

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РЕЗИСТИВНО-ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ХЛОРА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для современного этапа развития титаномагниевого комплекса страны характерно усиление требований к энергоэффективности, сокращению энергозатрат, прежде всего, из-за роста стоимости энергоресурсов и тарифов на электроэнергию. Эти вопросы должны рассматриваться, как для основного производства, так и для вспомогательных технологических процессов, к которым относится экологически опасная транспортировка агрессивных веществ, в частности, хлора. Транспортировка хлора по специальным бесшовным стальным трубопроводам должна удовлетворять жестким требованиям безопасной эксплуатации. Отклонения давления и температуры транспортируемого хлора должны быть ограничены и соответствовать технологическому регламенту [1]. Из-за реструктуризации и приватизации кремниевого производства становится нерентабельным и высокозатратным использование при транспортировке хлора теплоспутников – трубопроводов с горячей водой или паром. Это обуславливает актуальность внедрения новых энергоэффективных способов нагрева, к которым следует отнести комбинированный резистивно-индукционный нагрев.

Резистивно-индукционный нагрев характеризуется как выделением тепла в электрическом кабеле, так и бесконтактной передачей энергии его металлической оболочке и трубам хлоропровода. Для его практической реализации в структуре автоматизированной системы управления нагревом хлоропровода требуется проведение комплекса исследований электрических и тепловых характеристик, влияния электрических параметров на стабильность температурных технологических режимов прокачки хлора в различных погодных условиях [1]. В этом случае возможности экспериментальных исследований на действующем производственном оборудовании весьма ограничены. Поэтому для анализа сопряженных электромагнитных и тепловых процессов более целесообразным является применение методов математического моделирования и специализированных прикладных пакетов программ [2]. Однако, как правило, сложные нелинейные пространственные электротепловые математические модели [3] не позволяют применить соответствующие алгоритмы для управления нагревом хлоропровода в режиме реального времени. Это требует разработки специальных подходов для идентификации электрических параметров системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора в широком диапазоне варьирования электрической частоты и температуры окружающей среды, соответствующей климатическим условиям эксплуатации хлоропровода.

Цель работы заключается в разработке высокоэффективной методики идентификации электрических параметров резистивно-индукционного нагревателя хлоропровода, учитывающей особенности конструктивного исполнения, температурные зависимости электрических и тепловых свойств материалов, влияние параметров электроснабжения, условий теплообмена и температуры окружающей среды, обладающей высокой точностью и вычислительной эффективностью, обеспечивающей ее применение в системе управления нагревом в режиме реального времени.

Преобразование электрической энергии переменного тока в энергию электромагнитного поля и тепловую в резистивно-индукционных нагревателях, определяется взаимосвязанными электромагнитными и тепловыми процессами, которые описываются электротепловой моделью (1) [1]. Она включает уравнения переменного электромагнитного поля в частотной формулировке для амплитуд векторного магнитного потенциала и уравнения теплопередачи в пространственной системе «хлор – трубопровод – резистивно-индукционный нагреватель (электрокабель, стальной трубчатый экран) – теплоизоляция – окружающая среда» (Рис. 1):

$$\begin{cases} j\omega\sigma_j(\theta_j)\mathbf{A}_j + \nabla\left[(\mu_0\mu_j(\theta_j))^{-1}\nabla\times\mathbf{A}_j\right] = 0, \mathbf{B}_j = \text{rot}(\mathbf{A}_j), \\ \rho(\theta_j)_j C_p(\theta_j)_j (\mathbf{W}_j, \nabla\theta_j) - \nabla(\lambda(\theta_j)_j \nabla\theta_j) = p(\theta)_j, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma(\theta)$, $\mu(\theta)$ – удельная электропроводность, относительная магнитная проницаемость материалов; ω – угловая частота; $\rho(\theta)$, $\lambda(\theta)$, $C_p(\theta)$ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность; \mathbf{W}_j – скорость прокачки хлора $|\mathbf{W}_j| = 0, \forall j \neq 6; |\mathbf{W}_j| = W_{Cl}, j = 6$; Q_j – удельная мощность источников тепла, обусловленная резистивным нагревом проводов, индукционным нагревом стенок нагревателя и хлоропровода. Индексы $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ соответствуют областям медного провода и его электрической изоляции, трубчатым экранам и трубопроводу, теплоизоляции и хлору.

