

Электромагнитные процессы рассматриваются во времени как установившиеся. В пространстве состояние индукционной системы описывается уравнениями в частных производных относительно комплексного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}} = (0, \dot{A}_\varphi, 0)$. Для области заготовки с учетом движения

$$j\omega\sigma(T)\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r(T)^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) - \sigma(T)\mathbf{v} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0. \quad (1)$$

Для области индуктора

$$\nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \mathbf{J}_0. \quad (2)$$

Для области окружающей среды

$$\nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3) $\sigma(T)$, $\mu_r(T)$ – электропроводность и относительная магнитная проницаемость материала заготовки, которые являются функциями температуры; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; ω – угловая частота изменения поля; \mathbf{J}_0 – известная ф-составляющая плотности тока в индукторе; T – температура, определяемая из решения тепловой задачи; j – мнимая единица; \mathbf{v} – вектор скорости движения заготовки, направленный вдоль оси симметрии.

Зависимости $\sigma(T)$, $\mu_r(T)$ задавались таблично и представлены на рис. 1 [1].

Граничные условия электромагнитной задачи задавались как условие симметрии на оси и условие магнитной изоляции на внешних границах.

2.2. Тепловая задача

Задача определения температуры для области движущегося слитка является решением следующего дифференциального уравнения без внешних источников тепла

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p \mathbf{v} \nabla T - \nabla \cdot \lambda T = Q. \quad (4)$$

Для области окружающей среды уравнение аналогичное, только без составляющей, определяемой движением

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \nabla \cdot \lambda T = 0. \quad (5)$$

Здесь ρ , C_p , λ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность соответствующего материала. Данные параметры приняты постоянными и не зависящими от температуры; Q – удельная мощность источника тепла. В рассматриваемой задаче источником тепла являются резистивные потери в заготовке при протекании наведенных токов и гистерезисные потери.

На оси симметрии принято граничное условие Неймана. На внешних границах слитка – условие теплообмена с окружающей средой. На границе, соответствующей торцу заготовки с набегающего конца задавалось условие постоянной температуры.

На оси симметрии принято граничное условие Неймана. На внешних границах слитка – условие теплообмена с окружающей средой. На границе, соответствующей торцу заготовки с набегающего конца задавалось условие постоянной температуры.

