

УДК 621.757

**МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ДЕТАЛЕЙ  
ПІД СКЛАДАННЯ У ПРОГРАМІ ELCUT**

©Романов С. В.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

**Романов Сергій Валерійович:** ORCID: 0000-0003-3770-1241; svrom@rambler.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У машинобудуванні для нагріву деталей під складання (розбирання) широко застосовуються індукційні нагрівачі з живленням обмотки струмами промислової частоти (50 Гц).

Різноманітність геометричних форм і розмірів деталей, що нагріваються, відмінність умов нагріву при зборці і розбиранні, визначають велике число вживаних конструктивних рішень. Крім того, накопичений експериментальний досвід і досвід використання нагрівачів у виробництві дозволяють практично на кожному кроці проектування забезпечити отримання найбільш ефективних технологічних рішень.

Вибір рішень, що задовольняють технічним вимогам складально-розбірних робіт (час і температура нагріву) складають мету математичного моделювання нагрівача.

У роботі дано порівняльний аналіз найбільш розповсюдженим пакетам інженерного аналізу у яких є можливість моделювання індукційного нагріву. Розглядаються питання застосування пакету ELCUT для моделювання електромагнітних і теплових задач. Наводиться приклад моделювання індукційного нагрівача для нагріву колеса веденого редуктора тепловоза ТУ-4.

**Ключові слова:** розбирання з'єднань; індуктор; індукційний нагрів; математичне моделювання.

**Романов С. В.** «Моделирование нестационарного индукционного нагрева деталей под сборку в программе ELCUT».

В машиностроении для нагрева деталей под сборку (разборку) широко применяются индукционные нагреватели с питанием обмотки токами промышленной частоты (50 Гц).

Разнообразие геометрических форм и размеров нагреваемых деталей, отличие условий нагрева при сборке и разборке, определяют большое число применяемых конструктивных решений. Кроме того, накопленный экспериментальный опыт и опыт использования нагревателей в производстве позволяют практически на каждом этапе проектирования обеспечить получение наиболее эффективных технологических решений.

Выбор решений, удовлетворяющих техническим требованиям сборочно-разборочных работ (время и температура нагрева) составляют цель математического моделирования нагревателя.

В работе дан сравнительный анализ наиболее распространенным пакетам инженерного анализа, в которых есть возможность моделирования индукционного нагрева. Рассматриваются вопросы применения пакета ELCUT для моделирования электромагнитных и тепловых задач. Приводится пример моделирования индукционного нагревателя для нагрева колеса ведомого редуктора тепловоза ТУ-4.

**Ключевые слова:** разборка соединений; индуктор; индукционный нагрев; математическое моделирование.

**Romanov S.** “Simulation of non-stationary induction heating of parts for assembly in the program ELCUT”.

In mechanical engineering for heating parts to the assembly (disassembly) are widely used induction heaters with coil currents of industrial frequency power (50 Hz).

A variety of geometric shapes and sizes of heated parts, unlike the heating conditions during assembly and disassembly, define a large number of constructive solutions used. In addition, the accumulated experience and experimental use in the production of heaters allow virtually every step of the design to ensure getting the most efficient technological solutions.

Selecting solutions that meet the technical requirements of assembly and disassembly work (time and heating temperature) is the goal of mathematical modeling of the heater.

The paper presents a comparative analysis of the most common engineering analysis packages, which have the possibility of modeling of induction heating. The application of ELCUT package for the simulation of electromagnetic and thermal problems. An example of an induction heater for heating simulation driven gear wheels of the locomotive TU-4.

**Key words:** disassembly of compound; inductor; induction heating; math modeling.

### **1. Постановка проблеми**

Невід’ємним атрибутом майже кожного агрегату в машинобудуванні є з’єднання з гарантованим натягом, які в більшості випадків більш технологічні, не вимагають додаткових деталей для кріплення, простіше у виготовленні, менш трудомісткі й найчастіше більше надійні в експлуатації, чим інші типи нерухомих з’єднань. Найбільш ефективним способом складання та розбирання з’єднань із натягом є тепловий, що передбачає нагрів деталі, що охоплює. Серед існуючих способів нагрівання деталей найбільш технологічним є індукційний спосіб [1]. Значною мірою підвищити продуктивність проектних і доводочних робіт при розробці індукційних нагрівачів дозволяє комп’ютерне моделювання з використанням сучасних систем автоматизованого проектування, а саме таких САПР, як SolidWorks, Компас, ANSYS, Femlab, ELCUT та ін.

