

Безконтактний заряд ємнісного накопичувача з використанням трансформатора Тесла

Досліджено процеси, що забезпечують безконтактний заряд ємності по одному проволу, частково розташованому в полі трансформатора Тесла (ТТ). Отримано залежності величини напруги на ємності та часу її заряду від взаємного розташування ТТ і проволу, що забезпечує заряд, а також його довжини і перерізу. Досліджено особливості одночасного заряду кількох ємностей, залежність часу їх заряду від взаємного положення частково розташованих в полі ТТ зарядних проволів, а також досліджено умови заряду батареї конденсаторів від малопотужного джерела енергії. Бібл. 8, рис. 8, табл. 2.

Ключові слова: трансформатор Тесла, конденсатор, напруга заряду, часткова ємність, струм зміщення.

A.A. Shcherba, M.O. Lomko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Non-contact charge of storage capacitor using a Tesla's transformer

The processes that provide a non-contact charge of capacitor over a single wire, partially located in the Tesla's transformer (TT) field are studied. The dependences of the voltage of capacitor and its charging time on the mutual arrangement of the TT and wire, providing the charge, as well as length and cross section of the wire are found. Features of a simultaneous charging of several capacitors, dependence of their charging time on mutual position of charge conductors that partially located in the TT field are investigated, and also conditions of a charge of the capacitor bank from a low-power energy source are studied. References 8, figures 8, tables 2.

Key words: Tesla's transformer, capacitor, charge voltage, partial capacitance, displacement current.

Надійшла 22.06.2016

Received 22.06.2016

УДК 621.365.51

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.М. Золотарев¹, докт. техн. наук, **Р.В. Беянин²**, **А.Д. Подольцев³**, докт. техн. наук

1, 2 – ПАТ "Завод "Южкабель",

ул. Автогенная, 7, Харьков, 61099, Украина

3 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

e-mail: podol@ied.org.ua

Предложена методика расчета электромагнитных процессов и энергетических характеристик индукционной канальной печи для получения медной катанки в режиме медленного нагревания исходного шаблона от комнатной температуры до температуры плавления. В ее основу положена эквивалентная электрическая цепь печи с медленно изменяющимся сопротивлением нагрузки, обусловленным повышением температуры шаблона. Из результатов проведенных расчетов реактивной мощности, потребляемой печью при различной температуре шаблона, следует, что значение этой мощности в конце процесса нагрева уменьшается приблизительно на 10 % от начального, поэтому значение компенсирующей емкости в конце процесса следует уменьшать на эту же величину. Библ. 7, рис. 6.

Ключевые слова: индукционная канальная печь, электромагнитные процессы, реактивная мощность, конденсаторная батарея.

В настоящее время потребителями продукции металлургических предприятий предъявляются высокие требования к качеству выплавляемой медной катанки (однородность, химическая чистота, стоимость и др.). Самым жестким требованиям, как правило, удовлетворяет медная катанка, изготовленная в индукционных канальных печах. В силу этого обстоятельства именно индукционные установки такого типа используются в кабельной промышленности при изготовлении медной катанки для производства жил силовых кабелей.

Общий вид исследуемой индукционной канальной печи мощностью 500 кВт показан на рис. 1. Принцип ее действия подобен принципу действия однофазного силового трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания [1, 2, 4, 7]. Однако электрические

параметры канальной электропечи и обычного трансформатора заметно отличаются. Это вызвано различием их конструкций.

Конструктивно печь состоит [2, 4] из футерованной ванны, в которой помещается вся масса расплавленного металла и находящегося под ней индуктора. Ванна сообщается с плавильным каналом, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо. Система индуктор – магнитопровод называется печным трансформатором. Медный шаблон футеруется огнеупорной смесью с рабочей температурой $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, после его расплавления в футеровке образуется плавильный канал. В подовом кирпиче футерованной ванны имеется цилиндрический проем, в который вставляется индуктор, витки которого навиты на два стержня замкнутого магнитопровода.



Рис. 1

Индукционная единица объединяет печной трансформатор и подовый камень с каналом. Индуктор является первичной обмоткой трансформатора, а роль вторичного витка выполняет расплавленный металл, заполняющий канал и находящийся в нижней части ванны. Ток, протекающий во вторичной цепи, вызывает нагрев расплава, при этом почти вся энергия выделяется в канале, имеющем малое сечение (в канале поглощается 90...95 % подведенной к печи электрической энергии). Металл нагревается за счет тепло- и массообмена между каналом и ванной. Перемещение металла обусловлено главным образом действием электродинамических сил, возникающих в канале, и в меньшей степени конвекцией, связанной перегревом металла в канале по отношению к ванне. Перегрев ограничивается некоторой допустимой величиной, лимитирующей допускаемую мощность в канале.