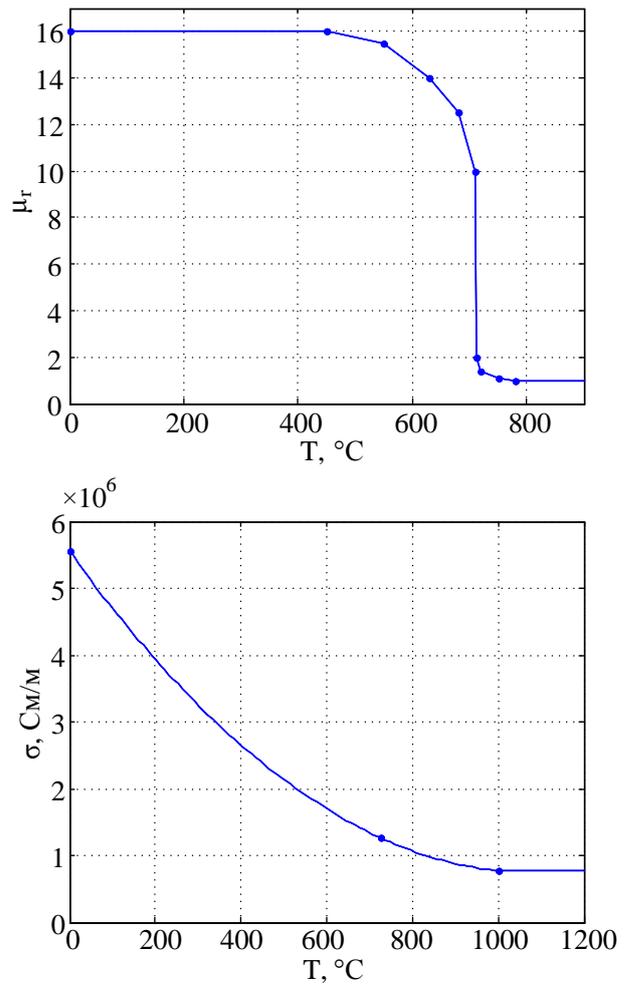


Рис. 1. Зависимости $\sigma(T)$, $\mu_r(T)$ материала заготовки

2.3. Реализация модели

Конечно-элементная модель реализована в пакете Comsol. Пространственно индукторы и заготовка заданы областями сечений в осесимметричной постановке в соответствии с указанной выше геометрией. Для решения поставленной мультифизической задачи использованы два модуля: расчета электромагнитных и тепловых процессов. Электромагнитная задача решалась как квазистатическая, тепловая – как переходный процесс [3, 4].

3. Исследование процессов нагрева

В описанной модели воздействием, которым определяются электромагнитные процессы и преобразование энергии является ток индукторов, задаваемый в уравнении (2) плотностью тока J_0 . При этом ЭДС, наводимая в индукторе, и мощность, передаваемая заготовке, являются интегральными показателями, которые определяются текущими электрическими и магнитными свойствами части заготовки, на которую воздействует поле индуктора. Проследить изменение удельных проводимости и относительной магнитной проницаемости материала заготовки при ее нагреве наиболее удобно при одинаковых токах всех четырех индукторов, хотя такое распределение токов не соответствует реальной программе нагрева. На рис. 2 приведены картины теплового поля, электропроводности и относительной магнитной проницаемости материала движущейся заготовки в момент времени 300 с. Четыре индуктора, расположенные последовательно, показаны друг под другом. Движение заготовки происходит слева направо. Токи индукторов приняты одинаковыми $0,15 \cdot 10^6$ А. Значения токов принимались таким, чтобы конечная температура заготовки в установившемся режиме была примерно 1000°C . Время прохождения сечения заготовки всех зон нагрева при принятой геометрии и производительности составляет 279,66 с.

На рис. 3,а,б приведены зависимости температуры заготовки от времени по длине заготовки – температурные профили. На рис. 3,а – профиль температуры на поверхности заготовки, на рис. 3,б – на оси заготовки. На данных трехмерных графиках показана кривая, соответствующая положению перемещающегося сечения заготовки. Отдельно температуры на поверхности и оси заготовки движущегося сечения как функции времени приведены на рис. 3,в. На рис. 4,а при-

ведены процессы изменения тока, модуля ЭДС, мощности каждого индуктора и тангенса угла нагрузки эквивалентной последовательной схемы замещения.

Управление индукторами в реальности формируется преобразователями частоты, работа которых может быть организована со стабилизацией напряжения или мощности. Для моделирования в Comsol режимов питания индукторов постоянным напряжением или с постоянной мощностью используются организованные программно контуры стабилизации ЭДС или мощностей каждого индуктора в которых задание тока питания индукторов формируется как сигнал ПИ-регулятора. Температурные профили заготовки при стабилизации ЭДС по характеру совпадают с профилями, полученными при питании индукторов неизменными токами (рис. 3) с «полочкой» температуры поверхности в зоне второго индуктора. Для случая стабилизации ЭДС, они приняты одинаковыми – 9 В. Такой вариант питания соответствует подключению индукторов параллельно к одному преобразователю частоты. На рисунке 5 процессы изменения температуры на поверхности и оси движущегося сечения при стабилизации мощностей индукторов. В случае стабилизации мощностей индукторов их уровни также приняты одинаковыми и составляют по 160 кВт. На рис. 4,б,в приведены процессы изменения токов, ЭДС, мощностей индукторов и тангенса угла нагрузки последовательной схемы замещения в режимах питания индукторов с постоянными ЭДС и мощностями. Значения этих показателей для каждого индуктора в установившемся режиме – по прошествии времени прохождения заготовкой всей длины линии нагрева – сведены в табл. 1. Индукторы пронумерованы в направлении движения заготовки.