### **2. Аналіз існуючих комп’ютерних пакетів для дослідження температурних полів**

Серед існуючого різноманіття програмних продуктів, призначених для вирішення польових задач, можна виділити чотири універсальних пакета такого роду. По-перше, це ANSYS – один з найпотужніших пакетів кінцево-елементарного аналізу. По-друге, Femlab, що інтегрується у MATLAB – найновіший пакет для вирішення польових задач. По-третє, SolidWorksSimulation (COSMOSWorks) – потужний і простий у використанні програмний комплекс для проведення інженерних розрахунків. Створений для потреб аерокосмічної промисловості, SolidWorksSimulation дозволяє вирішувати будь-які інженерні завдання. По-четверте ELCUT – практично єдиний російськомовний пакет, що є придатним для моделювання індукційно-нагрівального устаткування. Усі чотири пакети є універсальними, дозволяють вирішувати лінійні та нелінійні задачі та мають приблизно однакові точність та можливості. Основні відмінності пакетів представлені в таблиці 1.

**Таблиця 1** – Основні відмінності комп'ютерних пакетів інженерного аналізу

№	Можливості пакету	ANSYS	Femlab	SolidWorksSimulation	ELCUT
1	<i>Види аналізу</i>				
	Електромагнітний	так	так	так	так
	Тепловий	так	так	так	так
	Гідрогазодинамічний	так	так	так	так
	Механічний	так	так	так	так
	Об'єднаний (мультифізичний)	так	так	так	Тільки послідовний
2	<i>Тип розрахунку</i>				
	Динамічний	так	так	так	Для теплових задач
	Статичний	так	так	так	так
3	<i>Геометрична модель</i>				
	Двовірна	так	так	так	так
	Асиметрична	так	так	так	так
	Тривимірна	так	так	так	ні
4	Вибір типу кінцевого елемента	так	ні	так	ні
5	Можливість задавати ентальпію, як параметр матеріалу	так	ні	так	ні
6	Можливість моделювання зовнішніх електричних ланцюгів	так	так	так	ні

Пакет ANSYS має найбільшу кількість переваг. Це єдиний пакет серед згаданих, що дозволяє моделювати перехід матеріалу з твердого стану до рідини та навпаки (фазовий перехід). Однак складність інтерфейсу програми, велика кількість параметрів її налаштування та майже повна відсутність підручників по програмі на українській чи російській мовах ускладнюють її застосування.

Пакет Femlab володіє майже такими ж можливостями, що й пакет ANSYS. Його інтерфейс достатньо простий та зрозумілий. Крім того Femlab, по суті, є інструментом пакету MATLAB та працює під його керівництвом. Це означає, що усі можливості програмування, що доступні у MATLAB, можуть бути використані й у Femlab. Але також як і для першого пакету, для Femlab на даний момент відсутня документація на українській та російській мовах, що у значній мірі стримує його застосування.

SolidWorksSimulation повністю інтегрований до складу SolidWorks - системи автоматизованого проектування, інженерного аналізу і підготовки виробництва виробів будь-якої складності і призначення. Однак, суттєвою перешкодою у використанні цього програмного проекту є його вартість. Так стандартна комплектація SolidWorks коштує біля 8 400 американських доларів, комплектація SolidWorks Professional – 10 500 \$, а SolidWorks Premium – 13 900 \$. Таким чином, з огляду, на сучасне економічне становище в Україні, придбання такого програмного пакету є дуже проблематичним.

Серед програм, що розглядаються ELCUT, на перший погляд, має обмежені можливості. Однак деякі обмеження достатньо легко долаються. Наприклад, ELCUT не дозволяє моделювати

## Технологія машинобудування

тривимірні об'єкти, однак устаткування для індукційного нагріву, з точки зору геометрії, є звичайним тілом оберту, а вісесиметричні задачі за допомогою ELCUT можуть вирішуватись. Найбільш суттєвим недоліком ELCUT є те, що в цій програмі на сьогоднішній день відсутня можливість одночасного вирішення кількох польових задач (наприклад, електромагнітної та теплової). Це не дозволяє автоматично враховувати зміну властивостей матеріалів у процесі розрахунку. Наприклад, неможна врахувати зміну магнітної проникності металу, що нагрівається устаткуванням при зміні його [металу] температури. Цей недолік можна частково подолати, поділивши відрізок часу, на якому здійснюється тепловий розрахунок, на кілька окремих ділянок. На кожній з таких ділянок необхідно попередньо вирішувати електромагнітну задачу з новими значеннями властивостей матеріалів.

