

Краткие сообщения

УДК 621.365.5

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ¹

А.С. Егиазарян, Л.С. Зимин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются особенности индукционного нагрева тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся прямоугольные заготовки большого поперечного сечения, например слябы при нагреве под прокатку. В этом случае необходимо учитывать объемную плотность электромагнитного поля, которая проявляется в виде электродинамического взаимодействия индуктора прямоугольного сечения и сляба. В результате возникают сильные вибрации и шум, превышающий санитарные нормы. Проведенные исследования позволяют сделать рекомендации по учету электродинамических и виброакустических процессов при проектировании индукторов прямоугольной формы. Электродинамические расчеты проводились на численной математической модели, построенной с использованием метода связанных контуров и принципа возможных перемещений.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электродинамические силы, вибрации, акустическое излучение.

Индукционный нагрев тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слябы, характеризуется рядом проблем, которые в случае цилиндрических заготовок или вообще не возникают, или довольно легко разрешаются. Это прежде всего двумерный характер электромагнитного и температурного полей в поперечном сечении, когда температурный перепад между поверхностью и центром уже нельзя рассматривать в зависимости только от одной координаты [1].

Вторая проблема определяется тем, что электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, но также объемной плотностью электромагнитного поля и связанными с ней электродинамическими усилиями [2]. Если в плавильных печах электродинамические силы могут улучшить перемешивание жидкого металла, то при индукционном нагреве под деформацию механическое проявление электромагнитной энергии играет резко отрицательную роль, так как возникает проблема устойчивости конструкций индукторов против вибраций под действием электродинамических сил. Особенно остро эта проблема проявляется

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).

Александра Сергеевна Егиазарян (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

при индукционном нагреве прямоугольных заготовок. Это явление может быть использовано на производстве для получения искусственных вибраций для различных целей, например для трамбовки формовочных смесей [3].

В индукторах для нагрева цилиндрических заготовок отсутствуют условия для возникновения значительных вибраций (круглое поперечное сечение обладает большой естественной жесткостью), а в индукторах прямоугольной формы необходимо принимать во внимание малую устойчивость прямолинейных участков обмотки индуктора. Причем суть проблемы представляет не механическая прочность медной трубки индуктора, поскольку возникающие напряжения изгиба гораздо меньше допустимых для меди, а сильная вибрация и сопровождающий ее шум, которые, если не принимать специальных мер, значительно превышают санитарные нормы для производственных помещений.

Электродинамическое взаимодействие в индукционной системе «индуктор – металл» определяется из уравнений Максвелла и вектора Пойтинга, хотя электромагнитные силы можно определить также из энергетических соображений, не обращаясь к представлениям поля, а ограничиваясь выражением энергии через интегральные параметры и применяя закон сохранения энергии к рассматриваемой системе. Оба этих способа ведут к совершенно одинаковым конечным формулам, но при использовании теории поля получается лучшая взаимосвязь с электромагнитными и тепловыми процессами в системе «индуктор – металл».

Тогда центробежное давление, равномерно распределенное по всей внутренней поверхности индуктора, с учетом амплитуды напряженности магнитного поля (H_0) будет равно

$$G_{(r)} = 0,25\mu_0 H_0^2 (1 + \cos 2\omega t). \quad (1)$$

Можно показать, что это давление обратно пропорционально так называемому коэффициенту поглощения мощности $\sqrt{\rho\mu f}$ (где ρ , μ – соответственно удельное электросопротивление и магнитная проницаемость нагреваемого металла). Таким образом, при одинаковой удельной мощности наибольшее давление будет испытывать обмотка индуктора, предназначенного для нагрева немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением, к которым относятся алюминиевые слябы, на промышленной частоте тока как самой низкой из применяемых в настоящее время для индукционного нагрева.

