



Индуктивни грејачи у транспорту флуида

Inductive Heaters in Fluid Transfer

Новица Марковић, Дејан Јеркан, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај – У раду је анализирана примена индуктивних грејача у транспорту флуида. Разматрани су проблеми таложења парафина и повећања вискозности нафте при снижавању температуре, као и значај одржавања температуре флуида изнад тачке стињавања. Представљен је принцип рада индуктивног грејања заснован на електромагнетној индукцији, уз анализу *skin* ефекта и дубине продирања електромагнетног поља у челичне цевоводе. У оквиру рада извршен је прорачун параметара индуктивног грејача за конкретан цевоводни систем, са циљем одређивања потребних електричних и електромагнетних величина за ефикасно загревање цевовода. Анализа показује да индуктивно грејање представља енергетски ефикасно и поуздано решење за примену у системима транспорта флуида.

Кључне речи (три до пет): индуктивни грејач, транспорт нафте, парафин, *skin* ефекат, електромагнетна индукција

Abstract – This study analyzes the application of inductive heaters in fluid transport. It considers the problems of paraffin deposition and the increase in oil viscosity at lower temperatures, as well as the importance of maintaining fluid temperature above the pour point. The principle of inductive heating based on electromagnetic induction is presented, together with an analysis of the skin effect and the penetration depth of the electromagnetic field in steel pipelines. A calculation of inductive heater parameters for a specific pipeline system was carried out, with the aim of determining the necessary electrical and electromagnetic quantities for efficient pipeline heating. The analysis indicates that inductive heating is an energy-efficient and reliable solution for use in fluid transport systems.

Keywords: (three to five): inductive heater, oil transport, paraffin, skin effect, electromagnetic induction

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Јеркан, ванр. проф.

1. УВОД

Транспорт сирове нафте цевоводима представља основни и најекономичнији начин преноса великих количина флуида у нафтној индустрији. Савремени цевоводни системи омогућавају континуалан и поуздан транспорт нафте на великим растојањима, уз висок степен аутоматизације и релативно ниске оперативне трошкове. Међутим, током експлоатације и транспорта сирове нафте јављају се бројни технички изазови који директно утичу на поузданост и ефикасност рада система. Један од најзначајнијих проблема представља таложење парафина унутар цевовода, које настаје услед снижавања температуре нафте испод тачке стињавања. Таложење парафина доводи до повећања вискозности флуида, смањења протока и повећаних падова притиска, док у екстремним случајевима може доћи и до потпуног зачепљења цевовода и прекида транспорта. Овакви проблеми су посебно изражени код високопарафинских сирових нафти и у условима ниских температура околине. Из тог разлога, у пракси се примењују различите методе за одржавање температуре нафте изнад критичне вредности, како би се обезбедио стабилан транспорт и спречило формирање парафинских наслага.

Једно од савремених решења за загревање цевовода представља примена индуктивних грејача. Индуктивно грејање заснива се на електромагнетној индукцији, при чему се топлота генерише директно у металу цевовода услед појаве вртложних струја. Овакав начин грејања омогућава високу енергетску ефикасност, смањене топлотне губитке и одсуство директног контакта грејног елемента са флуидом, што га чини погодним за примену у нафтној индустрији. Посебан значај има примена нискофреквентног индуктивног грејања код масивних челичних цевовода, где је потребно остварити већу дубину продирања електромагнетног поља и равномерније загревање.

У овом раду разматрана је примена индуктивних грејача у транспорту флуида. Анализиран је принцип рада индуктивног грејања, утицај *skin* ефекта и дубине продирања електромагнетног поља, као и прорачун основних параметара индуктивног грејача за конкретан цевоводни систем. Циљ рада је да се прикаже применљивост индуктивног грејања као енергетски ефикасног и поузданог решења за

спречавање таложења парафина и обезбеђивање стабилног транспорта флуида.

