

УДК 621.365.5

Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве

И.Ю. Долгих, А.Н. Королев, В.М. Захаров
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: kan@toe.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Широкое использование индукционного нагрева в различных отраслях промышленности делает актуальным его оптимизацию по энергетическим и конструктивным параметрам. Используемые методики расчета базируются на ряде эмпирических функций и усредненных параметров, что снижает точность расчетов. В связи с этим актуальной является задача разработки метода декомпозиции изделия, позволяющего оптимизировать динамику температурных процессов по технико-экономическим критериям технологического процесса

Материалы и методы: Поставленная задача формулируется на основе анализа характеристик индукционного нагрева при наличии нелинейных зависимостей параметров от изменяющейся температуры нагреваемого материала. Применяемые методы математического моделирования базируются на уравнениях термодинамики твердых тел. Структурное моделирование проведено с помощью компьютерной программы Matlab в пакете Simulink.

Результаты: Предлагаются метод декомпозиции нагреваемого изделия и математическая модель расчета динамики температурных процессов, позволяющие вводить нелинейные функции, характеризующие металл при нагреве на различных его уровнях. Задача повышения точности расчета параметров индукционного нагрева решена на базе разработанной математической модели температурных процессов при использовании метода послойной декомпозиции изделия, что дает возможность исследовать температурные процессы с учетом вариации для каждого из слоев их нелинейных функций.

Выводы: Предложенный метод декомпозиции изделия, подверженного индукционному нагреву, а также разработанная математическая модель тепловых процессов и ее структурная реализация позволяют повысить точность анализа динамики нагрева и охлаждения исследуемого изделия по глубине, в связи с чем она может быть использована для оптимизации технологического процесса по критериям требуемого качества, а также при разработке системы управления им.

Ключевые слова: динамика температурных процессов, индукционный нагрев, послойная декомпозиция, моделирование.

Simulation of thermal processes dynamics under induction heating

I.Yu. Dolgikh, A.N. Korolev, V.M. Zakharov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: kan@toe.ispu.ru

Abstract

Background: The widespread use of induction heating in a variety of industries makes important its optimization in accordance with energy and design parameters. The used calculation methods are based on some empirical functions and averaged parameters, which worsens the calculation accuracy. Therefore, it is an urgent task to develop an object decomposition method that can optimize the dynamics of thermal processes according to the technical-and-economic criteria of the technological process.

Material and methods: The described problem is formulated based on the analysis of induction heating characteristics by accounting for nonlinear dependences of the parameters on the changing temperature of the material under heating. The applied mathematical modeling methods are based on the equations of thermodynamics of solids. Structural modeling was made by the Matlab computer program in the Simulink package.

Results: It is proposed to combine the method of heated object decomposition and the mathematical model of thermal processes dynamics that enable us to employ non-linear functions of metals at different stages of heating. The problem of increasing the accuracy of induction heating parameter calculation is solved based on the developed model of thermal processes by the method of layer-by-layer object decomposition, which enables thermal processes to be studied in accordance with non-linear function variations of each of these layers.

Conclusions: The proposed method of object decomposition under induction heating and the developed mathematical model of thermal processes and its structural realization can improve the accuracy of heating and cooling depth dynamics analysis of the object under study. Therefore, the method can be used to optimize the technological process in accordance with the required quality criteria and to develop its control systems.

Key words: thermal processes dynamics, induction heating, layer-by-layer decomposition, simulation.