Таблица 1

Показатели работы индукторов в установившемся режиме при различных режимах питания

Показатель	Режим питания индукторов											
	$I_i = const$				$E_i = const$				$P_i = const$			
	1-й инд.	2-й инд.	3-й инд.	4-й инд.	1-й инд.	2-й инд.	3-й инд.	4-й инд.	1-й инд.	2-й инд.	3-й инд.	4-й инд.
I_i , кА	150	150	150	150	157,49	130,23	147,32	145,26	139,89	112,15	136,16	195,1
E_i , В	8,45	10,0	9,05	9,24	9,0	9,0	9,0	9,0	7,77	7,11	8,92	11,91
P_i , кВт	195,57	254,72	93,95	99,19	227,58	216,88	97,78	94,87	160	160	160	160
$tg\varphi_i$	3,08	2,74	7,15	6,92	2,94	2,12	4,69	6,83	3,24	2,28	3,63	7,19

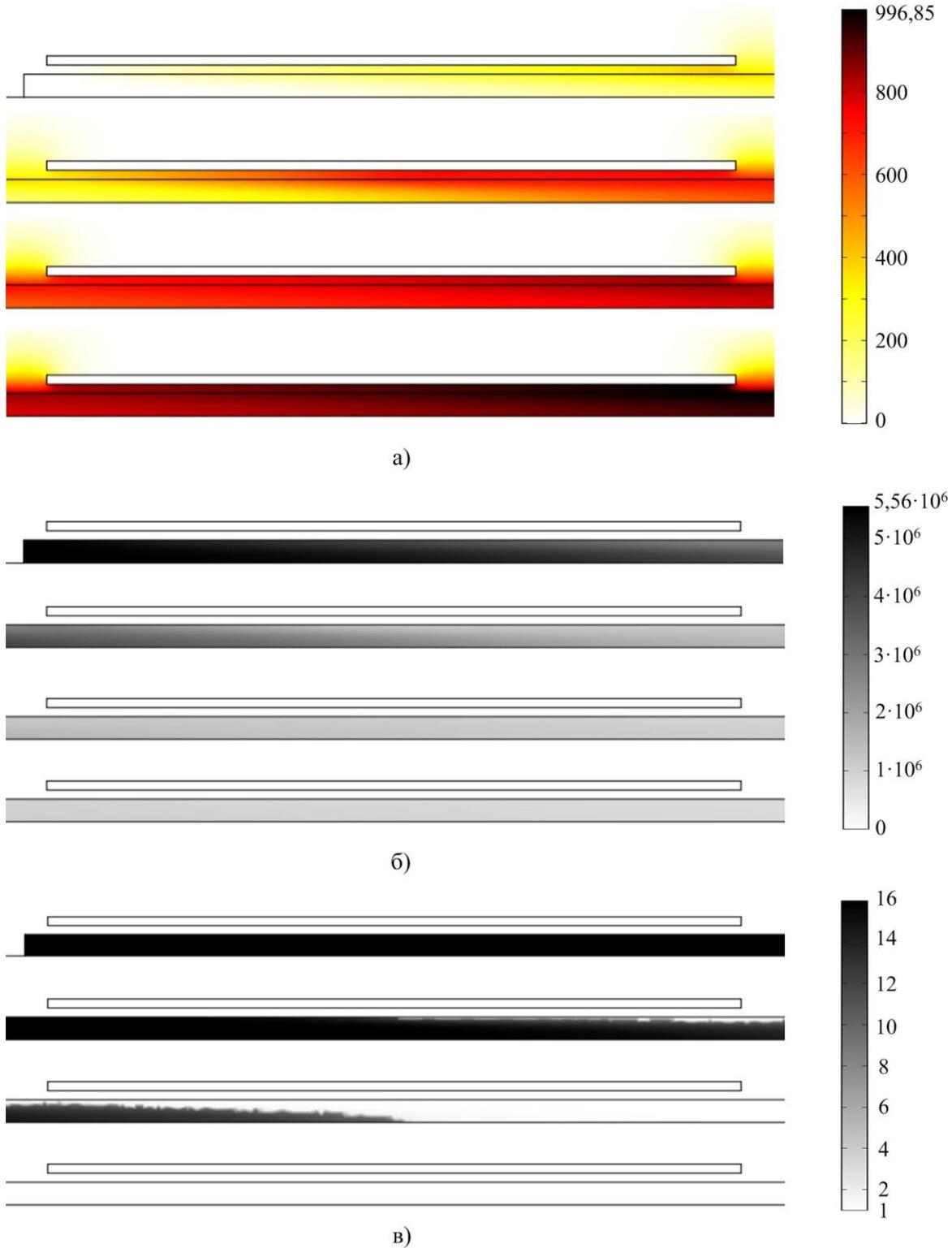


Рис. 2. Результати конечно-елементного моделювання в момент часу 300 с:
 а – картина теплового поля (T , $^{\circ}\text{C}$); б – значення електропровідності матеріала заготовки (σ , Cm/m);
 в – значення відносительної магнітної проникності матеріала заготовки (μ_r)