Электродинамические расчеты целесообразно проводить на численной математической модели, построенной с использованием метода связанных контуров и принципа возможных перемещений [4]. При этом электродинамическое взаимодействие в системе «индуктор – металл» сводится к взаимодействию совокупности индуктивно связанных контуров, по одним из которых протекают токи индуктора, а по другим – вихревые токи. Электродинамические силы в такой расчетной системе можно определить через энергию электромагнитного поля W_M контуров P и R:

$$\vec{F} = \text{grad} W_M; \quad W_M = I_P I_R M_{P,R} / 2. \quad (2)$$

Формула (2) подразумевает двойное суммирование – по P и по R, причем если $P \neq R$, то $M_{P,R}$ – взаимоиндуктивность контуров, а в противном случае $M_{P,R}$, $M_{P,R}$ – их собственные индуктивности.

Расчет акустического излучения любого объемного тела следует рассматривать как связанную упругоакустическую задачу. Однако ее решение в строгой математической постановке возможно только для ограниченного круга идеали-

зированных колебательных систем. Поэтому с допустимой степенью упрощения поставленная задача разбивается на две: вначале рассчитываются колебания системы под действием известной электродинамической нагрузки без учета влияния среды, а затем определяется акустическое излучение при заданных колебаниях.

Для численного решения вибрационной задачи целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ) [5, 6]. С учетом формы границ индуктора применены прямоугольные КЭ. Переход от системы с бесконечным числом параметров напряженно-деформированного состояния к системе с конечным числом степеней свободы осуществляется в результате ансамблирования КЭ, при этом математическая модель задачи представляется системой дифференциальных уравнений

$$[M][\ddot{W}]_r + [C][\dot{W}]_r + ([K] + [F])_r [W]_r = [G], \quad (3)$$

где $[K]$, $[M]$, $[C]$ – матрицы жесткости, массы и демпфирования ансамбля КЭ;

$[G]_r$, $[F]_r$ – векторы центробежной и осевой нагрузок;

$[W]_r$ – вектор узловых перемещений.

Для интегрирования системы (3) был выбран Θ -метод Вилсона. В итоге на каждом временном шаге с помощью процедуры LDL^T -факторизации решается система линейных алгебраических уравнений относительно КЭ параметров вибраций в узлах расчетной сетки КЭ.

Преодоление звукового излучения мощных ИНУ являются довольно сложной задачей, которая характеризуется как особенностями самой ИНУ, так и помещением, где она расположена. В самом общем случае для определения распределенных усилий по всему индуктору был использован закон Био – Савара – Лапласа, который позволяет найти вектор магнитной индукции в электрических системах любой сложности и тем самым определить настил тока в слябе. Затем, разбив заготовку на конечное число прямоугольных контуров, определяют значения токов в этих контурах. Определив ток в обмотке индуктора с учетом взаимоиндуктивности, рассчитанной по известной формуле двух коаксиальных прямоугольников по методу ряда Тейлора, находят электродинамические усилия как на обмотку индуктора, так и на поверхность заготовки.

При исследовании вибродинамической модели индуктора была синтезирована форма оптимальной оболочки индуктора, состоящей из стеклопластика и бетонных блоков, по критерию минимального шумоизлучения (максимальной жесткости) [7, 8].

Такой индуктор мощностью 1500 кВт, выполненный медной трубкой 26×32 мм со смещенным отверстием диаметром 18 мм (для охлаждения), при нагреве алюминиевого сляба размерами $0,3 \times 1,24 \times 2,4$ м на промышленной частоте создает шум не более 65 дБ, а без бетонных блоков шум достигал 125 дБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егизарян А.С., Зимин Л.С. Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 231-233.
2. Зимин Л.С. Вибростойкость прямоугольных систем индукционного нагрева. Теория и практика индукционного нагрева. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 64-70.
3. Зимин Л.С., Тихонов И.Н., Лукин К.А. Виброплощадка. А.с. 347100 СССР/№1630865, заяв. 22.03.71, опуб. 10.08.72. Б.И. № 24.