Система уравнений электротепловой модели (1) замыкается условиями Кулона [2] и граничными условиями вида:

$$\mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0, \forall i, k \in (1,6), i \neq k \quad (2)$$

– на границах сопряжения сред с разными электромагнитными свойствами,

$$\mathbf{A}_k = 0, \quad (3)$$

– на границах магнитной изоляции и внешних границах,

$$\mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = \mathbf{J}_s \forall i, k \in (1,6), i \neq k, \quad (4)$$

– на границах медного провода,

$$\mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = \mathbf{n}_k \cdot (\lambda(\theta_k)_k \nabla \theta_k), \forall i, k \in (1,6), i \neq k, \quad (5)$$

– на границах сопряжения сред с различными теплофизическими свойствами

$$\mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = 0, \forall i \in (1,6), \quad (6)$$

– на границах тепловой изоляции

$$\mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = Q_0 + \alpha(\theta_{oc}, \theta_i, w) \cdot (\theta_{oc} - \theta_i), \quad (7)$$

$$\forall i \in (1,6)$$

– на внешних границах, где индексами i, k обозначаются внутренние и внешние границы подобластей в расчетной области, индексом oc – окружающая среда, \mathbf{n} – вектор нормали к граничной поверхности подобласти.

Математическая реализация электротепловой модели (1) – (7) может быть существенно упрощена, если, с учетом соотношений геометрических размеров хлоропровода и элементов системы резистивно-индукционного нагрева, перейти от пространственной формулировки к плоскопараллельной [2]:

$$\mathbf{A} = \bar{\mathbf{k}} \cdot A_z, \quad \text{grad}(\theta) = \bar{\mathbf{i}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \bar{\mathbf{j}} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \bar{\mathbf{i}} \cdot B_x + \bar{\mathbf{j}} \cdot B_y, \quad \mathbf{H} = \bar{\mathbf{i}} \cdot H_x + \bar{\mathbf{j}} \cdot H_y$$

Для расчетов электромагнитного и температурного полей применялся метод конечных элементов, реализованный в структуре средств COMSOL Multiphysics, при условии, что температура на границе контакта хлора с внутренней поверхностью трубы соответствует среднему значению в интервале допустимых значений технологических температур с относительной погрешностью менее 0,1%. Для этого проводились итерационные вычисления с варьированием амплитудных значений тока в электрическом кабеле на каждом шаге в совокупности значений температур окружающей среды и угловой частоты ω .

Численный эксперимент по модели (1) с условиями (2)– (7) и допущениями (8) проводился в интервалах изменения температур окружающей среды от -32°C до +35°C, частоты переменного тока от 0 Гц до 400 Гц, которые определяются условиями эксплуатации. Для дальнейшей обработки и визуализации результатов массивы расчетных данных (составляющих индукции магнитного поля и удельных потерь от вихревых токов) экспортировались в среду MathCAD, где для установленной длины участка хлоропровода (1000 м) определялись:

$$S = U \cdot I, \quad P = P_{rot} + P_{np}, \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad \cos \varphi = P/S \quad (9)$$

– полная, активная и реактивная мощности резистивно-индукционного нагрева, коэффициент мощности при рассчитанном действующем значении тока – I ;

$$P_{np} = I^2 \cdot R_{np}(\theta_{np}) \cdot k_d, \quad P_{rot} = \iint_{\Omega} \sigma(\theta)^{-1} \cdot \mathbf{J}_{rot}^2 dx dy \quad (10)$$

– активные потери в электрическом кабеле (с учетом добавочных потерь) и от вихревых токов, индуцированных в стальном экране и трубопроводе, где R_{np} – активное сопротивление медного кабеля (для 1000 м его длины) [2], J_{rot} – расчетная плотность вихревых токов в экране и трубе хлоропровода;

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}, \quad U_R = P/I, \quad U_L = 4.44 \cdot f \cdot \Phi, \quad (11)$$

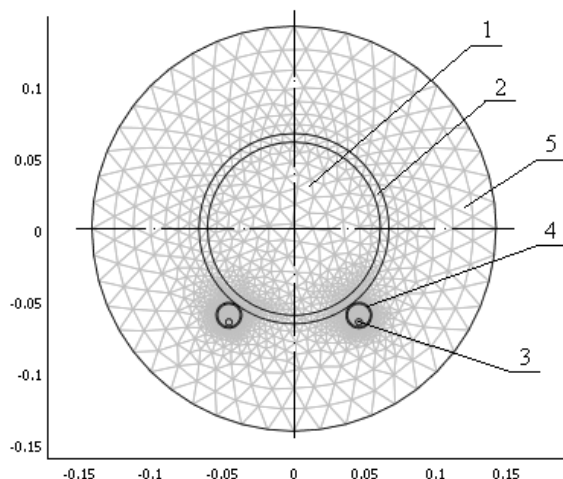
– падение напряжения в электрическом кабеле, его активная и реактивная составляющие, где

$$\Phi = \iint_S (\mathbf{B}, d\mathbf{S})$$

– результирующий магнитный поток в продольном сечении, проходящем через оси электрического кабеля и хлоропровода:

Так время итерационных расчетов электротепловой модели (1) – (8) и определения компонент изображающего вектора параметров резистивно – индукционного нагрева

$$X = [U, I, S, \cos \varphi, P_{np}, P_{rot}], \quad (12)$$



1 – хлор, 2 – хлоропровод, 3 – электрический кабель, 4 – стальной экран, 5 – теплоизоляция

Рис.1 Расчетная область хлоропровода с резистивно-индукционными нагревателями.