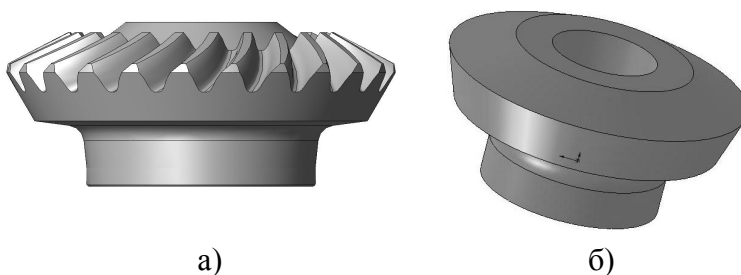
Перевагою ж ELCUT безумовно є наявність російськомовної версії, документації на російській мові, велика кількість прикладів, що поставляються з програмою, розвинуті можливості що до обробки результатів розрахунку (розрахунок індуктивностей, місткостей, зусиль та ін.), а також наявність поширеної безкоштовної студентської версії програми.

На основі проведеного аналізу та порівняння існуючих на даний момент пакетів дослідження на основі метода кінцевих елементів зробимо висновок, що використання програми ELCUT цілком виправдано.

### 3. Основна частина

Процес нестационарного технологічного нагріву розглянемо на прикладі колеса відомого редуктора тепловозу ТУ-4 (рисунок 1, а). Оскільки досліджувана деталь вісесиметрична, теплова задача двовимірна. Індукційний нагрівач (ІНУ) в радіальному напрямку нагріває об'єкт, що, надалі розглядатиметься як окрему циліндричну деталь простої форми (рисунок 1, б). Буде змодельоване нагрів при використанні індуктору звичайної форми та ступінчатої (що повторює форму досліджуваної деталі).

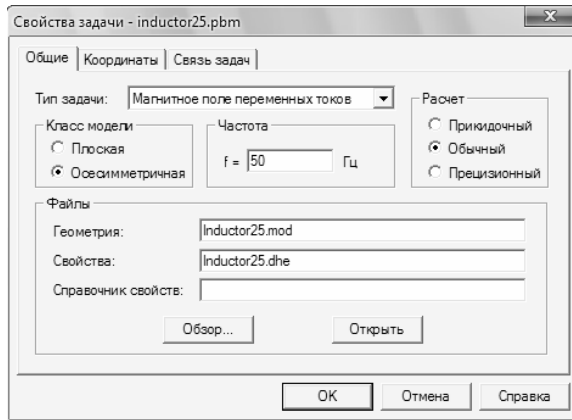
Дане спрощення прийняте через можливість локалізації й високої швидкості індукційного нагрівання. Локалізація обумовлена ефектом близькості – інтенсивно нагрівається тільки та частина деталі, що перебуває в безпосередній близькості до індукційної котушки. При індукційному нагріванні деталі у вигляді порожнього циліндра, вихрові струми будуть наводитися як на зовнішній поверхні циліндра, так і на його внутрішній поверхні. Причому, якщо загальна кількість теплоти, необхідна на нагрівання деталі взяти 100 %, то за рахунок нагрівання зовнішньої поверхні виділиться близько 75 % тепла, а внутрішньої – порядку 25 %.



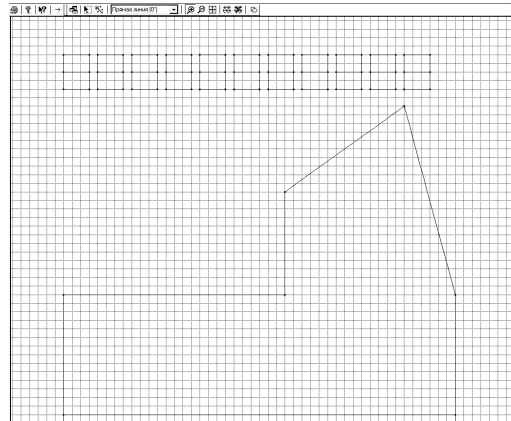
**Рис. 1** – Тривимірна модель досліджуваної деталі: а) зубчасте колесо; б) умовно-спрощене зображення

Створюємо задачу для магнітного поля змінного струму (рисунок 2).

Комп'ютерне моделювання процесу нагріву у програмі «Elcut» 5.1 починається з побудови геометричної моделі деталі та індуктора (рисунок 3).