4. *Зимин Л.С., Сулягин А.Ф.* Расчет вибрационных и акустических характеристик индукторов прямоугольной формы // Известия вузов. Электромеханика. – 1986. – № 10. – С. 103-109.
5. *Зимин Л.С., Каримов Д.А.* Моделирование электродинамических усилий в системах индукционного нагрева немагнитных тел прямоугольной формы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – № 20. – С. 121-126.
6. *Зимин Л.С., Каримов Д.А.* Оптимизация индукционных систем по электродинамическим параметрам // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2002. – № 14. – С. 185-190.
7. *Зимин Л.С., Гецелев З.Н., Астанин С.Д., Рапопорт Э.Я., Сабуров В.В.* Индукционная печь. А.с. 154555 СССР № 773323, заяв. 10.04.62, опубл. 14.03.63. Б.И. № 10.
8. *Зимин Л.С., Сулягин А.Ф., Хасаева Л.И., Яцков С.А.* Устройство для индукционного нагрева слябов. А.с. 1669085 СССР № 4425222, опубл. 07.08.91. Б.И. № 29.

Статья поступила в редакцию 28 января 2016 г.

ELECTRODYNAMIC PROCESSES IN INDUCTION HEATING

A.S. Yeghiazaryan, L.S. Zimin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper discusses the features of induction heating of bodies with sharply changing curvature of the surface, one should take into account the volume density of the electromagnetic field which manifests itself in the form of an electrodynamic interaction between the inductor and the slab. It results in strong vibration and noise exceeding health standards. These investigations enable making recommendations which take into account electrodynamic and vibroacoustic processes when designing rectangular inductors. The electrodynamic calculations were done using a numerical mathematical model constructed by means of the method of coupled circuits and the principle of possible displacements.

Keywords: *electromagnetic field, electromagnetic force, vibration, acoustic radiation.*

УДК 681.5:621.315

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА КАБЕЛЯ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Е.О. Солякова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются математические модели основных параметров качества кабеля как канала связи, формирующиеся на отдельных технологических операциях. Представлена зависимость этих параметров от определенных режимных показателей производственной линии, таких как скорость вращения шнека (на операции изолирования), температура расплава полимера, давление в зоне дозирования экструдера и др.

Ключевые слова: системный подход, автоматизация, производство кабелей, параметры качества.

Производство кабеля связи является сложным многооперационным процессом, неосуществимым без автоматического управления. Задачу управления таким технологическим процессом возможно решить лишь основываясь на главных принципах системного подхода.

Главные показатели качества кабеля как канала связи можно проконтролировать только на готовом продукте. Поэтому для достижения требуемых качественных параметров необходимо обеспечить стабилизацию режимных показателей работы каждой операции производственной линии.

На первых этапах, этапах волочения и отжига, формируются некоторые параметры будущего кабеля, например диаметр медной жилы. При этом степень вытяжки

$$\mu = \frac{l}{l_n} = \left(\frac{d}{d_k} \right)^2, \quad (1)$$

где l_n – длина провода до волочения; l_k – длина провода после волочения; d_k – диаметр медной жилы после волочения; d_n – диаметр до волочения [1].

Основные показатели качества определяются на следующей операции – изолирования. Главными режимными параметрами на этом этапе являются скорость изолирования, температура расплава полимера, обороты шнека экструдера.

Например, в [1] представлено выражение диаметра пенопластовой изоляции

$$D_i = \sqrt{\frac{K_1 N}{V(1-\delta)} + \frac{K_2}{1-\delta}} + d, \quad (2)$$

где D_i – диаметр пенопластовой изоляции; N – обороты шнека экструдера; V – скорость изолирования; δ – степень пористости; d – диаметр внутреннего проводника; K_1, K_2 – коэффициенты, определяемые конструктив-

ными размерами матрицы, червяка в выходной зоне прессы и диаметром внутреннего проводника.