Достоинствами таких индукционных канальных печей являются:

- 1). Выделение энергии в медной загрузке без промежуточных нагревательных элементов.
- 2). Интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в печи обеспечивает быстрое плавление катодов и быстрое выравнивание температуры по всему объёму расплава.
- 3). Высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности, особенно на средних частотах.
- 4). Минимальное удельное электропотребление.
- 5). Простота и удобство обслуживания печи, управления и регулировки процесса плавки, возможность автоматизации процесса, а также малое загрязнение окружающей среды.

При анализе электромагнитных процессов в индукционных канальных печах, используемых для производства медной катанки, следует различать два режима их работы:

- предварительный режим медленного нагрева медного шаблона от комнатной температуры до температуры плавления, включая получение расплавленной ванны и обеспечение электродинамического перемешивания расплава для получения однородной структуры. Длительность такого процесса может достигать от нескольких часов и до суток;
- рабочий режим поддержания требуемой температуры расплавленной меди непосредственно при получении из нее катанки.

Особенностью работы печи в первом режиме является уменьшение по мере нагрева электропроводности медного шаблона, что приводит к изменению основных энергетических характеристик печи и, в частности, величины потребляемой активной и реактивной мощности. Учитывая большую длительность протекания переходного электротеплового процесса в этом режиме, его анализ на полевом уровне, например, с использованием пакета Comsol [6] и мате-

матических моделей, описанных в [5], сопряжен с чрезвычайно большими затратами компьютерного времени. В качестве альтернативного подхода для анализа длительно протекающих электротепловых процессов в исследуемой установке в данной работе предлагается использовать метод моделирования на основе теории электрических цепей с медленно изменяющимися от температуры параметрами, в частности, величины эквивалентного сопротивления нагрузки.

Целью настоящей работы является разработка на основе теории электрических цепей электромагнитной модели индукционной канальной печи при ее работе в режиме длительно нагрева медного шаблона от комнатной температуры и до температуры плавления, анализ потребляемой при этом активной и реактивной мощностей установки и определение оптимального закона изменения компенсирующей емкости в зависимости от величины температуры медного шаблона.

Описание компьютерной модели исследуемой индукционной канальной печи.

Компьютерная модель индукционной печи при питании от однофазного источника питания, реализованная средствами пакета программ Matlab/Simulink, показана рис. 2. Она содержит источник в общем случае регулируемого напряжения промышленной частотой 50 Гц, трансформаторную модель индукционной печи, во вторичной обмотке которого включена зависящая от температуры активная нагрузка, моделирующая процессы с медного шаблона.