В настоящее время ведущую роль в совершенствовании современного производства играет использование прогрессивных электро-технологических процессов. При этом одним из наиболее перспективных технологических методов обработки металлов является индукционный нагрев, обладающий существенными технологическими и экономическими преимуществами по сравнению с альтернативными способами нагрева [1]. Среди основных достоинств индукционного нагрева необходимо выделить отсутствие непосредственной гальванической связи электрического тока с изделием, что позволяет применять его при плавке, закалке и других технологических операциях, связанных с нагревом металлов в благоприятных для изделия условиях, а также значительную скорость нагрева. Кроме того, индукционный нагрев обеспечивает высокую производительность процессов, более низкое по сравнению с пламенным нагревом образование окалины и угара металла, что уменьшает его потери и повышает качество изделий, а также упрощает автоматизацию технологического процесса. Вместе с тем индукционный нагрев дает возможность достигать заданных температур в достаточно широком диапазоне при снижении энергоемкости и улучшении экологических характеристик производства, а также осуществлять нагрев конкретных частей изделий на желаемую глубину, что необходимо для удовлетворения требуемых качественных показателей готовой продукции [2].

Для наиболее полного использования обозначенных преимуществ необходимо иметь теоретическую базу, позволяющую с необходимой точностью описывать процесс индукционного нагрева, а также синтезировать систему управления, контролирующую и регулирующую его параметры.

В целом процесс индукционного нагрева можно разделить на три основные составляющие:

- 1) передача энергии от индуктора, питаемого переменным током определенной частоты, к нагреваемому изделию посредством электромагнитного поля;
- 2) изменение температуры заданной области изделия с начальной до требуемой по технологии;
- 3) структурные изменения, происходящие в изделии во время нагрева.

Очевидно, что полный учет всех особенностей индукционного нагрева требует точного анализа всех его составляющих, что позволит оптимизировать энергетические параметры нагрева для заданной технологии. При этом важную роль играет возможность совмещения разрабатываемых моделей на различных этапах для учета всех характеристик в комплексе.

При анализе тепловых процессов поверхностного нагрева распространено допуще-

ние о выделении основной тепловой энергии в поверхностном слое, равном глубине проникновения тока, определяемой выражением [3]

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (1)$$

где Δ – глубина проникновения тока, м; ρ – удельное электрическое сопротивление нагреваемого изделия, Ом·м; μ – его магнитная проницаемость; f – частота питающего индуктор тока, Гц.

Это допущение позволяет получать аналитические зависимости для анализа тепловых процессов в нагреваемой поверхности. Однако разработанные на этой основе методики расчета оперируют усредненными значениями параметров, характеризующих систему индуктор-загрузка, и позволяют осуществлять лишь грубую оценку распределения температуры в нагреваемом слое и времени нагрева изделия, а также требуемой для этого мощности. Кроме того, указанные методы расчета не дают возможности исследовать процесс снижения температуры по глубине изделия после отключения источника питания, что оказывается важным для ряда технологических процессов.

Очевидно, что для устранения указанных недостатков применяемых методов расчета и повышения качественных показателей технологии индукционного нагрева рациональна разработка более точных методик оценки внутреннего состояния изделия, что возможно осуществить на основе современных методов компьютерного моделирования. В связи с этим для исследования температурных процессов при индукционном нагреве предлагается проводить декомпозицию нагреваемого изделия на слои по степени их значения как для непосредственно технологии и ее энергетических характеристик, так и для конечного качества готовой продукции. Это позволяет осуществлять более точную оценку процессов нагрева и охлаждения и проводить анализ энергетики взаимодействия всей интересующей структуры изделия. Кроме того, предлагаемый метод анализа индукционного нагрева дает возможность послойно учесть нелинейные зависимости удельного сопротивления металла при изменении его температуры, а также его теплоемкости и теплопроводности (рис. 1), что практически невозможно точно сделать при усредненных методах расчета и с достаточной степенью точности может быть учтено только при компьютерном моделировании. При этом для анализа температурных процессов в динамике рационально использовать методы структурного моделирования, достаточно хорошо разработанные для расчета систем с сосредоточенными параметрами. На основе предложенных принципов была разработана математическая модель послойного анализа тепловых процессов индукционного нагрева плоского ферро-

магнитного изделия. При этом были приняты следующие допущения:

– не учитываются структурные преобразования в стали при превышении температурой точки Кюри;

– отвод тепла в окружающую среду несопоставимо меньше его передачи в соседние слои через теплопроводность;

– удельное сопротивление нагреваемого металла, его теплоемкость и теплопроводность характерны для всего слоя в целом.