Основным показателем качества коаксиального кабеля является однородность волнового сопротивления [1]:

$$Z = 60 \sqrt{\ln \frac{D}{D_{is}} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\varepsilon_{is}} \cdot \ln \frac{D_{is}}{d} \cdot \ln \frac{D}{d}}, \quad (3)$$

где d – диаметр внутреннего проводника; D – внутренний диаметр внешнего проводника; D_{is} – диаметр изоляции; ε_{is} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Изолирование кабельной жилы осуществляется на экструзионной линии. После установления требуемой температуры поступающий в экструдер полиэтилен плавится и дозируется на медный проводник. Уравнение теплового баланса приведено в [2]:

$$\begin{aligned} \rho C (V_x \frac{\partial T}{\partial x_1} + V_y \frac{\partial T}{\partial y_1} + \bar{V}_z \frac{\partial T}{\partial z_1}) = -(\frac{\partial q_x}{\partial x_1} + \frac{\partial q_y}{\partial y_1}) + (\sigma_{xx} \frac{\partial V_x}{\partial x_1} + \sigma_{yy} \frac{\partial V_y}{\partial y_1}) \\ + \sigma_{xy} (\frac{\partial V_x}{\partial y_1} + \frac{\partial V_y}{\partial x_1}) + \sigma_{xz} \frac{\partial V_z}{\partial x_1} + \sigma_{yz} \frac{\partial V_z}{\partial y_1} \end{aligned} \quad (4)$$

где ρ – плотность пластмассы; V_x, V_y, V_z – составляющие скорости движения пластмассы по осям x, y, z ; P – давление; T – температура; \bar{V}_z – средняя скорость (для твердой фазы – скорость пробки, для расплава полимера – средняя скорость в расплаве полимера); C – удельная теплоемкость расплава, выраженная в единицах механической работы; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений (напряжение сдвига, возникающее в результате действия вязких сил, – симметричный тензор второго ранга).

Изменение оборотов шнека экструдера приводит к изменению температуры и вязкости. Эффективная вязкость расплава полимера η_a определяется уравнением [3]

$$\eta_a = \mu_0 e^{-b(T-T_0)} \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2n}}. \quad (5)$$

Массовая производительность зоны дозирования экструдера Q_d может быть рассчитана по формуле

$$Q_d = \rho_p \bar{V}_z h \varpi \quad (6)$$

где ρ_p – плотность расплавленной пластмассы; ϖ – ширина канала экструдера.

Скорость движения расплава полимера вдоль канала шнека [1]

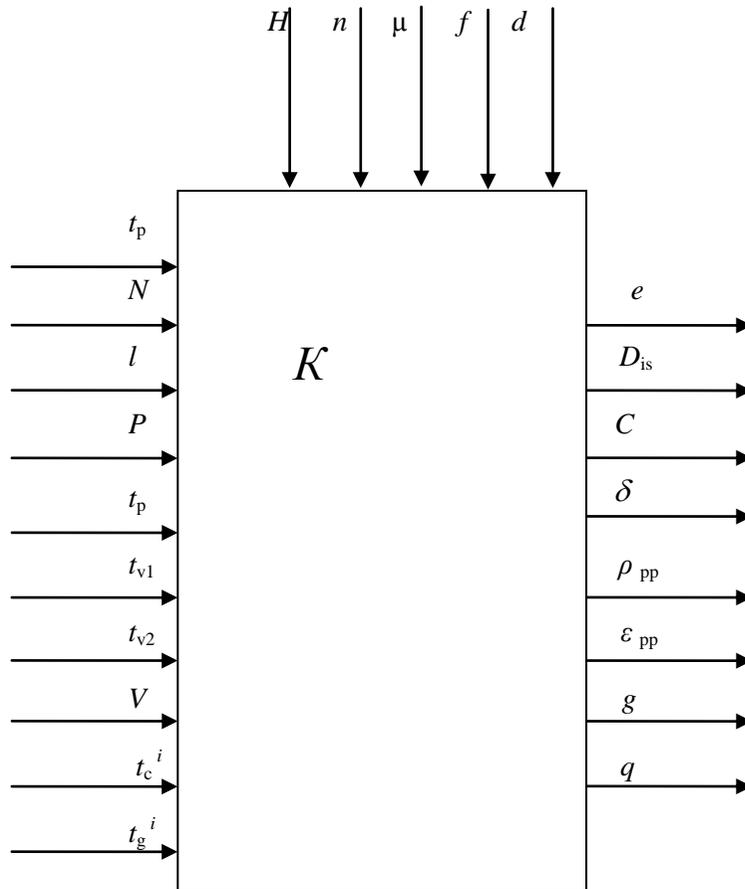
$$\bar{V}_z = \frac{\pi \rho V}{4 \rho_p h \varpi} (D_{is}^2 - d_{pr}^2) \delta \quad (7)$$

