

PIOTR URBANEK, JACEK KUCHARSKI, ANDRZEJ FRĄCZYK
Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

SYMULACJA NAGRZEWANIA DIELEKTRYCZNEGO WILGOTNEJ WSTĘGI PAPIERU

Artykuł prezentuje modelowanie numeryczne nagrzewania pojemnościowego wilgotnej wstęgi papieru. Symulacje wykonano dla kilku geometrii elektrod suszarni pojemnościowych, badając wpływ ich kształtu oraz warunków zasilania na rozkład temperatury wydzielanej w suszonej wstędze.

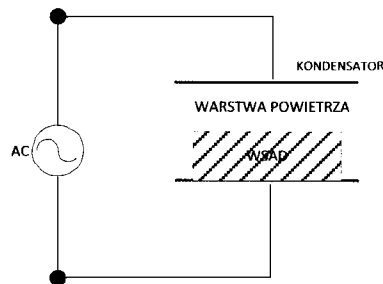
WPROWADZENIE

Produkcja różnych rodzajów papieru wymaga zapewnienia procesu cyklicznego suszenia oraz zraszania wilgotnej wstęgi papieru. Obecnie proces ten odbywa się poprzez kontakt wstęgi papieru z sekcjami nagrzanych kalandrów, których nagrzewanie może odbywać się metodą tradycyjną, polegającą na wprowadzeniu do ich wnętrza czynnika o odpowiedniej temperaturze lub metodą ulepszoną, wykorzystującą np. nagrzewanie indukcyjne obracających się kalandrów [1]. W nielicznych publikacjach pojawiały się informacje o możliwości wykorzystania metody nagrzewania pojemnościowego do suszenia przesuwanej się wilgotnej wstęgi papieru [2]. Najczęściej jednak były one ogólne i skupiały się na prezentacji możliwości instalacji tego typu nagrzewania w maszynach papierniczych, tudzież analizie ciepła generowanego w suszonym wsadzie, wykorzystując do tego celu ogólną teorię wytwarzania ciepła na skutek przepływu prądu polaryzacji przez ciało sprzężone pojemnościowo z kondensatorem zasilanym prądem o częstotliwości od kilku do kilkudziesięciu megaherców.

W niniejszym artykule przedstawiono wpływ różnych kształtów elektrod suszarni pojemnościowych oraz sposobów ich rozmieszczenia nad wstęgą papieru na rozkład i wartość generowanego prądu polaryzacji w przestrzeni grzejnej i sprzężonego z nim rozkładu temperatury w suszonej wstędze dla czterech, najczęściej wykorzystywanych w nagrzewaniu pojemnościowym, częstotliwości pola elektromagnetycznego.

1. CHARAKTERYSTYKA NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO

Nagrzewanie pojemnościowe wykorzystuje efekt przepływu prądu przesunięcia przez ciało stałe lub ciecz umieszczone między okładkami kondensatora będącego częścią obwodu przenoszącego energię przemiennego pola elektromagnetycznego o częstotliwości od kilku do kilkudziesięciu megaherców. Ogólną ideę nagrzewania dielektrycznego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Idea układu nagrzewania pojemnościowego

W nagrzewaniu tego typu wektor gęstości prądu pojemnościowego w przestrzeni kondensatora opisany jest wzorem [2]:

$$J_x = j\omega\varepsilon' E \quad (1)$$

gdzie: ω – pulsacja pola elektrycznego, ε' – składowa rzeczywista przenikalności dielektrycznej ośrodka, E – natężenie pola elektrycznego.

Moc objętościowa w układzie płaskorównoległościennym dana jest wzorem:

$$p_v = \omega\varepsilon' \operatorname{tg}\delta E^2 = \omega\varepsilon' \operatorname{tg}\delta \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (2)$$

gdzie: $\operatorname{tg}\delta$ – współczynnik stratności dielektrycznej, U – napięcie między okładkami kondensatora, d – odległość między jego okładkami.

Wartości ε' oraz $\operatorname{tg}\delta$ we wzorze (2) są współczynnikami materiałowymi ośrodka, natomiast pozostałe współczynniki zmieniają się wraz z geometrią układu kondensatora oraz warunków jego zasilania. Powyższe wzory opisują jedynie układ płaskorównoległościenny kondensatora suszącego. Inne geometrie elektrod nagrzewnic wymagają symulacji numerycznej rozkładu mocy w przestrzeni kondensatora.