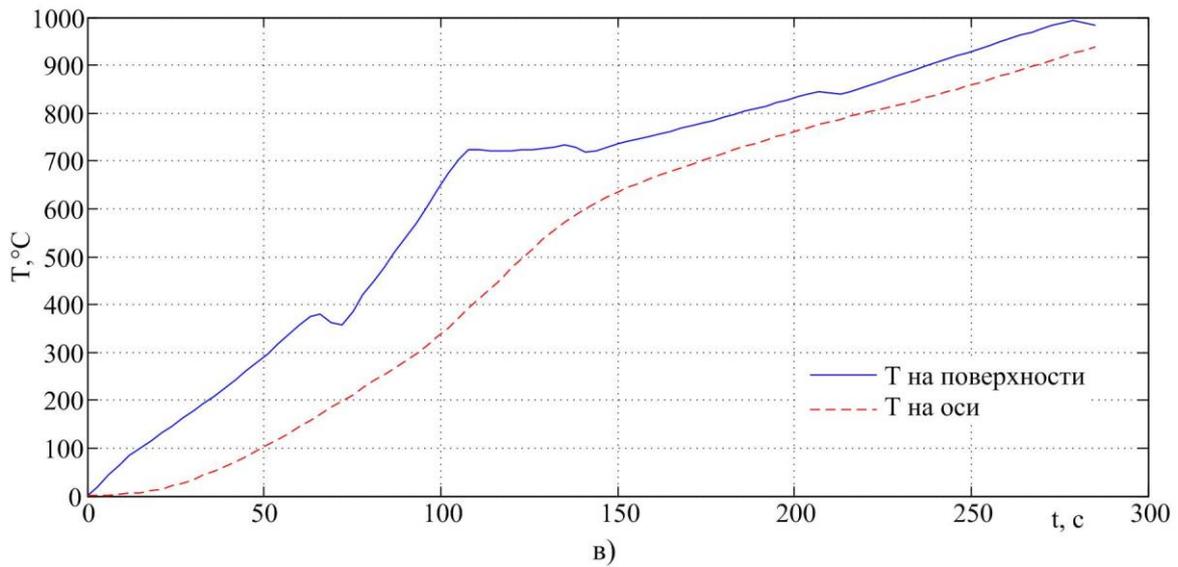