2. ТЕРМИЧКИ ПРОБЛЕМИ У ТРАНСПОРТУ НАФТЕ

Транспорт сирове нафте кроз цевоводне системе праћен је бројним техничким изазовима који директно утичу на поузданост, ефикасност и економичност рада транспортног система. Један од најзначајнијих проблема представља промена реолошких особина нафте услед снижавања температуре током транспорта. Ова појава је посебно изражена код парафинских сирових нафти, које садрже значајан проценат парафинских угљоводоника.

При паду температуре испод одређене критичне вредности долази до кристализације и таложења парафина на унутрашњим зидовима цевовода као што је приказано на слици 1. Формирање парафинских наслага доводи до смањења ефективног попречног пресека цевовода, повећања хидрауличких отпора и пада протока. Истовремено, долази до повећања вискозности нафте, што додатно отежава транспорт и повећава потребну снагу пумпних система. У екстремним случајевима може доћи до потпуног зачепљења цевовода и прекида транспорта.

Интензитет таложења парафина директно зависи од температуре флуида, садржаја парафина у нафти, брзине струјања, као и температуре околине. Посебан значај има температура стињавања нафте, која представља најнижу температуру при којој нафта задржава способност течења. Код високопарафинских нафти температура стињавања може бити релативно висока, што представља значајан проблем у условима ниских спољашњих температура и транспорта на већим растојањима. У табели 1. дата је корелација између садржаја парафина и тачке стињавања односно течења нафте.



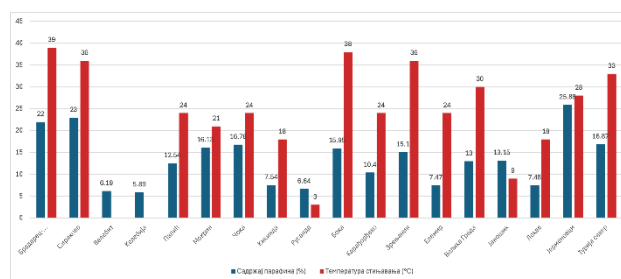
Слика 1. Приказ последице парафина у нафти [4][1]

Табела 1. Корелација између садржаја парафина и тачке
течења нафте [2]

Садржај парафина (%)	Тачка стињавања (°C)
12,7	23
15,4	27
18	29
23	33
29,3	36

Проблем таложења парафина присутан је и у домаћој производњи нафте. Сирова нафта која се експлоатише у Србији претежно припада парафинском типу, при чему значајан број лежишта карактерише висок садржај парафина и повишена температура стињавања. На слици 2. дат је приказ садржаја парафина (%) и температуре стињавања (°C) сирове нафте за различита нафтна поља у Србији. Због тога је неопходна примена различитих метода за одржавање температуре нафте током транспорта, како би се спречило формирање наслага и обезбедио континуалан рад цевоводног система.

У циљу решавања наведених проблема примењују се хемијске и термичке методе. Хемијске методе заснивају се на употреби адитива који смањују тенденцију кристализације парафина, док термичке методе подразумевају одржавање температуре нафте изнад тачке стињавања. У оквиру термичких метода значајно место заузимају системи активног загревања цевовода, међу којима се индуктивно грејање издваја као енергетски ефикасно и технички поуздано решење.



Слика 2. Приказ садржаја парафина (%) и температуре стињавања (°C) сирове нафте за различита нафтна поља у Србији [3]