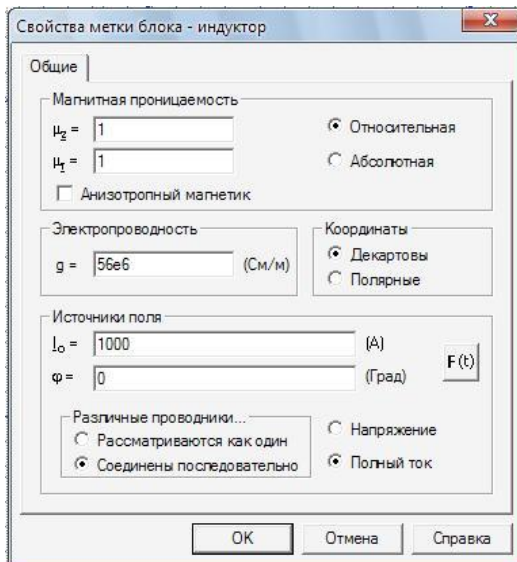


**Рис. 2** – Введення параметрів теплової задачі у діалоговому вікні «ELCUT»

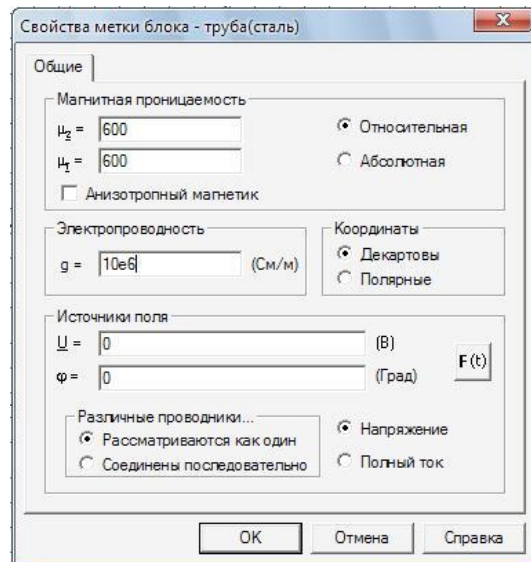


**Рис. 3** – Геометрична модель деталі у робочому вікні програми «Elcut»

На наступному етапі задаються властивості для індуктора, деталі та повітря, як на рисунках 4, 5 та 6. Сітку KE та теплову карту програма буде автоматично.



**Рис. 4** – Робоче вікно програми «Elcut» для задання властивостей індуктору



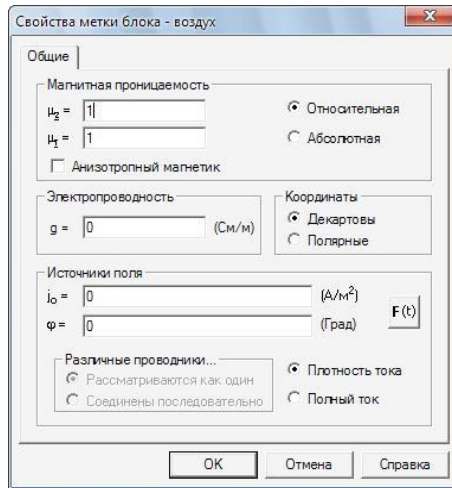
**Рис. 5** – Робоче вікно програми «Elcut» для задання властивостей деталі

Далі для роботи з програмою «ELCUT» необхідно задати вихідні умови для процесу, що буде моделюватися. У нашому випадку це буде матеріали деталі, індуктора та їх властивості. Крім того необхідно встановити граничні умови для розрахунку. За матеріал досліджуваної деталі приймаємо сталь, матеріал індуктору – мідь. Тривалість нагрівання – 300 с.

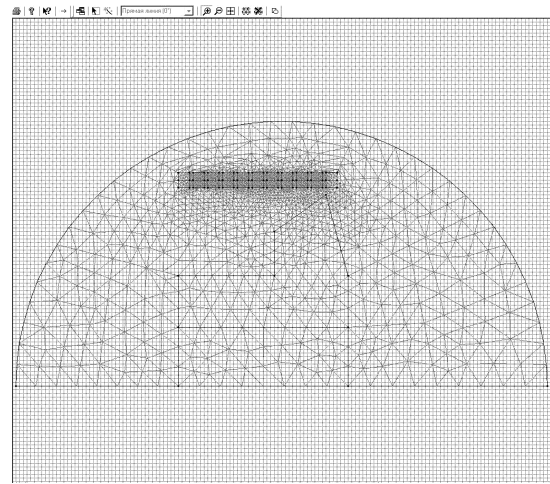
Тепер програма автоматично буде створювати сітку KE для розрахунку теплової задачі, як зображено на рисунку 3.

Після того, як пакет «ELCUT» промоделивав тепловий нагрів деталі у випадку використання індуктора звичайної та ступінчатої форми, отримуємо результати, зображені на рисунках 8 та 9 відповідно.