Общеизвестно, что при индукционном нагреве действующее значение наводимого в изделии тока не остается постоянным по глубине проникновения. Изменяясь по экспоненциальному закону, он имеет максимальное значение на поверхности и уменьшается при удалении от нее. Предложенная методика тепловых расчетов заключается в декомпозиции нагреваемого изделия на некоторое количество слоев, каждый из которых нагревается своим током. При этом из-за малой толщины можно считать, что по каждому слою протекает постоянный по величине ток (рис. 2).

При индукционном нагреве плоского однослойного изделия нагрев осуществляется током I , протекающим по всему сечению изделия. При этом количество выделенной тепловой энергии dQ_H за время dt определяется в соответствии с выражением

$$dQ_H = R_m I^2 dt, \quad (2)$$

где R_m – сопротивление изделия, по которому протекает электрический ток.

При этом сопротивление изделия определяется формулой

$$R_m = \rho_m \frac{l_c}{S_c}, \quad (3)$$

где ρ_m – удельное сопротивление материала изделия, зависящее от его температуры; l_c – длина нагреваемого изделия; S_c – поперечное сечение изделия.

Приближенная зависимость удельного сопротивления от температуры T имеет вид

$$\rho_m = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (4)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала при начальной температуре нагрева T_0 ; α – температурный коэффициент сопротивления материала; T – температура нагреваемого изделия.

В некоторых случаях практических расчетов рационально использовать зависимость удельного электрического сопротивления, полученную экспериментальным путем [4] и приводимую в справочниках для конкретной марки стали.

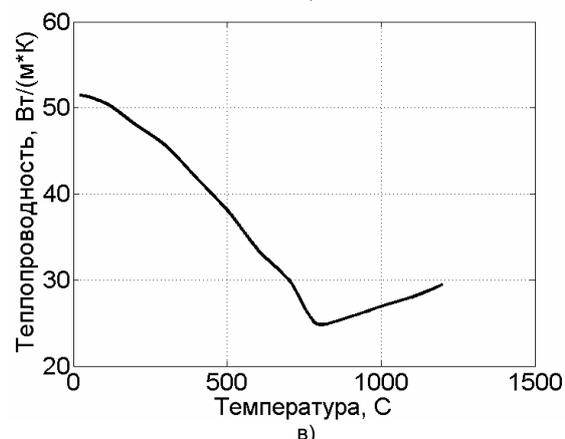
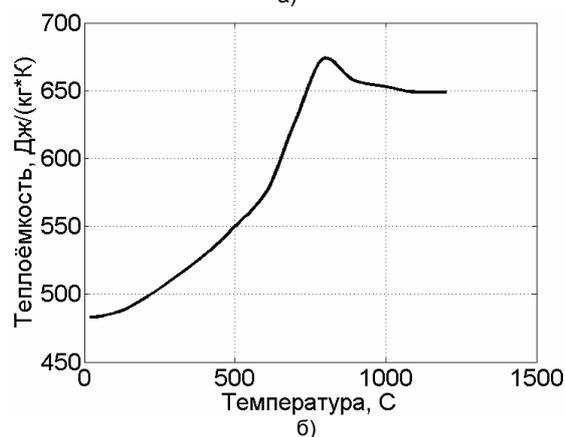
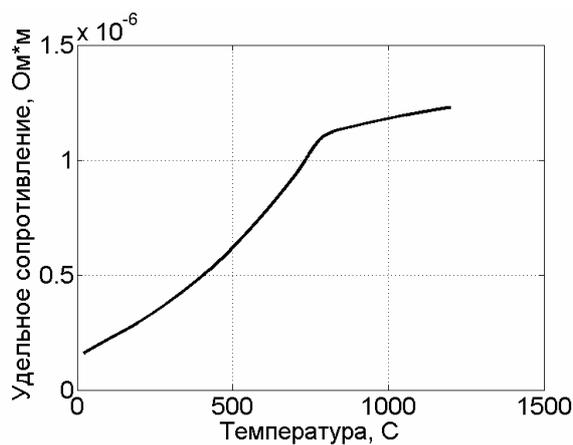