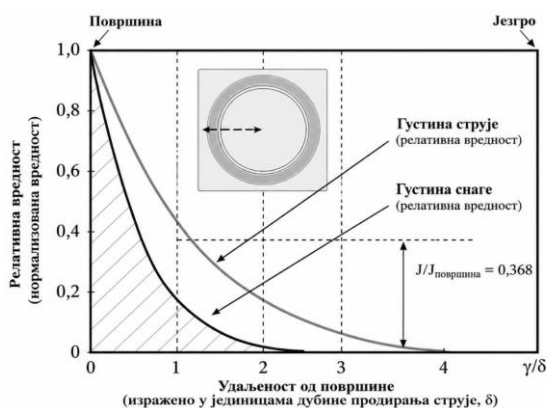
3. ИНДУКТИВНИ ГРЕЈАЧ

Индуктивно грејање представља метод загревања заснован на електромагнетној индукцији, при чему променљиво магнетно поље индуктора изазива појаву вртложних струја у електрично проводном материјалу. Услед електричне отпорности материјала, енергија индукованих струја дисипира се у облику топлоте, чиме долази до директног загревања радног комада. Код феромагнетних материјала, као што су челични цевоводи, процесу загревања додатно доприносе и хистерезни губици. За разлику од конвенционалних метода загревања, код индуктивног грејања топлота се генерише директно у материјалу цеви, без потребе за посредним преносом топлоте. На тај начин смањују се топлотни губици и повећава енергетска ефикасност система. Овакве карактеристике чине индуктивно грејање погодним за примену у цевоводним системима за транспорт нафте, где је неопходно одржавање температуре флуида изнад тачке стињавања. Један од феномена код индуктивног грејања представља *skin* ефекат. При протоку наизменичне струје густина струје није равномерно распоређена по попречном пресеку проводника, већ је концентрисана у површинским слојевима материјала, док према унутрашњости експоненцијално опада. Последица ове појаве је да се највећи део топлоте генерише у близини површине материјала. Расподела густине струје описује се изразом (1) и приказана је на слици 3:

$$J = J_0 \cdot e^{-\frac{r}{\delta}} \quad (1)$$

где су:

- J_0 – густина струје на површини
- r – удаљеност од површине
- δ – дубина продирања



Слика 3. Расподела густине струје и густине снаге услед *skin* ефекта [1][4]

За квантитативни опис *skin* ефекта уводи се дубина продирања електромагнетног поља δ , која представља растојање од површине проводника до тачке у којој густина струје опада на $\frac{1}{e}$ своје максималне вредности. Дубина продирања зависи од електричне отпорности,

магнетне пермеабилности материјала и фреквенције напајања, а одређује се изразом (2):

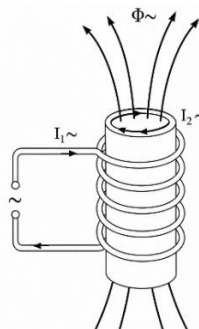
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi f \mu}} \quad (2)$$

Из наведеног израза види се да дубина продирања опада са порастом фреквенције, док ниске фреквенције омогућавају веће продирање електромагнетног поља у материјал. Због тога је мрежна фреквенција од 50 Hz погодна за загревање масивних челичних цевовода, јер омогућава равномерније и запреминско загревање. У оквиру овог рада разматра се индуктивни грејач намењен загревању челичног цевовода за транспорт сирове нафте. Индуктор је реализован спиралним намотавањем проводника око цеви, као што је приказано на слици 4, чиме се формира променљиво магнетно поље које индукује вртложне струје у зиду цевовода (слика 5).



Слика 4. Приказ намотавања индуктивног грејача

Значај индуктивног грејања у транспорту нафте огледа се у могућности ефикасног и равномерног загревања цевовода, без директног контакта грејног елемента са флуидом. На тај начин смањују се топлотни губици и повећава поузданост система, што индуктивно грејање чини погодним решењем за спречавање таложења парафина у цевоводима.



Слика 5. Принцип рада индуктивног грејача

4. ПРОРАЧУН ИНДУКТИВНОГ ГРЕЈАЧА

У овом поглављу разматра се прорачун индуктивног грејача. Прорачун се односи на загревање челичног цевовода израђеног од челика API 5L Grade B, при мрежној фреквенцији напајања од 50 Hz. Као проводник индуктора усвојен је бакарни проводник са силиконском изолацијом, намотан спирално око цевовода, који се налази у надземном делу транспортног система. На основу усвојене снаге и параметара система, прорачуном се одређују основни електрични и геометријски параметри индуктивног грејача, пре свега потребан број намотаја индуктора и струја која протиче кроз намотај.

