

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ДЛИТЕЛЬНО ПРОТЕКАЮЩИХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ  
КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДНОЙ КАТАНКИ**

|          |                                                             |
|----------|-------------------------------------------------------------|
| Журнал   | Технічна електродинаміка                                    |
| Издатель | Институт электродинамики Национальной академии наук Украины |
| ISSN     | 1607-7970 (print), 2218-1903 (online)                       |
| Выпуск   | № 4, 2017 (июль/август)                                     |
| Страницы | 55 – 64                                                     |

**Авторы**

**А.А. Щерба**<sup>1\*</sup>, чл.-корр. НАН Украины, **А.Д. Подольцев**<sup>1</sup>, докт.техн.наук, **И.Н. Кучерявая**

докт.техн.наук,

**В.М. Золотарев**

<sup>2</sup>

, докт.техн.наук,

**Р.В. Белянин**

<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,  
e-mail: podol@ied.org.ua

<sup>2</sup> – ПАТ "Завод "Южкабель",  
ул. Автогенная, 7, Харьков, 61099, Украина

\* ORCID ID : <http://orcid.org/0000-0002-0200-369X>

1,

*Проведено мультифизическое моделирование длительно протекающих (десятки часов), разномасштабных по времени электромагнитных и тепловых переходных процессов в индукционной канальной печи, используемой в технологии получения медной катанки. В основу реализации моделирования положены связанные между собой нелинейные электрическая и тепловая эквивалентные цепи, учитывающие такие факторы, как зависимость электропроводности и теплоемкости нагреваемого медного шаблона от температуры, наличие фазового перехода при его нагреве до температуры выше температуры плавления, периодическая загрузка холодных медных катодов в зону расплава и непрерывное литье медных заготовок. Показано, что протекающие при этом динамические процессы тепло- и массопереноса могут моделироваться эквивалентной тепловой цепью с нелинейными и коммутируемыми емкостями. Компьютерная реализация метода выполняется в программе Matlab/Simulink/SPS. Для снижения затрат компьютерного времени предложен и реализован подход искусственного уменьшения частоты источника электропитания с одновременным пропорциональным увеличением всех индуктивностей в эквивалентной электрической цепи. Приведенные результаты тепловых расчетов позволяют выбирать рациональные технологические режимы и параметры установки. Библ. 12, рис. 7.*

**Ключевые слова:** индукционная канальная печь, электромагнитные процессы, тепловые процессы, фазовый переход при плавлении заготовки, мультифизическая цепь, компьютерное моделирование.

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Поступила             | 14.03.2017 |
| Окончательный вариант | 04.05.2017 |
| Подписано в печать    | 15.06.2017 |

УДК 621.365.51

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ТРИВАЛИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МІДНОЇ КАТАНКИ**

|          |                                                             |
|----------|-------------------------------------------------------------|
| Журнал   | Технічна електродинаміка                                    |
| Видавець | Інститут електродинаміки Національної академії наук України |
| ISSN     | 1607-7970 (print), 2218-1903 (online)                       |
| Випуск   | № 4, 2017 (липень/серпень)                                  |
| Сторінки | 55 – 64                                                     |

**Автори**

**А.А. Щерба**<sup>1</sup>, чл.-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев**<sup>1</sup>, докт.техн.наук, **І.Н. Кучерява**<sup>1</sup>, докт.техн.наук,

**В.М. Золотарьов**

<sup>2</sup>

, докт.техн.наук,

**Р.В. Білянін**

<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: podol@ied.org.ua

<sup>2</sup> – ПАТ "Завод"Південкабель",  
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

*Проведено мультифізичне моделювання тривалого перебігу (десятки годин) різномасштабних за часом електромагнітних та теплових перехідних процесів в індукційній каналній печі, яка використовується в технології виготовлення мідної катанки. В основу реалізації моделювання покладено пов'язані між собою нелінійні електричне та теплове еквівалентні кола, в яких враховуються такі фактори, як залежність від температури електропровідності і теплоємності мідного шаблона, наявність фазового переходу при його нагріванні до температури вище температури плавлення, періодичне завантаження холодних мідних катодів у зону розплаву та безперервне лиття мідних заготовок. Показано, що динамічні процеси тепло- і масопереносу можуть моделюватися еквівалентним тепловим колом з нелінійними та комутуючими ємностями. Комп'ютерна реалізація методу виконується в програмі Matlab/ Simulink/SPS. Для зниження витрат*

комп'ютерного часу запропоновано метод штучного зменшення частоти джерела електроживлення з одночасним пропорційним збільшенням усіх індуктивностей в еквівалентному електричному колі. Наведені результати теплових розрахунків дозволяють вибирати раціональні технологічні режими та параметри установки. Бібл. 12, рис. 7.

**Ключові слова:** індукційна канална піч, електромагнітні процеси, теплові процеси, фазовий перехід при плавленні заготовки, мультифізичне коло, комп'ютерне моделювання.

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Надійшла           | 14.03.2017 |
| Остаточний варіант | 04.05.2017 |
| Підписано до друку | 15.06.2017 |

## Література

1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
2. Золотарев В.М., Беянин Р.В., Подольцев А.Д. Анализ электромагнитных процессов в индукционной канальной печи, используемой в кабельной промышленности // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2016. – Вип. 44. – С. 110-115.
3. Золотарев В.М., Щерба М.А., Золотарев В.В., Беянин Р.В. Трёхмерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов индукционной плавки медного шаблона с учетом конструкции элементов установки. // Техн. електродинаміка. – 2017. – № 3. – С. 13–21.
4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
5. Самарский А.А., Моисеенко В.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. выч. математики и мат. физики. – 1965. – Т. 5. – № 5. – С. 816–827.
6. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в

электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.

7. Столович Н.Н., Минецкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. – Минск: Наука и техника, 1975. – 160 с.

8. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.

9. 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.

10. Comsol Multiphysics. – [www.comsol.com](http://www.comsol.com).

11. Rantanen M. The "UPCAST" method of producing copper wire // Wire industry. – 1976. – No 511. – Pp. 565–567.

12. UPCAST Products: официальный сайт компании UPCAST. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>

[PDF](#)