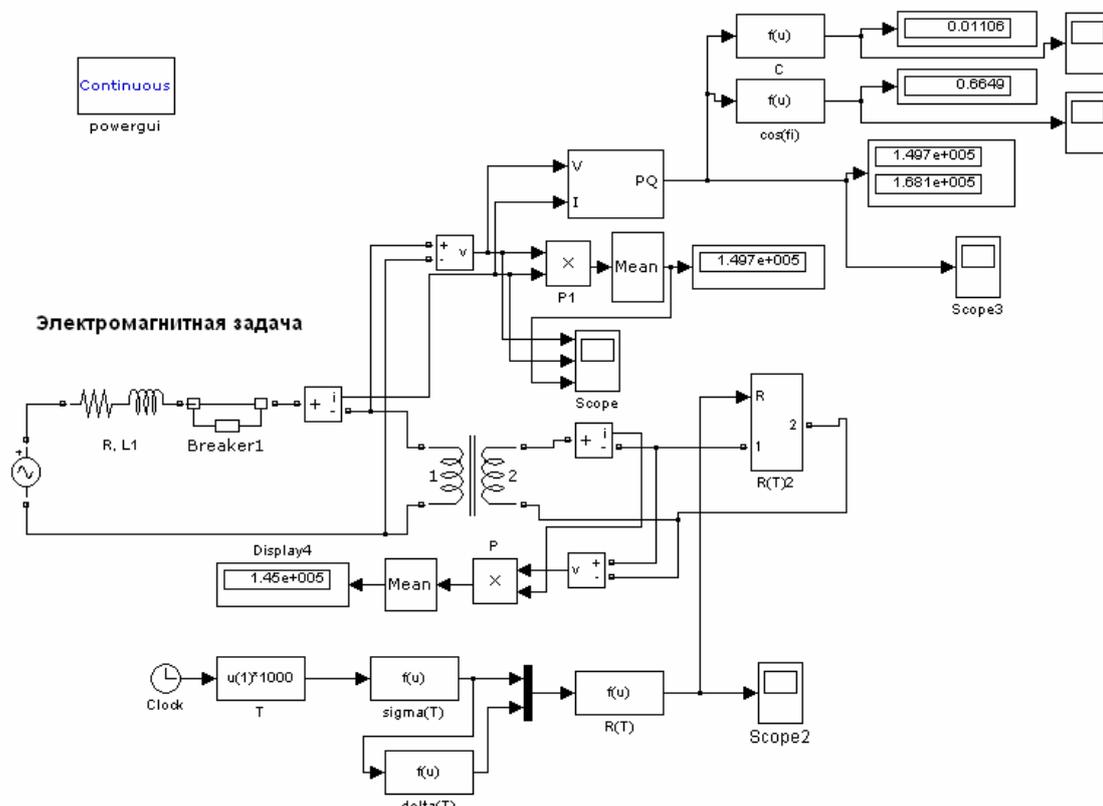


Рис. 2

В модели, показанной на рис. 2, наряду с силовой цепью также содержатся средства измерения активной и реактивной мощностей, потребляемых печью и выделяемых в нагрузке, блоки вычисления зависящего от температуры сопротивления медного шаблона и блок формирования медленно изменяющейся во времени температуры.

При изменении в ходе индукционного нагрева температуры медного шаблона величина его активного сопротивления изменяется вследствие двух факторов – изменения величины электропроводности и изменения в связи с этим толщины скин-слоя в массивном медном шаблоне. Величина активного сопротивления медного шаблона в широком диапазоне изменения температуры может быть вычислена на основании следующего выражения:

$$R = \frac{1}{\sigma(T)} \frac{l}{\delta(T)P},$$

где $\sigma(T)$ – электропроводность медного шаблона, зависящая от температуры T ; $\delta(T)$ – толщина скин-слоя в медном шаблоне, определяемая на основании выражения

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_0 \sigma(T)}}; P$$

– величина периметра поперечного сечения медного шаблона; l – длина проводника.

Здесь в силу относительно больших размеров шаблона при расчете его сопротивления использовалось приближение резкого скин-эффекта.

Температурная зависимость для меди $\sigma(T)$ аппроксимировалась таким выражением [3]:

$$\sigma(T) = \begin{cases} \frac{10^8}{1,68(1 + T(0,00433 + 0,453 \cdot 10^{-6} T))} & T < T_{\text{пл}} \\ \frac{10^8}{0,1 + 0,009(E + 273,15)} & T \geq T_{\text{пл}} \end{cases}, \text{ где } T_{\text{пл}} \text{ – температура плавления меди.}$$

Результаты расчета электромагнитного процесса в канальной печи в режиме медленного повышения температуры медного шаблона представлены на рис. 3–6, из которых можно заключить следующее. С ростом температуры от 20 °С и до температуры плавления возрастает сопротивление шаблона приблизительно в три раза (см. рис. 3), хотя величина электропроводности при этом уменьшается приблизительно в 10 раз вследствие увеличения толщины скин-слоя. Как показано на рис. 4, при этом возрастает активная мощность $P(T)$, потребляемая печью, и снижается реактивная мощность $Q(T)$. В силу этого обстоятельства увеличивается коэффициент мощности установки, что отражено на рис. 5.