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}, \quad (4)$$

Дубина продирања за бакар:

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

$$\sigma_{cu0} = 56 \cdot 10^6 \frac{S}{m} \text{ при } 20^\circ C$$

Температурни коефицијент је $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C}$

Специфична проводност за различите температуре следи из:

$$\sigma_{cu} = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (6)$$

Из (5) и (6) на температури 45 °C проводност бакра је $50,9 \cdot 10^6 \left[\frac{S}{m} \right]$.

Рачунајући на исти начин за секундар (цев):

$$\sigma_{steel0} = 7,7 \cdot 10^6 \left[\frac{S}{m} \right] \text{ при } 20^\circ C$$

$$\sigma_{steel} = 7 \cdot 10^6 \left[\frac{S}{m} \right] \text{ при } 45^\circ C.$$

За одређивање геометрије намотаја индуктивног грејача уводи се фактор пуњења намотаја, који представља однос између попуњености простора проводником и укупне дужине грејача:

$$g = \frac{d \cdot \pi \cdot W}{4 \cdot L} \quad (7)$$

где су:

g – фактор пуњења

d – пречник проводника

W – број намотаја

L – дужина грејача

Због *skin* ефекта и потискивања струје у намотају, реалне вредности активног и реактивног отпора

примара разликују се од вредности добијених једноставним прорачуном. Ови ефекти доводе до повећања ефективног отпора проводника, па је у прорачуну неопходно увести корекционе факторе за активни и реактивни отпор примара:

$$Kr = \sqrt{2} \cdot \frac{A \cdot C + B \cdot D}{C^2 + D^2} \quad (7)$$

$$Kx = \sqrt{2} \cdot \frac{B \cdot C - A \cdot D}{C^2 + D^2} \quad (8)$$

где су:

$$A = \text{ber}X_k \cdot \text{ker}'X_b - \text{bei}X_k \cdot \text{kei}'X_b - \text{ber}'X_b \cdot \text{ker}X_k + \text{bei}'X_b \cdot \text{kei}X_k \quad (9)$$

$$B = \text{bei}X_k \cdot \text{ker}'X_b + \text{ber}X_k \cdot \text{kei}X_b - \text{ber}X_b \cdot \text{kei}X_k - \text{bei}X_b \cdot \text{ker}X_k \quad (10)$$

$$C = \text{ber}X_k \cdot \text{ker}X_b - \text{bei}X_k \cdot \text{kei}X_b - \text{ber}X_b \cdot \text{ker}X_k + \text{bei}X_b \cdot \text{kei}X_k \quad (11)$$

$$D = \text{bei}X_k \cdot \text{ker}X_b + \text{ber}X_k \cdot \text{kei}X_b - \text{ber}X_b \cdot \text{kei}X_k - \text{bei}X_b \cdot \text{ker}X_k \quad (12)$$

Функције *ber*, *bei*, *ker*, *kei* односно њихове деривације *ber'*, *bei'*, *ker'*, *kei'* су Келвинове функције, док су аргументи X_k и X_b односи полупречника кривине намотаја према дубини продирања електромагнетног таласа:

$$X_k = \sqrt{2} \cdot \frac{r_1}{\delta_{cu}} \quad (13)$$

$$X_b = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\delta_{cu}} \quad (14)$$

Расипни ток између примара и секундара сразмеран је површини кружног прстена између два калема, магнетној пермеабилности ваздуха и фреквенцији, па се импеданса може изразити као:

$$Z_R = \frac{W^2}{L} \cdot \omega \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{d_1'^2 - d_2'^2}{4} \quad (15)$$

где су:

$$d_1' = d_1 + \delta_{cu} \quad (16)$$

$$d_2' = d_2 + \delta_{steel} \quad (17)$$

Односно сведено на један завој једначине дужине

$$Z_{R1} = \frac{Z_R \cdot L}{W} \quad (18)$$

Потребан број намотаја грејача може се извести преко Поингтовог вектора струјања густине енергије па број намотаја износи:

$$W = \frac{\mu \cdot U^2}{L \cdot P_2} \cdot \frac{A}{A^2 + B^2} \quad (19)$$

P – снага индуктивног грејача

Члан A је израз:

$$A = \frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} \cdot k_r + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} \quad (20)$$