$$\delta = \frac{V_b}{V_{pp}} = 1 - \frac{\rho_{pp}}{\rho_p} \quad (8)$$

$$\bar{V}_z = \frac{\pi \rho V (1 - \delta)}{4 \rho_p h \omega} (D_{is}^2 - d_{pr}^2) = \frac{\pi \rho_{pp} V}{4 \rho_p h \omega} (D_{is}^2 - d_{pr}^2) \quad (9)$$

где V_b – объем воздушных включений; V_{pp} – объем пенопласта; ρ_p – плотность сплошной пластмассы; ρ_{pp} – плотность пенопластовой изоляции кабельной жилы.

После наложения изоляции кабель попадает в первую ванну охлаждения.



Блок-схема многомерного звена – экструдера для наложения химически вспененной изоляции на жилу кабеля

Экструдер с ванной охлаждения, на котором осуществляется наложение пористой изоляции, является сложным многомерным объектом. На рисунке представлена матрица оператора многомерного звена [1].

Входными переменными данного многомерного звена являются: t_p – температура предварительно нагретого внутреннего проводника; N – обороты шнека экструдера; l – расстояние от кабельной головки до первой ванны охлаждения; P – давление в головке; t_p – температура расплава; t_{v1} – температура воды в первой ванне охлаждения; t_{v2} – температура воды во второй ванне охлаждения; V – скорость изолирования; t_c^i – температура i -й зоны нагрева цилиндра экструдера ($i = 1 \div 5$); t_g^i – температура i -й зоны нагрева головки. Помехи: H – уровень гранул пластмассы в загрузочном бункере; h – индекс течения пластмассы; μ – вязкость пластмассы; f – натяжение проводника; d – диаметр внутреннего проводника.

Контролируемые выходные переменные: D_{is} – диаметр изоляции; C – погонная емкость изоляции; e – эксцентриситет внутреннего проводника относительно изоляции. Неконтролируемые параметры: ρ_{pp} – плотность изоляции; ε_{pp} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; δ – степень пористости изоляции; q – зазор между внутренним проводником и изоляцией.

Емкость коаксиального кабеля может быть определена [1] как

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{is}}{\varepsilon_{is} \ln \frac{D}{D_{is}} + \ln \frac{D_{is}}{d}}, \quad (10)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε_{is} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Связь параметров, контролируемых на отдельных технологических операциях и формируемых при достижении стабилизации режимных показателей, определяют основные параметры качества кабеля с учетом возможных отклонений.

$$Z(x) = \frac{e}{\sqrt{\varepsilon_{pp}(x)}} \ln \sqrt{\frac{4g(x) \cdot (\varepsilon_p - 1)}{d^2 \pi \rho_p [\varepsilon_{pp}(x) - 1]}} + 1. \quad (11)$$

Данное выражение показывает зависимость волнового сопротивления кабеля от технологических параметров качества, таких как ε_{pp} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, $g(x)$ – масса изоляции на единицу длины проводника [1].

Приведенные выше выражения позволяют сделать вывод, что для устранения неоднородностей и достижения требуемых эксплуатационных показателей качества кабеля как канала связи необходимо управлять режимными показателями на каждой технологической операции производственной линии, основываясь на главных принципах системного подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрошин В.Н. Автоматическое управление объектами с распределенными параметрами в технологических процессах изолирования кабелей связи. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 182 с.
2. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 464 с.
3. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2016 г.

TELECOMMUNICATION CABLE EFFICIENCY PERFORMANCE SIMULATION BY MEANS OF THE SYSTEM APPROACH

E.O. Soliakova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper deals with the simulation models of performance efficiency of the telecommunication cable as a telecommunication line formed in different manufacturing processes. The performance dependence on manufacturing conditions is presented.

Keywords: *system approach, automation, cable manufacture.*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

Требования к оформлению статей находятся на сайте университета

<http://vestnik-teh.samgtu.ru>

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Редколлегия журнала