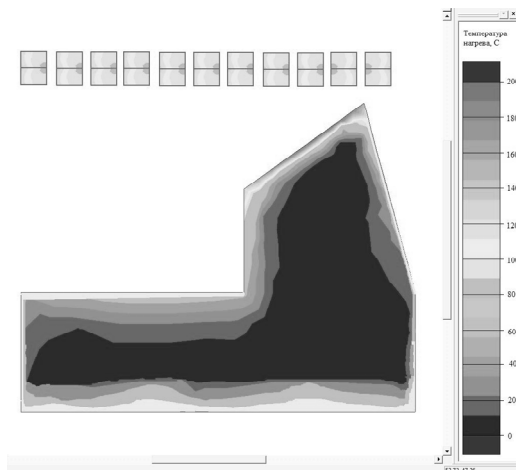
Таким чином, в результаті проведеної роботи була створена і випробувана математична модель нестационарної задачі і програма, що реалізує розрахунок нагріву тіла методом кінцевих елементів. Програма тестувалася на прикладі нагріву колеса відомого редуктора тепловозу ТУ-4 індуктором звичайної та ступінчатої форми.

**Технологія машинобудування**

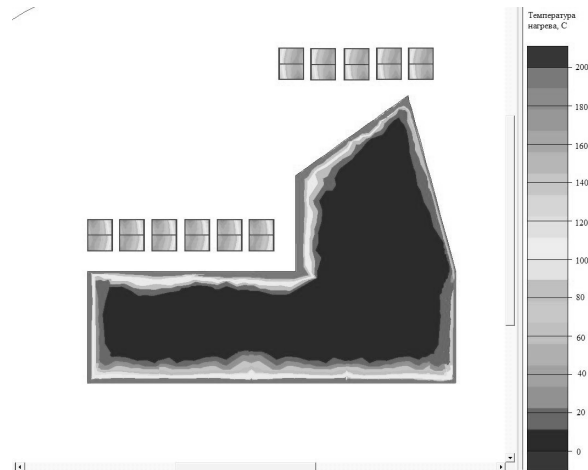
**Рис. 6** – Робоче вікно програми «Elcut» для завдання властивостей повітря



**Рис. 7** – Сітка КЕ для розрахунку теплової задачі



**Рис. 8** – Нагрівання індуктором циліндричної форми у протязі 300 с



**Рис. 9** – Нагрівання індуктором ступінчатої форми у протязі 300 с

З отриманих результатів видно, що розподілення тепла по даній деталі відбувається нерівномірно, якщо нагрів проводиться індуктором звичайної форми. Таке явище призводить до перегріву одних ділянок деталі та недогріву інших. Це має прямий вплив на погіршення якості деталі, призначеної під складання. У цьому випадку деталь може чи зовсім не бути придатною до операції складання, чи не мати відповідного натягу після складання, що неприпустимо.

Це виправляється, коли індуктор повторює форму деталі та його обмотка знаходиться на рівній відстані від усіх поверхонь деталі. У даному випадку, тепло значно оптимальніше розподіляється по поверхні деталі, що у разі покращує властивості деталі, призначеної під складання.

#### Список використаних джерел:

1. Андреев Г. Я. Тепловая разборка соединений с натягом / Г. Я. Андреев, Б. М. Арпентьев, Б. Г. Кокшенев // *Технология и организация производства*. – 1972. – № 1. – С. 96-99.
2. Прерис А. М. Компьютерная графика / А. М. Прерис. – Харьков : Штрих, 2003. – 256 с.
3. Системы автоматизации проектирования и подготовки производства и конкурентоспособность машиностроительной продукции / А. Н. Куцын, В. М. Чернышев, В. С. Сергиенко, Н. Г. Мельник // *Сборник научных трудов ХИСП*. – Харьков. – 1998. – Вып. 3.

#### References

1. Andreev, G, Arpentyev, B & Kokshenev, B 1972, 'Teplovaya razborka soyedineniy s natyagom', *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva*, no. 1, pp. 96-99.
2. Preris, A 2003, *Kompyuternaya grafika*, Shtrikh, Kharkiv.
3. Kutsyn, A, Chernyshev, V, Sergiyenko, B & Melnik, N 1998, 'Sistemy avtomatizatsii proektirovaniya i podgotovki proizvodstva i konkurentosposobnost mashinostroitelnoy produktsii', *Sbornik nauchnykh trudov KhISP*, iss. 3.

Стаття надійшла до редакції 28 листопада 2016 р.