для каждой совокупности дискретных значений температуры окружающей среды и электрической частоты достигали 160 – 180 мин, то рассматривалось построение эффективной расчетной методики на основе аппроксимации дискретных значений компонент изображающего вектора (12).

Для этого расчетные данные, полученные из выражений (9) – (11) в виде изображающего вектора (12) нормировались:

$$x_{i,j} = \frac{X_{i,j} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}},$$

а граничные оценки устанавливались соотношениями

$$x_{\max j} = \max(x_i^{(j)}), \forall i \in [1, \dots, m],$$

$$x_{\min j} = \min(x_i^{(j)}), \forall j \in [1, \dots, n].$$

Тогда на полиномиальном базисе для нормированных функций

$$Fx(f) = \sum_{k=1}^{m_k} \alpha_k \cdot f^{\beta_k} \quad (13)$$

и граничных покомпонентных оценок

$$FX_{\max}(\theta) = \sum_{l=1}^{n_l} \gamma_l \cdot \theta^{\xi_l}, \quad (14)$$

$$FX_{\min}(\theta) = \sum_{g=1}^{n_g} \lambda_g \cdot \theta^{\nu_g} \quad (15)$$

для размерных значений компонент вектора (12) можно применить аппроксимирующие функции вида:

$$X(\theta, f) = Fx(f) \cdot [FX_{\max}(\theta) - FX_{\min}(\theta)] + FX_{\min}(\theta) \quad (16)$$

где α_k , γ_l , λ_g , β_k , ξ_l , ν_g – коэффициенты аппроксимации по критерию минимума квадратов невязок (табл 1.).

Табл. 1 Коэффициенты аппроксимации для идентификации параметров резистивного индукционного нагрева

Параметры аппроксимации	Ток	Напряжение	Полная мощность	Коэффициент мощности	Активные потери	Индуктивные потери
α_1	1.147	-0.124	1.756	-0.609	1.295	-0.303
γ_1	81.18	189.956	12051	0.982	9249.2	6019
λ_1	51.06	150.85	9550	0.791	3362.7	275.7
α_2	7.208e-6	-4.01e-7	-6.93e-4	-1.923e-5	2.821e-5	-2.796e-5
γ_2	-0.011	-0.02	-0.364	1.92e-7	0.019	-0.028
λ_2	-6.051e-3	-0.018	0.09	-3.82e-6	0.122	-0.28
α_3	-5.705e-3	3.06e-3	-0.151	0.115	-0.026	0.026
γ_3	-0.967	-2.66	-282.91	-2.217e-5	-230.142	-146.43
λ_3	-0.669	-2.11	-237.7	-1.105e-3	-87.3	-5.61
Относительная погрешность, %	2.614	2.312	1.036	1.256	2.278	4.56

Характерной особенностью методики (13) – (16) является реализация базового принципа разделения переменных, когда компоненты вектора нормированных функций (13) зависят функции только от частоты f , а граничные оценки параметров (14), (15) – температуры окружающей среды. Это существенно упрощает алгоритм определения коэффициентов аппроксимации и позволяет применить стандартные функции MathCAD.

По данным численного эксперимента установлено, что увеличение частоты электрического тока в теплоспутниках приводит к перераспределению составляющих активной мощности, которая выделяется в стальных экранах и электрических кабелях (рис. 2). При увеличении электрической частоты до 400 Гц удельная составляющая мощности нагрева вихревыми токами трубчатых экранов увеличивается до 40%. Это обеспечивает стабильность температуры электрического кабеля при форсировании нагрева из-за снижения температуры окружающей среды, и, следовательно, срока службы электрического кабеля и эксплуатационной надежности системы технологического обогрева хлоропровода.