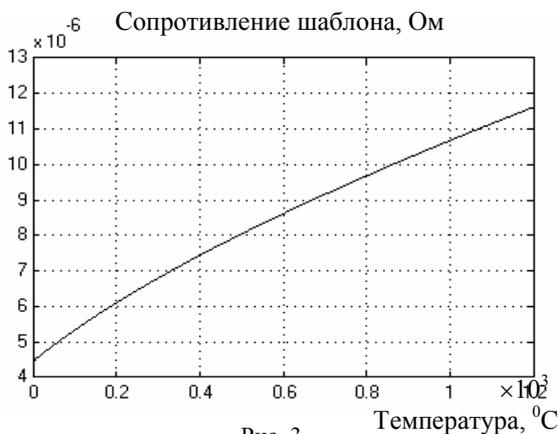


Рис. 3

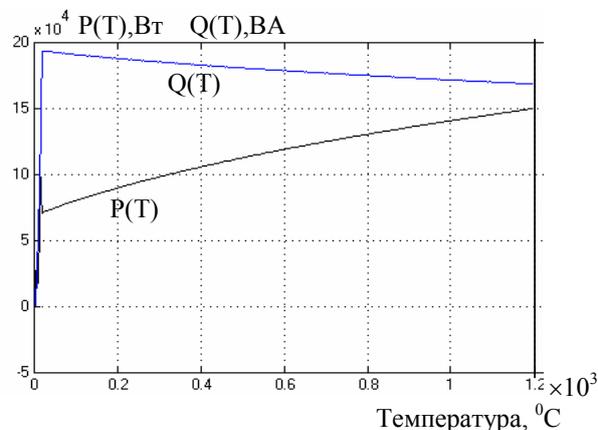


Рис. 4

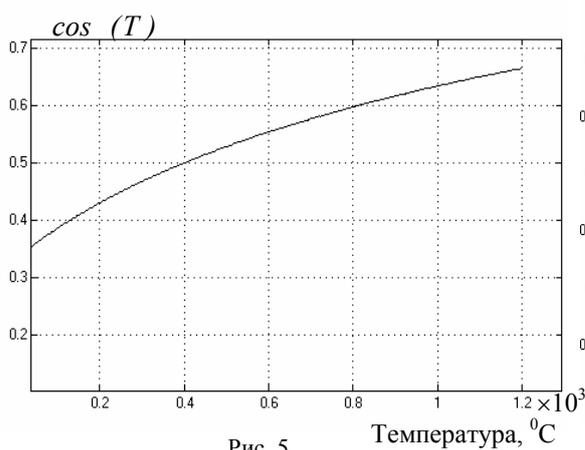


Рис. 5

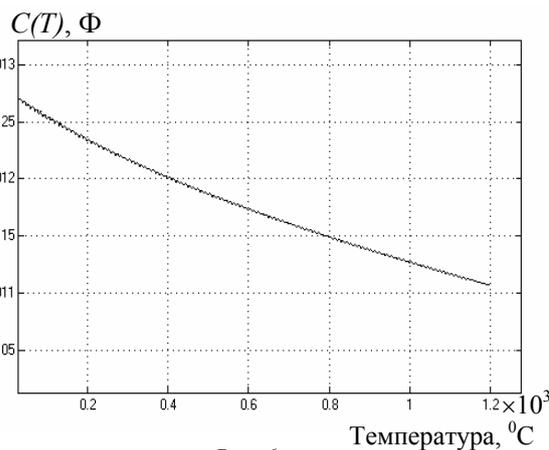


Рис. 6

На рис. 6 показано, що величина требуемой из условия компенсации реактивной мощности конденсаторной батареи должна изменяться в зависимости от изменения температуры медного шаблона. Видно, что по мере нагрева шаблона величина емкости батареи должна уменьшаться приблизительно на 10 % по отношению к начальному значению при комнатной температуре. Полученные зависимости позволяют обеспечить процесс нагрева медного шаблона с наибольшей эффективностью за счет регулирования компенсируемой реактивной мощности.

Заключение. Предложена методика расчета электромагнитных процессов и энергетических характеристик индукционной канальной печи для получения медной катанки в режиме медленного нагревания исходного шаблона от комнатной температуры и до температуры плавления всего объема металла. В методике применяется эквивалентная электрическая цепь печи с переменным параметром – медленно изменяющимся сопротивлением нагрузки, обусловленным повышением температуры медного шаблона. При расчете этого сопротивления учитывается как уменьшение величины электропроводности шаблона с повышением температуры, так и возникающего при этом увеличения глубины проникновения магнитного поля в его массивные элементы.

Согласно результатам проведенных расчетов показано, что в процессе нагревания медного шаблона до температуры плавления, для полной компенсации реактивной мощности, потребляемой печью на частоте 50 Гц, величина емкости конденсаторной батареи должна уменьшаться приблизительно на 10 % от емкости при начальной комнатной температуре при условии неизменного значения напряжения питающей сети.

1. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
2. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи: Учеб. пособие для вузов / Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Энергия, 1967.
3. Столович Н.Н., Милицкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов / Под ред. А. Г. Шашкова. – Минск: Наука и техника, 1975. – 160 с.
4. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.
5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 10–18.
6. Comsol Multiphysics, www.comsol.com.
7. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of induction heating. – Marcel Dekker, Inc., 2003. – 800 p.