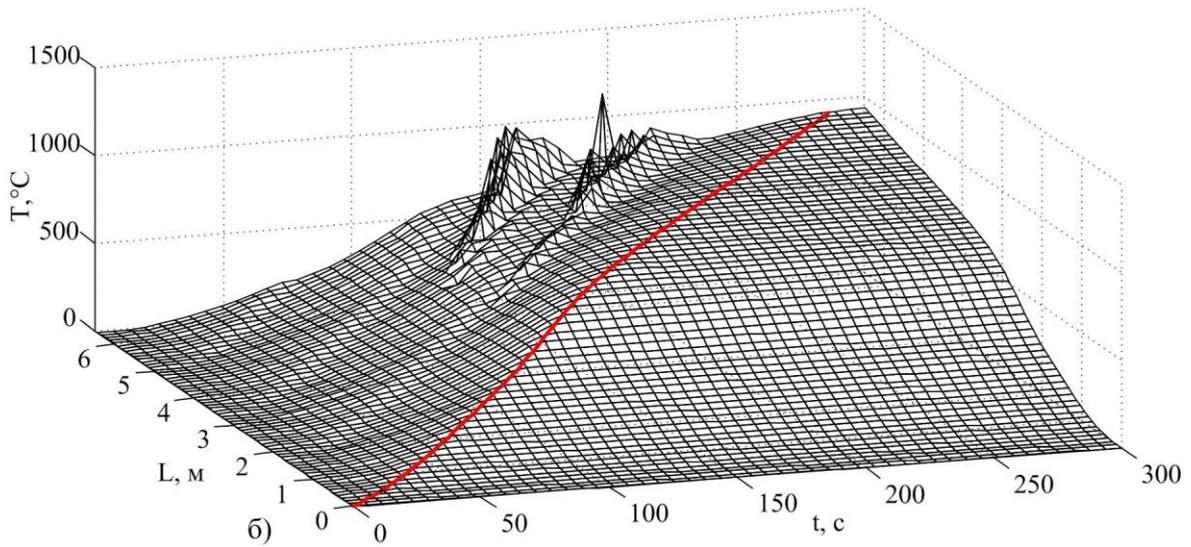
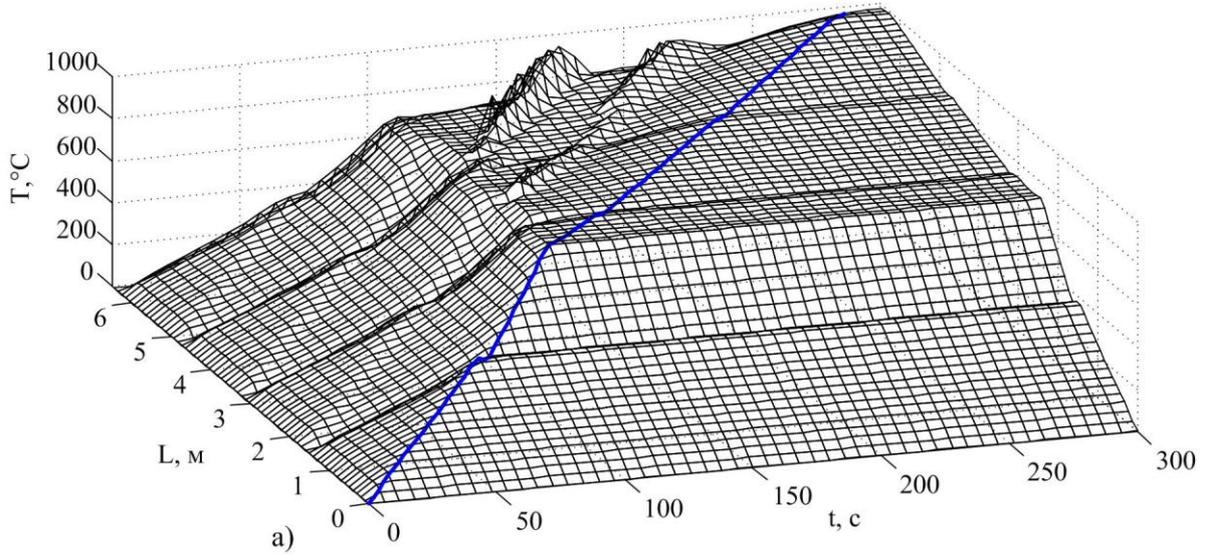