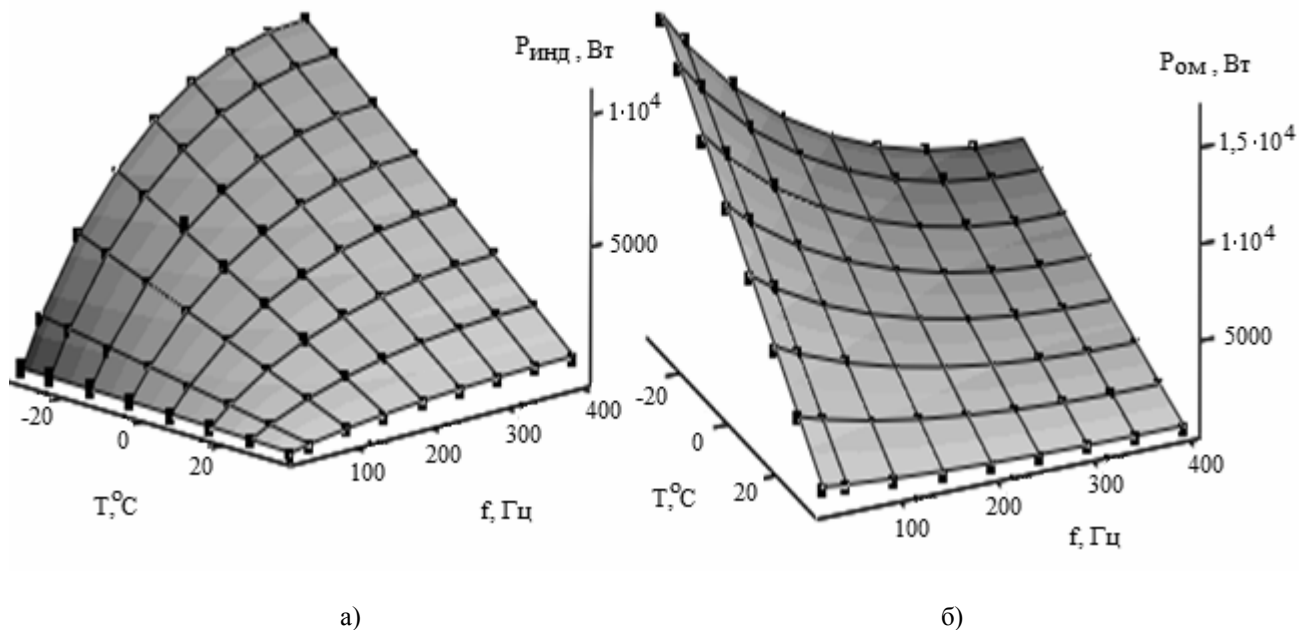


Рис. 2 Составляющая активной мощности, индуцированной в ферромагнитных экранах (а), и потери активной мощности в электрическом кабеле (б) (на 1000 м длины хлоропровода).

Сравнение результатов, полученных на основе электротепловой модели (1) – (8) и выражений (9) – (12) методами конечных элементов и итераций, с аппроксимирующими соотношениями (16) позволило установить (табл., рис.2), что достаточно высокий уровень точности (относительная погрешность менее 2,62%) обеспечивается уже при показателе степени полинома $n=2$ в соотношениях (13) - (15). Время расчета параметров резистивно-индукционного нагрева хлоропровода по этим зависимостям для массивов дискретных значений температур окружающей среды и электрической частоты не превышает нескольких секунд, а требования к вычислительным ресурсам минимальны. Таким образом, аппроксимирующие соотношения (13) – (14) обеспечивают реализацию в структуре средств программирования микроконтроллеров и отвечают требованиям для управления резистивно-индукционными нагревателями в режиме реального времени.

Выводы:

Электротепловая модель при ее реализации методами конечных элементов и итераций позволяет идентифицировать параметры системы нагрева хлоропровода в широком диапазоне варьирования режимных параметров с учетом особенностей конструктивного исполнения теплоспутников, температурных зависимостей электрических и тепловых свойств материалов, параметров электроснабжения, механизмов теплообмена, соответствующих климатическим условиям эксплуатации хлоропровода, условий термостойкости электроизоляции. Однако, для этого требуются существенные затраты времени и вычислительных ресурсов.

Аппроксимация многомерных массивов расчетных данных на основе комбинации методов наименьших квадратов и разделения переменных обеспечивает высокую точность идентификации электрических параметров системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора, многократное снижение затрат времени (до 1 с) и возможность реализации в структуре ПО современных микроконтроллеров при управлении в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко П.Д. Анализ энергоэффективности электротехнического комплекса резистивно-индукционного нагрева хлоропровода / П.Д. Андриенко, С.Т. Ярымбаш, Д.С. Ярымбаш // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технического журнала «Электроинформ». – Львов, 2009, – С. 381 – 382.
2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве стального реактора с сыпучим материалом // Техн. электродинамика. – 2005. – №3. – С. 3-11.
3. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат. 1988. – 280 с.