УДК 621.365.51

В.М. Золотарьов¹, докт. техн. наук, **Р.В. Белянін²**, **О.Д. Подольцев³**, докт. техн. наук

1, 2 – ПАТ "Завод "Південкабель",

вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

3 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Аналіз електромагнітних процесів в індукційній канальній печі, що використовується у кабельній промисловості

Запропоновано методику розрахунку електромагнітних процесів і енергетичних характеристик індукційної канальної печі для отримання мідної катанки в режимі повільного нагрівання мідного шаблона від кімнатної температури до температури плавлення. В її основу покладено еквівалентне електричне коло печі з опором навантаження, який повільно змінюється у часі внаслідок підвищення температури шаблона. З результатів проведених розрахунків реактивної потужності, яка споживається піччю при різній температурі шаблона, витікає, що значення цієї потужності в кінці процесу нагрівання зменшується приблизно на 10 % від початкового, тому і значення ємності, що компенсує цю потужність, в кінці процесу слід зменшувати на цю ж величину. Бібл. 7, рис. 6.

Ключові слова: індукційна канальна піч, електромагнітні процеси, реактивна потужність, конденсаторна батарея.

V.M. Zolotaryov¹, R.V. Belyanin², O.D. Podoltsev³

1, 2 – PJSC "Zavod "Yuzhcable",

Avtogenna st., 7, Kharkov, 61099, Ukraine

3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Analysis of electromagnetic processes in the induction channel furnace used in the cable industry

A method of calculating electromagnetic processes and energy characteristics of the channel induction furnace to produce copper rod has been proposed. The model of the furnace is based on the equivalent electrical circuit with slowly changing load resistance due to an increase in the temperature pattern. From the results of calculations of reactive power consumed by the furnace at a different temperature pattern was shown that the value of this power at the end of the heating process is reduced by approximately 10 % from the initial value and hence the value of compensating capacitive at the end to be reduced by the same amount. References 7, figures 6.

Key words: induction channel furnace, electromagnetic processes, reactive power, capacitor bank.

Надійшла 22.06.2016

Received 22.06.2016

УДК 621.315.2 : 004.94

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ С МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
rB.irinan@gmail.com

Путем компьютерного моделирования исследованы распределения электрического поля в неоднородном полиэтиленовом материале с микроразмерными включениями различной формы – сферическими, эллипсоидными, без каналов и соединенные каналами, заполненными водой, а также в виде упрощенного триинга с тремя ветвями. Численное моделирование проведено в двух- и трехмерном случаях. Используются модель эффективной композиционной среды и подходы к расчету гетерогенных диэлектриков как матричных или статистических смесей. Библ. 16, рис. 7.

Ключевые слова: полиэтиленовая изоляция, микроразмерные водные включения, композиционный диэлектрик, эффективная диэлектрическая проницаемость, матричные и статистические смеси, компьютерное моделирование.

Введение. В настоящее время в мире широко используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (ПЭ) на высокое и сверхвысокое (до 500 кВ) напряжения. Полиэтиленовая изоляция обладает отличными электрическими, термическими и механическими свойствами, что обеспечивает достаточно высокую надежность материала в эксплуатации. Недостатком полиэтиленовой изоляции является неоднородность ее структуры. Дефекты-неоднородности свойственны изоляции в исходном состоянии, а также появляются в процессе изготовления и функционирования кабелей. При эксплуатации полиэтиленовой изоляции под действием электрического поля и в присутствии воды в местах расположения микроразмерных полостей и инородных включений в полиэтиленовом материале зарождаются и распространяются водные триинги [13]. Развитие триингов приводит к деградации изоляции и снижению ее электрической прочности [10].

Картина водного триинга в полиэтиленовой изоляции силового кабеля показана на рис. 1 а [4]. В работах [6, 14] описана и использована модель роста триинга, которая состоит из совокупности микровключений, заполненных водой и соединенных каналами-микротрещинами (рис. 1 б). Такая модель экспериментально подтверждена, например, в [14]. Согласно данным работы [14] микровключения в полиэтиленовой изоляции возникают при изготовлении и в процессе эксплуатации из-за наличия аморфных областей, содержащих влагу и вследствие сгущения и группирования субмикроразмерных полостей в структуре полиэтилена.

Первоначальные размеры включений-неоднородностей в сшитом-полиэтиленовой изоляции варьируются от 1 до 20 мкм и в дальнейшем могут увеличиваться за счет образования