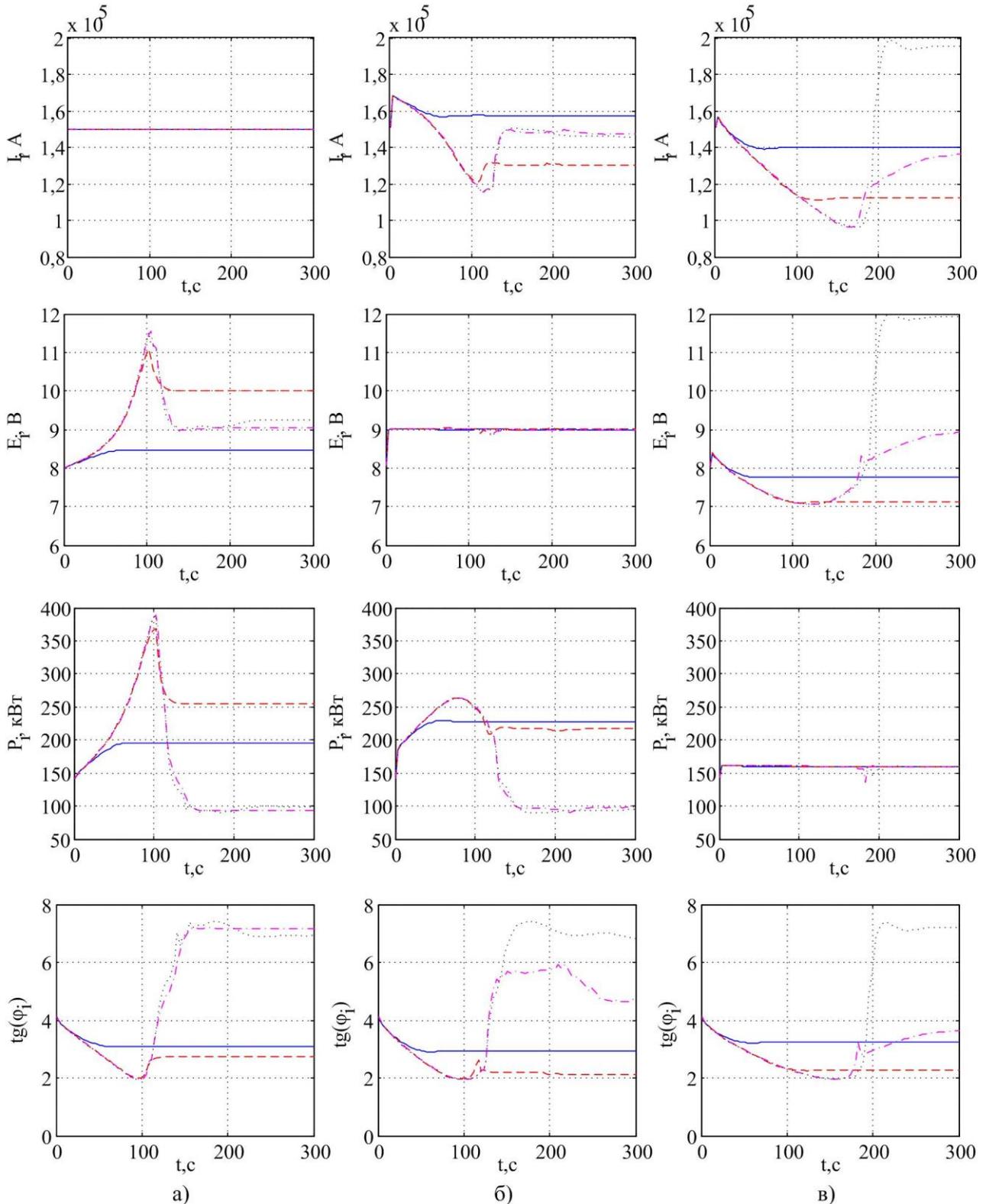