2. ZAŁOŻENIA WSTĘPNE PRZYJĘTE W SYMULACJI NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO WILGOTNEJ WSTĘGI PAPIERU

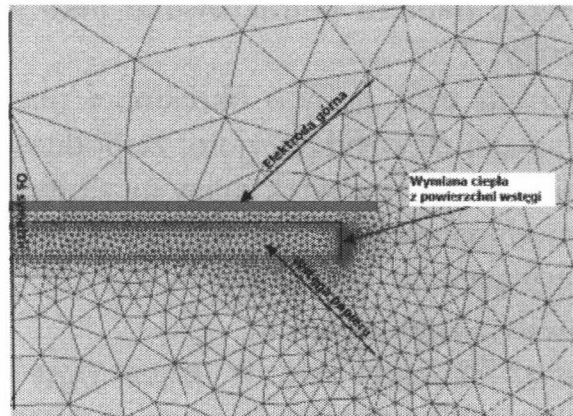
Mając na względzie opisany w poprzednim rozdziale charakter wydzielania się objętościowej mocy cieplnej, wykonano szereg symulacji nagrzewania pojemnościowego wilgotnej wstęgi papieru. W symulacjach przyjęto następujące założenia:

- wilgotną wstęgę papieru potraktowano jako jednorodną mieszaninę celulozy i wody;
- zakładając krótki czas pobytu określonej masy wstęgi papieru pod pojedynczą sekcją elektrod przyjęto, że podczas procesu nagrzewania nie występuje znaczący ubytek masy na skutek parowania; symulacje zjawisk termodynamicznych zachodzących w nagrzewanej objętości mokrej wstęgi papieru wymagają osobnych symulacji i wykraczają poza ramy niniejszego artykułu;
- założono niezmienną w czasie wartości współczynników materiałowych wody i papieru;
- przyjęto, że szerokość wstęgi papieru wynosi 1,5 m, a długość elektrod 0,75 m; daje to możliwość ograniczenia liczby węzłów obliczeniowych, zmniejszając znacząco czas obliczeń;
- przyjęto, że prędkość wstęgi papieru wynosi około 60 km/h, zatem czas przebywania wstęgi w kondensatorze wynosi nie więcej niż 0,04 s; w symulacjach przyjęto czas nagrzewania równy 0,03 s;
- symulacje nagrzewania wykonano dla 4 typowych, używanych w nagrzewaniu pojemnościowym, częstotliwości pola elektromagnetycznego, tj, dla: 13,56 MHz 27,12 MHz, 40,68 MHz oraz 81,36 MHz [2].

Celem przedstawionych symulacji jest próba określenia rozkładu pola elektrycznego i sprzężonego z nim pola temperatury w układzie okładki kondensatora-wilgotna wstęga papieru dla różnych układów geometrycznych elektrod kondensatora. Ma to na względzie wskazanie najbardziej przydatnych, z punktu widzenia technologii produkcji papieru, układów geometrycznych ze względu na rozkład temperatury wzdłuż szerokości wstęgi papieru. Praca ma na celu uzyskanie poglądowej wiedzy z zakresu pojemnościowego suszenia i dosuszania wstęgi papieru.

3. SYMULACJA NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO WILGOTNEJ WSTĘGI PAPIERU W KLASYCZNYM UKŁADZIE KONDENSATORA PŁASKIEGO

Klasyczny układ kondensatora płaskiego obejmuje dwie płaskie elektrody, pomiędzy którymi umieszczona jest przesuwaną się wstęga papieru (rys. 1). W układzie takim metalowe sito, na którym umieszczona jest wstęga papieru, stanowi elektrodę dolną kondensatora.



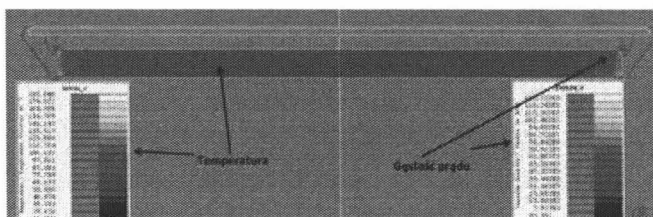
Rys. 2. Model symulacyjny układu kondensator płaski – wilgotna wstęga papieru

W tych i pozostałych symulacjach przyjęto następujące wartości współczynników materiałowych oraz warunki brzegowe:

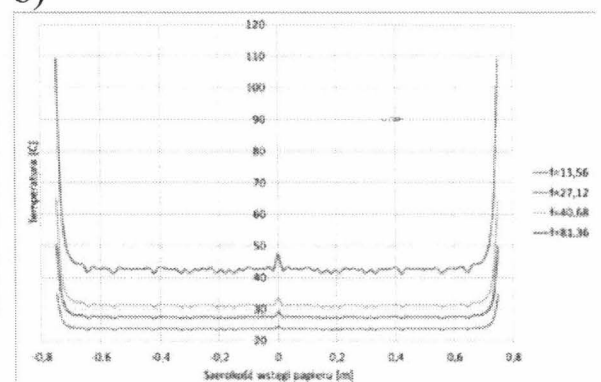
wstęga papieru: przenikalność dielektryczna względna $\epsilon_r = 80$, przewodność cieplna $\lambda = 500 \text{ W/mK}$, iloczyn gęstości i ciepła właściwego $\rho c = 4,11 \text{ J/m}^3\text{K}$, współczynnik wymiany ciepła z powierzchni wstęgi $\alpha = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$, napięcie na elektrodzie górnej $U = 20 \text{ kV}$. Pozostały obszar określony został jako próżnia.

Wyniki obliczeń przedstawia rys. 3.

a)



b)



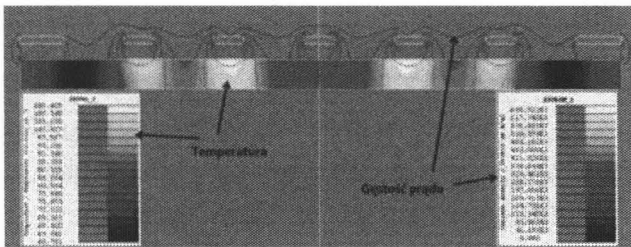
Rys. 3. a) przykładowy rozkład temperatury (lewa skala, kolor) i natężenia prądu przesunięcia w układzie kondensator – wstęga (prawa skala, linia), b) rozkład temperatury na powierzchni wstęgi papieru, f – częstotliwość pola elektromagnetycznego w MHz

Rozkład temperatury na powierzchni wstęgi wskazuje na wyraźny efekt wzrostu temperatury na krawędziach wstęgi papieru. Jest to jednak niewielki obszar mający nieduży wpływ na wartość średniej temperatury we wstędze papieru. Wskazuje to na konieczność kształtowania rozkładu temperatury poprzez układ szeregu elektrod umieszczonych odpowiednio nad powierzchnią wstęgi.

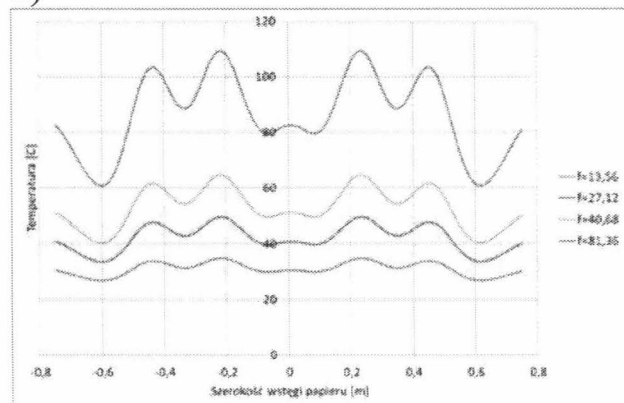
4. SYMULACJA NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO WILGOTNEJ WSTĘGI PAPIERU W UKŁADZIE WIELOSEKCYJNEGO KONDENSATORA PŁASKIEGO

W układzie tym występuje siedem kondensatorów zasilanych niezależnie. Przyjęto, że skrajne elektrody mają nieco większą niż pozostałe szerokość. Ponadto, ze względu na możliwość przegrzania końców wstęgi papieru, wartość napięcia na elektrodach skrajnych została obniżona o połowę, czyli do 10 kV. Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 4.

a)



b)



Rys. 4. a) przykładowy rozkład temperatury (lewa skala, kolor) i natężenia prądu przesunięcia w układzie elektrody płaskie- wstęga (prawa skala, linia),
b) rozkład temperatury na powierzchni wstęgi papieru, f – częstotliwość pola elektromagnetycznego w MHz