Рис. 1. Нелинейные зависимости параметров материала изделия от температуры: а – удельное электрическое сопротивление; б – теплоемкость; в – теплопроводность

Количество тепла, передаваемое нагретым изделием в окружающую среду dQ_n , определяется формулой

$$dQ_n = k_c S_n (T - T_c) dt, \quad (5)$$

где $k_c = f(T)$ – коэффициент теплопередачи, нелинейно зависящий от температуры; S_n – площадь соприкосновения изделия с окружающей средой; T_c – температура окружающей среды.

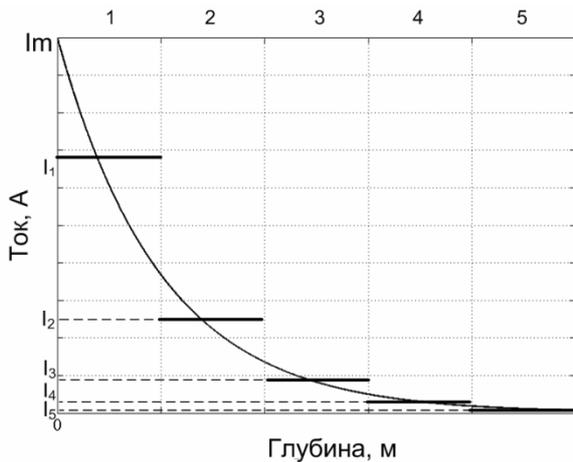


Рис. 2. Декомпозиция нагреваемого изделия по слоям

Тепловая энергия $dQ_e = dQ_H - dQ_n$, оставшаяся в изделии, повышает его температуру:

$$dQ_r = mCdT, \quad (6)$$

где m – масса изделия; $C = f(T)$ – теплоемкость материала изделия, нелинейно зависящая от температуры.

Преобразованные по Лапласу и совмещенные уравнения (2), (5) и (6) имеют в операторной форме вид

$$T = (R_m I^2 - k_c S_n (T - T_c)) \frac{1}{mCp}. \quad (7)$$

Структурная схема математической модели индукционного нагрева плоского однослойного изделия представлена на рис. 3.

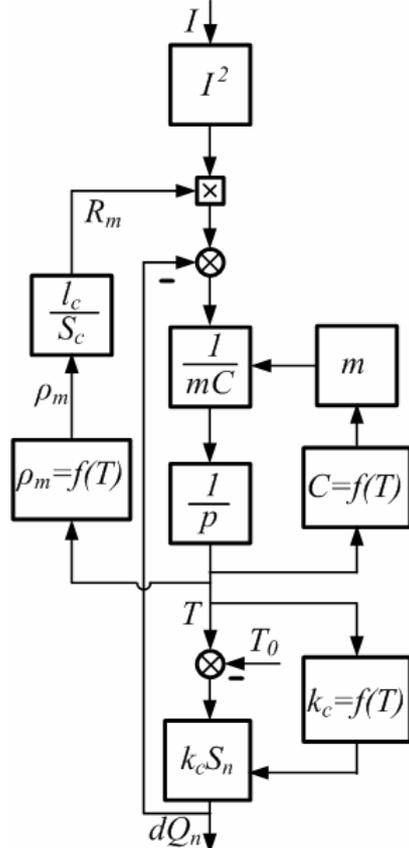


Рис. 3. Структурная схема модели индукционного нагрева плоского однослойного изделия