Рис. 3. Процеси нагріву при незмінних токах індукторів:
 а,б – температурні профілі поверхні і середини заготовки;
 в – процеси змінення температури для движущого сечення



(—) – 1-й индуктор; (---) – 2-й индуктор; (- · -) – 3-й индуктор; (····) – 4-й индуктор

Рис. 4. Процессы изменения токов (I_i), ЭДС (E_i), мощностей (P_i) и тангенсов угла нагрузки ($tg\varphi_i$) индукторов при различных режимах их питания:

а – $I_i = const$; б – $E_i = const$; в – $P_i = const$

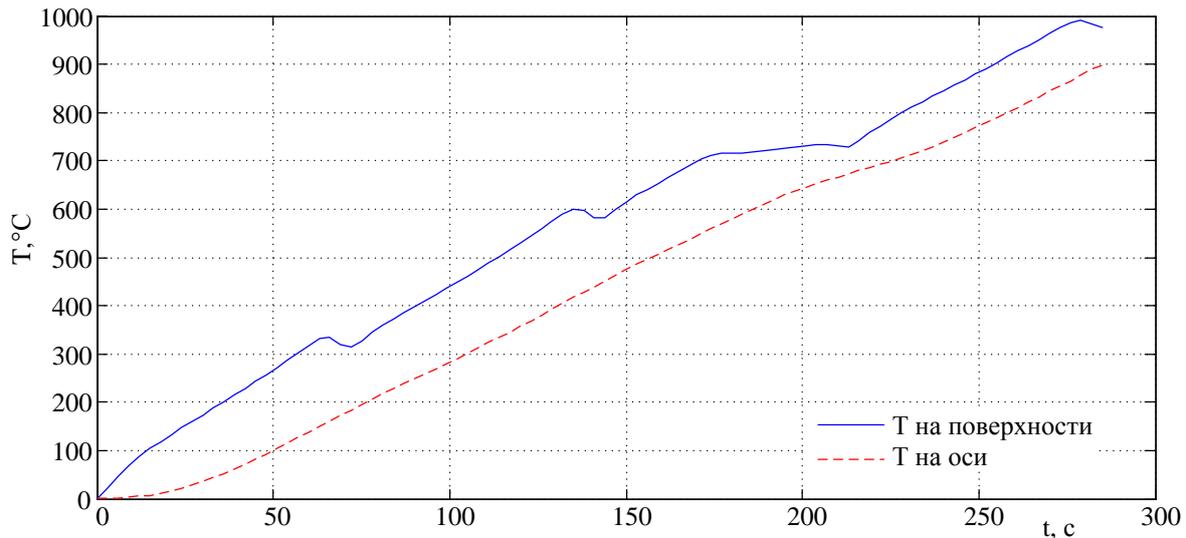


Рис. 5. Процеси нагріву при незмінних потужностях індукторів: процеси змінення температури для движущого сечення

Установившіся значення тангенса угла нагрівки схем замещения індукторів відповідають залежностям добротности от температуры [2]. При питанні індукторів от источника с неизменным напряжением мощности в установившемся режиме уменьшаются у індукторів с более высокой температурой. Переходный процесс изменения температуры поверхности движущего сечення имеет экстремум в зоне індуктора, в которой температура достигает точки Кюри. Причем характерное искажение в процессе имеет место во всех рассмотренных вариантах питания індукторів.

Выводы

Получена конечно-элементная модель четырехіндукторной установки зонного нагріву движущейся заготовки в которой учитываются зависимости электрической проводимости и относительной магнитной проницаемости материала заготовки от температуры. Модель может быть использована для определения и проверки программы зонного нагріву с заданными требованиями.

Список использованной литературы

1. Слухоцкий, А. Е. Установки индукционного нагріву [Текст] / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 326 с.
2. Земан, С. К. Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагриваемый объект» [Текст] / С. К. Земан, А. В. Осипов, М. С. Макаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – № 1(310). – С. 191–196.