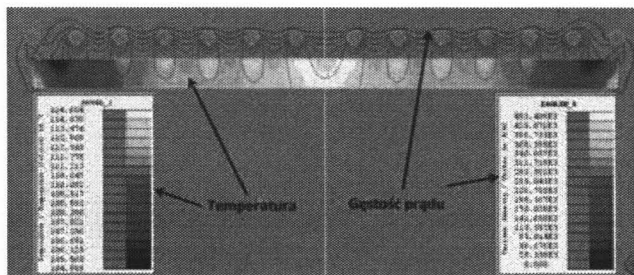
Wyniki obliczeń pokazane na rysunku 4a i 4b wskazują na możliwość kształtowania za pomocą napięcia zasilającego elektrody oraz jego częstotliwości rozkładu i poziomu temperatury wstęgi papieru. Oczywiście rozkład ten może być również kształtowany przez umieszczenie elektrod w wybranych z technologicznego punktu widzenia miejscach nad powierzchnią wstęgi. Można zauważyć, że częstotliwość pola elektromagnetycznego ma wpływ zarówno na poziom, jak i rozkład temperatury we wstędze papieru.

5. SYMULACJA NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO WILGOTNEJ WSTĘGI PAPIERU W UKŁADZIE WIELOSEKCYJNEGO KONDENSATORA Z ELEKTRODAMI CYLINDRYCZNYMI

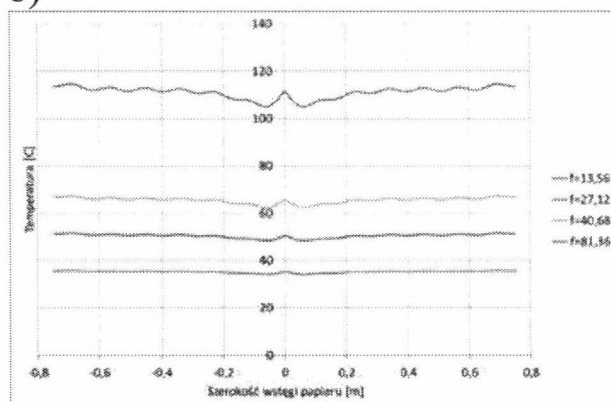
W rozdziale tym zasymulowano nagrzewanie pojemnościowe wstęgi papieru za pomocą czternastu elektrod cylindrycznych, umieszczonych równomiernie nad powierzchnią wstęgi papieru. Napięcie zasilające elektrody wynosi 20 kV (z wyjątkiem elektrod skrajnych, w których napięcie zasilające obniżono o połowę).

Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 5.

a)



b)

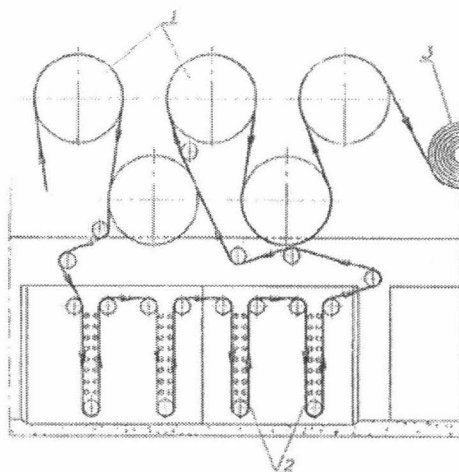


Rys. 5. a) przykładowy rozkład temperatury (lewa skala, kolor) i natężenia prądu przesunięcia w układzie elektrody cylindryczne – wstęga papieru (prawa skala, linia), b) rozkład temperatury na powierzchni wstęgi papieru, f – częstotliwość pola elektromagnetycznego w MHz

W powyższym układzie wyniki symulacji wskazują na możliwość uzyskania równomiernego rozkładu temperatury wzdłuż całej szerokości wstęgi papieru. Obserwowana jest również zależność mocy generowanej we wstędze papieru od częstotliwości pola elektromagnetycznego generowanego pomiędzy okładkami kondensatorów. W układzie tym, podobnie jak w poprzednich, elektrodę z potencjałem zerowym stanowi podłoże, na którym wstęga papieru jest przesuwana. Wydaje się, że zarówno z punktu widzenia prostoty konstrukcji, jak i rozkładu wytwarzanego pola elektromagnetycznego, układ ten stanowi najlepszy wybór.