Члан В је израз:

$$B = \frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} k_x + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} + \omega \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{d_1'^2 - d_2'^2}{4} \quad (21)$$

Где је последњи члан од „В” расипни индуктивни Z_{R1} . Степен корисности грејача је однос развијене топлоте у секундару према укупној утрошеној енергији. Како су сразмерне отпорима на примару и секундару следи:

$$\eta = \frac{R_{I2}}{R_1 + R_{I2}} \quad (22)$$

Отпори се односе као:

$$\frac{R_{I2}}{R_1} = \frac{W^2 \cdot R_2}{R_1} = \frac{\frac{W^2 \cdot d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_{steel} \cdot L}}{\frac{W^2 \cdot d_1 \cdot \pi \cdot K_r}{\sigma_{cu} \cdot \delta_{cu} \cdot g \cdot L}} = \frac{\sigma_{cu} \cdot \delta_{cu} \cdot g \cdot d_2}{\sigma_{steel} \cdot \delta_{steel} \cdot K_r} \quad (23)$$

Из израза (20), (21) и (23) добијају се чланови који су потребни за прорачун броја намотаја грејача (19).

За прорачун струје коју грејачи узимају из мреже треба израчунати импедансу сваког грејача која се састоји од отпора примара и секундара, те од индуктивности примара, секундара и расипног тока и изводи се из Максвелових једначина за електромагнетне таласе да импеданса грејача сведене на стезаљке примара износи:

$$Z = \frac{W^2}{L} \cdot \left[\frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} \cdot k_r + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} + j \left(\frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} \cdot k_x + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} + \omega \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{d_1'^2 - d_2'^2}{4} \right) \right] \quad (24)$$

Израз се своди на:

$$Z = \frac{W^2}{L} \cdot [A + jB] \quad (25)$$

Струја грејача се добија из:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (26)$$

Приказани изрази представљају основу за одређивање основних електричних и геометријских параметара индуктивног грејача.

5. ЗАКЉУЧАК

У раду је анализирана примена индуктивних грејача у транспорту флуида кроз челичне цевоводе. Размотрени су проблеми таложења парафина и повећања вискозности нафте услед снижавања температуре, као и значај одржавања температуре флуида изнад тачке стињавања ради обезбеђивања поузданог транспорта.

Приказан је принцип рада индуктивног грејања заснован на електромагнетној индукцији, уз анализу *skin* ефекта и дубине продирања електромагнетног поља у материјал цевовода. У оквиру рада приказан је поступак прорачуна основних параметара

индуктивног грејача, при чему су разматрани електрични и електромагнетни параметри неопходни за одређивање броја намотаја и струје индуктора.

На основу приказаних теоријских основа може се закључити да индуктивно грејање представља енергетски ефикасно и перспективно решење за загревање цевовода и спречавање таложења парафина у системима транспорта нафте.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] World Iron & Steel Co., LTD.
- [2] Лабораторијско испитивање и симулација процеса таложења парафина у нафтној бушотини поља Турија у Војводини, Душан Ш. Даниловић, Весна Д. Каровић Маричић, Радмила М. Шећеров Соколовић, Дејан Д. Ивезић, Марија А. Живковић.
- [3] Анализа параметара цевоводног транспорта сирове нафте, Јасна Толмач, Славица Првуловић, Марија Недић и Драгиша Толмач.
- [4] Oil and gas production handbook, Håvard Devold.
- [5] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, *Handbook of Induction Heating*, CRC Press, Boca Raton, 2017.

Кратка биографија:

Новица Марковић рођен је у Ваљеву 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Дистрибуирани енергетски ресурси и паметне мреже одбранио је 2026. год.

Контакт:
novicamarkovi00@gmail.com

Дејан Јеркан је ванредни професор на Факултету техничких наука у Новом Саду, на Катедри за Енергетску електронику и претварање. Област интересовања су му моделовање и дијагностика електричних машина, као и метода коначних елемената.