мы «индуктор – нагриваемый объект» [Текст] / С. К. Земан, А. В. Осипов, М. С. Макаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – № 1(310). – С. 191–196.

3. Comsol Multiphysics 3.5 a. Structural mechanics module. User's guide. [Electrical resource] – Comsol. – 442 p.

4. Comsol Multiphysics, version 3.5 a [Electrical resource] – www.comsol.com

References

1. Sluyhotsky, A., Nemkov, V., Pavlov, N. and Bamuner, A. (1981). Induction heating plants [Ustanovki induktsionnogo nagreva]. Leningrad, USSR: Energoatomizdat publ., p. 326.

2. Zeman, S., Osipov, A., Makarov, M. (2007). Investigation of the dependencies of the characteristics of the resonance circuit on the design and electrical parameters of the "inductor – heated object" system [Issledovanie zavisimostei kharakteristik rezonansnogo kontura ot konstruktivnykh i elektricheskikh parametrov sistemy «induktor – nagrevaemyi ob"ekt»]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources, 1 (310), pp. 191–196.

3. Comsol Multiphysics 3.5 a. Structural mechanics module. User's guide. – Comsol. – 442 p.

4. Comsol Multiphysics, version 3.5 a. Available at: <http://www.comsol.com>

MODEL OF ELECTROTHERMAL PROCESSES IN AN INDUCTION PLANT FOR ZONE HEATING OF A MOVING FERROMAGNETIC BILLET

D. I. Morozov

Donbass State Technical University

Abstract. *The article considers a model of an induction plant with four inductors for zone heating of a cylindrical billet. The finite element model of the plant is implemented in Comsol. The model takes into account the motion of the billet and the nonlinear dependences of the electrical conductivity and the relative magnetic permeability of the material of the ferromagnetic billet on the temperature. The model uses circuits with PI-regulators which allow simulating the power of inductors with a constant voltage or power. Thermal processes are studied in the model when the inductors are supplied with unchanging currents, voltages or work with constant powers. The temperature profiles of the billet are obtained for different inductor power options and the temperature variation transients for the moving section. Transient for currents, electromotive forces, powers and Q-factors of inductors are obtained for different power supply variants. The transient process of changing the surface temperature of a moving section has an extremum in the inductor region in which the temperature reaches the Curie point. When supply inductors from a source with a constant power voltage in a steady state, they decrease in inductors with a higher temperature. The model can be used to determine and verify the zone heating program with the specified requirements.*

Keywords: *zone induction heating, finite element model, nonlinearity, ferromagnetic billet, transient process, supply of inductors.*

МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ ЗОННОГО НАГРІВУ ФЕРОМАГНІТНОЇ ЗАГОТОВКИ, ЯКА РУХАЄТЬСЯ

Д. І. Морозов

Донбаський державний технічний університет

Анотація. *В пакеті Comsol реалізована кінцево-елементна модель чотириіндукторної нагрівальної установки з урахуванням руху заготовки та нелінійними залежностями електрофізичних властивостей матеріалу ферромагнітної заготовки від температури. На моделі досліджені теплові процеси при живленні індукторів незмінними струмами, напругами або роботи з постійними потужностями. Характер зміни температури і приведені параметри схеми заміщення індукторів визначається властивостями матеріалу заготовки і тепловим станом.*

Ключові слова: *зонний індукційний нагрів, скінченно-елементна модель, нелінійність, ферромагнітна заготовка, перехідний процес, живлення індукторів.*

Получено 24.04.2017



Морозов Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета. Пр. Победы, 84, г. Лисичанск, Луганская обл., Украина, 93100. E-mail: dimorozov2@yandex.ua; тел. (+38)-095-849-11-73

Dmitry Morozov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automated Electromechanical Systems of Donbass State Technical University. Peremogy ave., 84, Lisichansk, Lugansk region, Ukraine, 93100.

ORCID ID: 0000-0003-1773-7140