6. SYMULACJA NAGRZEWANIA POJEMNOŚCIOWEGO WILGOTNEJ WSTĘGI PAPIERU W UKŁADZIE WIELOSEKCYJNEGO KONDENSATORA Z PODWÓJNYMI ELEKTRODAMI CYLINDRYCZNYMI

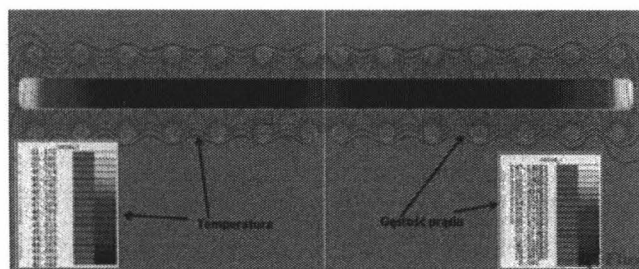
Układ ten podobny jest do układu z rozdziału 5. Różnicę stanowi zastosowanie dodatkowych elektrod cylindrycznych, stanowiących dolne okładki kondensatorów z potencjałem zerowym. Układ taki jest konieczny do zastosowania w układach, gdzie nagrzewanie pojemnościowe stosowane jest do dosuszania wstęgi papieru, która przesuwana jest pomiędzy cylindrami napędowymi pokazanymi na rysunku 6 [2].



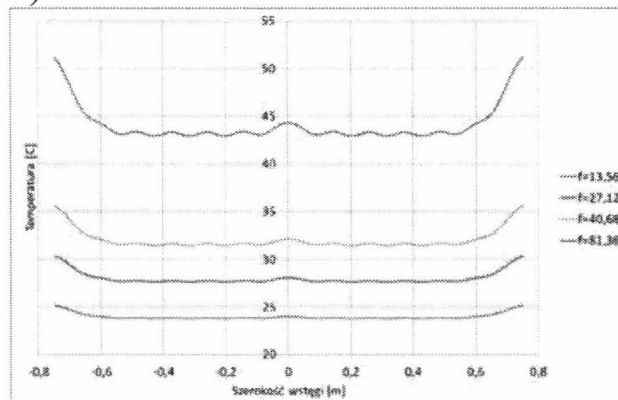
Rys. 6. Usytuowanie elektrod cylindrycznych w części suszącej maszyny papierniczej. 1 – bębny suszące, 2 – elektrody suszarki pojemnościowej, 3 – nawijarka

Wyniki obliczeń przedstawione są na rysunku 7.

a)



b)



Rys. 7. a) przykładowy rozkład temperatury (lewa skala, kolor) i natężenia prądu przesunięcia w układzie podwójnych elektrod cylindrycznych – wstęga (prawa skala, linia), b) rozkład temperatury na powierzchni wstęgi papieru, f – częstotliwość pola elektromagnetycznego w MHz

Przedstawione wyniki symulacji wskazują na nieco mniejszą sprawność układu, gdyż przy tym samym napięciu zasilającym sekcje kondensatorów cylindrycznych, wartość temperatury wstęgi papieru zmniejszyła się około dwukrotnie. Jednak zaletą takiego układu jest możliwość zastosowania go w częściach maszyny odizolowanych od bezpośredniego oddziaływania pola elektromagnetycznego w.cz na obsługę maszyny.

6. WNIOSKI

W artykule przedstawiono symulacje numeryczne suszenia mokrej wstęgi papieru w różnych układach geometrycznych suszarni pojemnościowych. Sprawdzone wpływ kształtu, rozkładu przestrzennego elektrod kondensatorów oraz częstotliwości napięcia zasilającego na rozkład i wartości temperatury w suszonej wstędze papieru.

Niniejsza praca stanowi wstęp do większego projektu modelowania suszenia pojemnościowego wilgotnej wstęgi papieru, uwzględniającego zarówno zagadnienia generowania energii pola elektrycznego, jej zamiany na ciepło wydzielane w suszonej wstędze, jak i zagadnienia termodynamiczne uwzględniające odparowanie wody z wilgotnej wstęgi papieru. W zamierzeniach powstać ma system pozwalający na numeryczną weryfikację projektów suszarni pojemnościowych w różnych typach maszyn papierniczych.

LITERATURA

- [1] Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J.: Algorytmy sterowania nagrzewaniem indukcyjnym wirującego walca stalowego za pomocą ruchomych wzbudników. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 86 NR 2/2010.
- [2] Hernig M.: Podstawy elektrotermii, cz. 2. WNT, Warszawa 1998.

SIMULATION OF DIELECTRIC HEAT OF WET PAPER WEB

Summary

The paper presents numerical modeling of heating the wet paper web. Simulations were performed for a few geometry of the capacitive drying electrodes examining the impact of their shape and supply conditions of temperature distribution dissipated in the dried web.

Keywords: capacitance heating, numerical modeling, temperature distribution.