Особенностью нагрева двухслойного изделия является то, что каждый из слоев нагревается своим, отличным от другого током, а также теплом, передаваемым из соседнего слоя. При этом из-за небольшой толщины слоев (часто доли миллиметра) коэффициент теплопередачи от одного слоя к другому может быть принят равным теплопроводности слоя, получающего тепловую энергию от соседнего слоя. Математическая модель нагрева двухслойного изделия может быть представлена следующей системой уравнений:

$$dQ_{H2} = R_{m2} I_2^2 dt, \quad (8)$$

$$R_{m2} = \rho_{m2} \frac{l_{c2}}{S_{c2}}, \quad (9)$$

$$\rho_{m2} = \rho_{02} (1 + k_{m2} T_2), \quad (10)$$

$$dQ_{n21} = k_{21} S_{21} (T_1 - T_2) dt, \quad (11)$$

$$dQ_{n2} = k_{c2} S_{n2} (T_2 - T_c) dt, \quad (12)$$

$$dQ_{c2} = m_2 C_2 dT, \quad (13)$$

$$T = (R_{m2} I_2^2 + k_{21} S_{n21} (T_1 - T_2) - k_{c2} S_{n2} (T_2 - T_c)) \frac{1}{m_2 C_2 p}. \quad (14)$$

Структурная схема математической модели для двух слоев представлена на рис. 4.

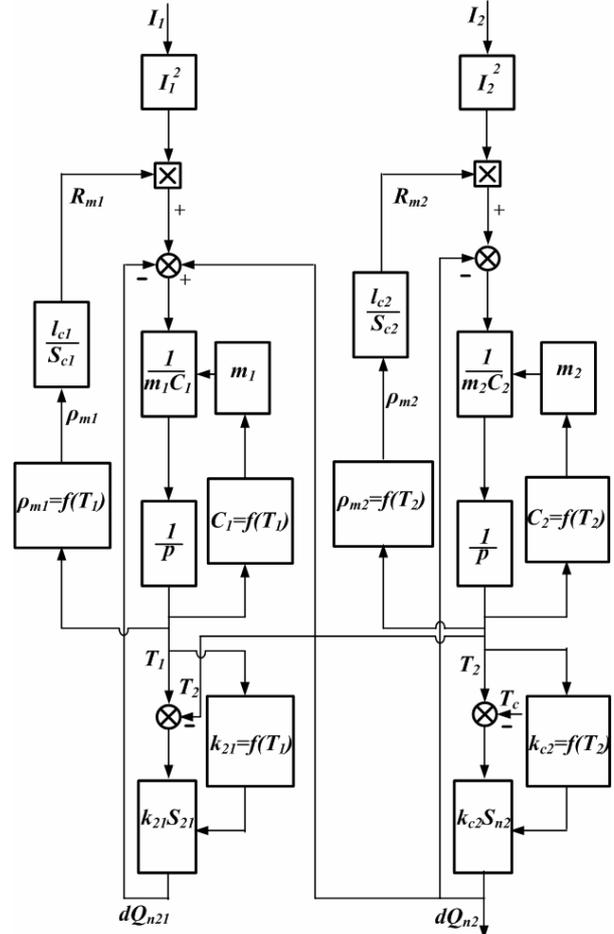


Рис. 4. Структурная схема математической модели для двух слоев

В целом математическая модель тепловых процессов для k -го слоя нагреваемого изделия может быть представлена следующей системой уравнений:

$$dQ_{нк} = R_{mk} I_k^2 dt, \quad (15)$$

$$R_{mk} = \rho_{mk} \frac{l_{ck}}{S_{ck}}, \quad (16)$$

$$\rho_{mk} = \rho_{0k}(1 + k_{mk} T_k), \quad (17)$$

$$dQ_{пк(k-1)k} = k_{k(k-1)k} S_{пк(k-1)k} (T_{(k-1)} - T_k) dt, \quad (18)$$

$$dQ_{п(k+1)k} = k_{(k+1)k} S_{п(k+1)k} (T_k - T_{(k+1)}) dt \quad (19)$$

$$dQ_{пck} = c_{ck} S_{пck} (T_k - T_c) dt, \quad (20)$$

$$dQ_{ek} = m_k C_k dT_k, \quad (21)$$

$$T = (R_{mk} I_k^2 + k_{k(k-1)k} S_{пк(k-1)k} (T_{(k-1)} - T_k) - k_{(k+1)k} S_{п(k+1)k} (T_k - T_{(k+1)})) \frac{1}{m_k C_k \rho}. \quad (22)$$

Структурная схема математической модели k -го слоя многослойного изделия представлена на рис. 5.

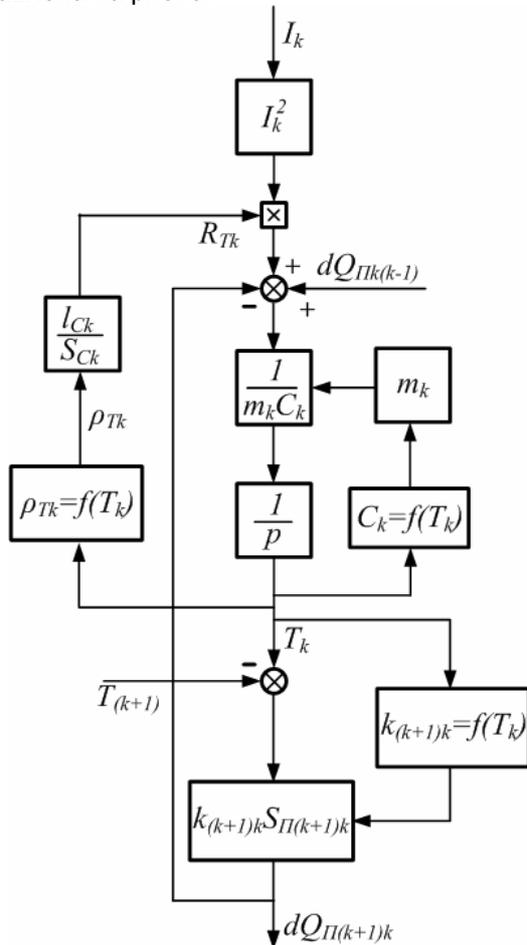


Рис. 5. Структурная схема модели тепловых процессов k -го слоя нагреваемого изделия

Указанная модель была реализована средствами компьютерной программы Matlab в пакете Simulink на примере изделия, эскиз которого показан на рис. 6. Исходная деталь была разделена на пять слоев. Толщина каждого

слоя соответствует глубине проникновения тока в сталь, рассчитанной при магнитной проницаемости $\mu = 10$ и частоте $f = 2500$ Гц в соответствии с выражением (1). Материал изделия – сталь 40. Принято, что потери с поверхности первого слоя из-за наличия идеальной теплоизоляции отсутствуют. Токи в слоях были рассчитаны для данных условий с использованием программы Comsol Multiphysics с допущением, что они не меняются в процессе нагрева. Температурные зависимости удельного сопротивления, теплоемкости и теплопроводности для стали данной марки взяты из справочной литературы [5, 6].

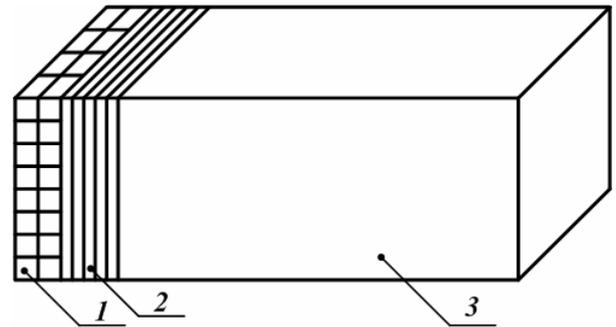


Рис. 6. Эскиз нагреваемого изделия: 1 – теплоизоляция; 2 – нагреваемые слои; 3 – изделие

На рис. 7 представлены результаты динамики послыоного нагрева изделия (рис. 6) неизменными во времени токами.

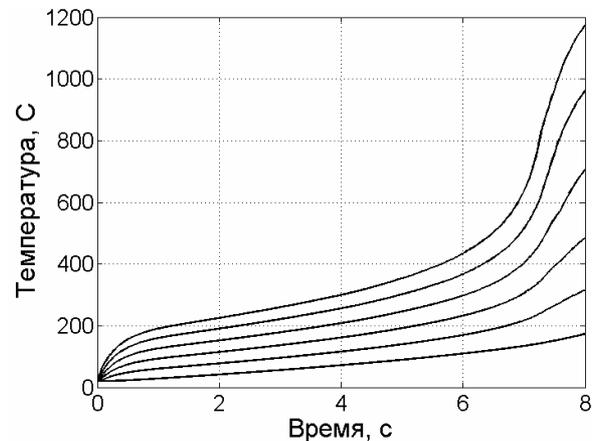


Рис. 7. Динамика температурных процессов слоев при индукционном нагреве неизменными токами

Проведенные с помощью модели исследования показали, что индукционный нагрев слоев существенно отличается по величине и темпу. Естественно, что эти характеристики зависят от величины и частоты тока в нагреваемом изделии. Анализ полученных результатов также показал, что основная тепловая энергия, получаемая от протекающего тока, выделяется в пределах первых двух слоев, толщина каждого из которых равна принятой в упрощенных методах расчета глубине проникновения тока. При этом последующие слои нагреваются до различного уровня в основном

за счет теплопередачи от вышерасположенных слоев. Проведенная на модели вариация подачи тока в слои показала, что отключение источников питания слоев в модели, находящихся на глубине, превышающей три глубины проникновения тока, не вносит в расчет существенной погрешности, остающейся в пределах 1,5 % (рис. 8). В то же время учет только в двух поверхностных слоях, соответствующих двум глубинам проникновения, приводит к отклонению в динамике нагрева поверхностного слоя изделия в пределах 10 % (рис. 9), что в некоторых практических случаях является допустимой точностью расчета. Моделирование показало также, что вариант протекания тока только по поверхностному слою приводит к недопустимо большой погрешности.

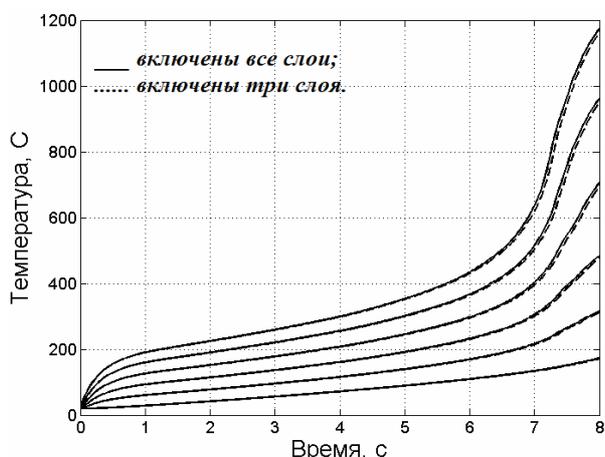


Рис. 8. Сравнение динамики температурных процессов при отключении тока в глубинных слоях

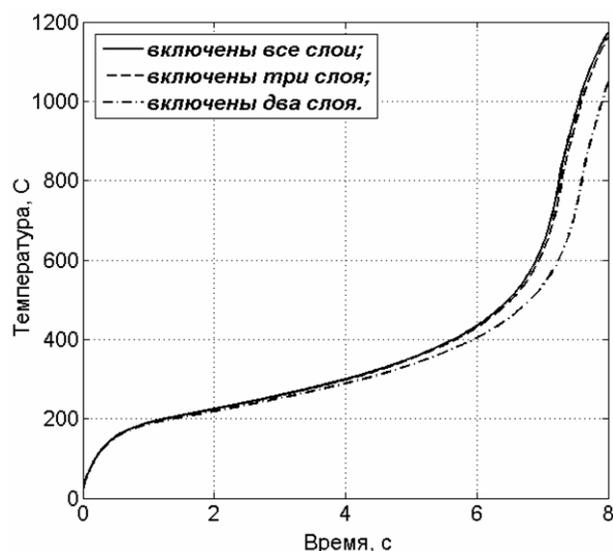


Рис. 9. Сравнение динамики температурных процессов поверхностного слоя при отсутствии тока глубинных слоев

Для ряда технологических процессов значительный интерес представляет не только процесс нагрева в динамике, но и процесс последующего снижения температуры после отключения источника питания. В этом случае представ-

ленная модель дополняется системой управления, осуществляющей отключение источника тока при достижении поверхностным слоем заданной температуры. При этом изделие охлаждается за счет теплопроводности в соседние слои и теплопередачи в окружающую среду.

Разработанная модель тепловых процессов позволяет с необходимой точностью проанализировать динамику нагрева и охлаждения исследуемого изделия по глубине, в связи с чем она может быть использована для оптимизации технологического процесса по критериям требуемого качества, а также при разработке системы управления им.

Список литературы

1. **Зимин Л.С., Байкин А.В.** Применение индукционного нагрева в промышленных технологиях // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). Т. 1. – Иваново, 2013. – С. 3–7.
2. **Современные энергосберегающие электротехнологии:** учеб. пособие для вузов / Ю.И. Блинов, А.С. Васильев, А.Н. Никаноров и др. – СПб.: Изд-во СПбГТЭУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.
3. **Установки индукционного нагрева:** учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
4. **В.В. Волков, И.Ю. Долгих.** Исследование ферромагнитных материалов при нагреве // Материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». Т. 3. Ч. 2. – Иваново, 2013. – С. 83–87.
5. **Романов Д.И.** Электроконтактный нагрев металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.
6. **Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л.** Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

References

1. Zimin, L.S., Baykin, A.V. Primenenie induktsionnogo nagreva v promyshlennykh tekhnologiyakh [Application of induction heating to industrial technologies], in *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XVII Benardosovskie chteniya)*. Ivanovo, 2013, vol. 1, pp. 3–7.
2. Blinov, Yu.I., Vasil'ev, A.S., Nikanorov, A.N. *Sovremennye energosberegayushchie elektrotekhnologii* [Modern energy-saving electrical technologies], Saint-Petersburg, Izdatel'stvo SPbGTEU «LETI», 2000. 564 p.
3. Slukhotskiy, A.E., Nemkov, V.S., Pavlov, N.A., Bamoner, A.V. *Ustanovki induktsionnogo nagreva* [Induction heating installations]. Leningrad, Energoizdat, 1981. 328 p.
4. Volkov, V.V., Dolgikh, I.Yu. Issledovanie ferromagnitnykh materialov pri nagreve [Study of ferromagnetic materials under heating], in *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energija-2013»*. Ivanovo, 2013, vol. 3, part 2, pp. 83–87.
5. Romanov, D.I. *Elektrokontaktnyy nagrev metallov* [Electrical contact heating of metals], Moscow: Mashinostroenie, 1981. 168 p.
6. Livshits, B.G., Kraposhin, V.S., Linetskiy, Ya.L. *Fizicheskie svoystva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys], Moscow, Metallurgiya, 1980. 320 p.

Долгих Иван Юрьевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,
e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Королев Анатолий Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,
телефон (4932) 26-19-21,
e-mail: kan@toe.ispu.ru

Захаров Вадим Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики,
e-mail: kan@toe.ispu.ru.