

Metoda za spremljanje kakovosti izdelka v proizvodnji papirja

Tom BAJCAR, Andrej ŠINKOVEC, Aleš MALNERŠIČ,
Brane ŠIROK, Lovrenc NOVAK

Izveček: Predstavljena je vizualizacijska računalniško podprta metoda za spremljanje kakovosti papirja med njegovo proizvodnjo. Metoda temelji na obdelavi posnetkov papirne mase pred vstopom v sušilnik in papirja po izstopu iz njega. Vlaknasta struktura papirja je bila spremljana v izbranih opazovalnih oknih z velikostjo, ki se je prilagajala hitrosti potovanja papirja skozi stroj. Obdelava posnetkov je bila izvedena s pomočjo osnovnih statističnih metod, kar omogoča hitro odzivnost opazovalnega sistema. Prikazana metoda je sposobna zaznati anomalije v papirni masi in papirju po časovnih vrstah povprečnih jakosti sivin v opazovalnih oknih. S prikazanimi relacijami je omogočeno tudi ugotavljanje primernosti vstopne papirne mase za doseganje zelene gramature končnega proizvoda. Razvoj metode se kaže v smeri prilagajanja velikosti opazovalnih oken, optimiranja napovedi pri nizkih gramaturah in določevanja tolerančnih meja znotraj posamezne gramature.

Ključne besede: papir, vizualizacija, nadzor kakovosti

1 Uvod

Papir predstavlja pomemben proizvod za različne uporabe v industriji ali človekovem vsakdanu, od embalirnega sredstva, pisarniškega materiala do osebne higiene, zato ne kaže, da se bodo potrebe po papirju zmanjšale. Zaradi velikih potreb, pa tudi zaradi porabe surovin in energije, ki so značilne za proizvodnjo papirja, je potrebna nenehna optimizacija procesa. Slednje vpliva ne le na zmanjšanje stroškov in povečano kakovost izdelka, pač pa tudi na zmanjševanje neugodnih vplivov na okolje.

V zvezi s tem se je v zadnjih dveh desetletjih pojavilo kar nekaj metod,

Doc. dr. Tom Bajcar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Andrej Šinkovec, univ. dipl. inž., Inštitut za celulozo in papir, Ljubljana; Aleš Malneršič, univ. dipl. inž., prof. dr. Brane Širok, univ. dipl. inž., dr. Lovrenc Novak, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

ki služijo spremljanju celotnega procesa proizvodnje papirja v zvezi z odkrivanjem mehanskih napak (npr. trganje papirnega filma [1]) ali pa spremljanju kvalitete papirja. V zvezi s slednjim je bilo izdelanih nekaj študij in patentov, ki so se usmerile predvsem na brezdotične optične računalniško podprte metode spremljanja vlaknaste strukture papirja med proizvodnjo z uporabo nevronske mreže [2], frekvenčne [3] ali frekvenčno-časovne [4,5] analize ali multivariacijske slikovne analize posnetkov papirja [6]. Navedene metode omogočajo spremljanje vrste parametrov papirja, ki vplivajo na njegovo kakovost, med drugim tudi na obliko anomalij in usmerjenost vlaken v papirju. Težava teh metod je v kompleksnih algoritmih, ki zahtevajo obsežnejše izračune in otežujejo spremljanje procesa v realnem času.

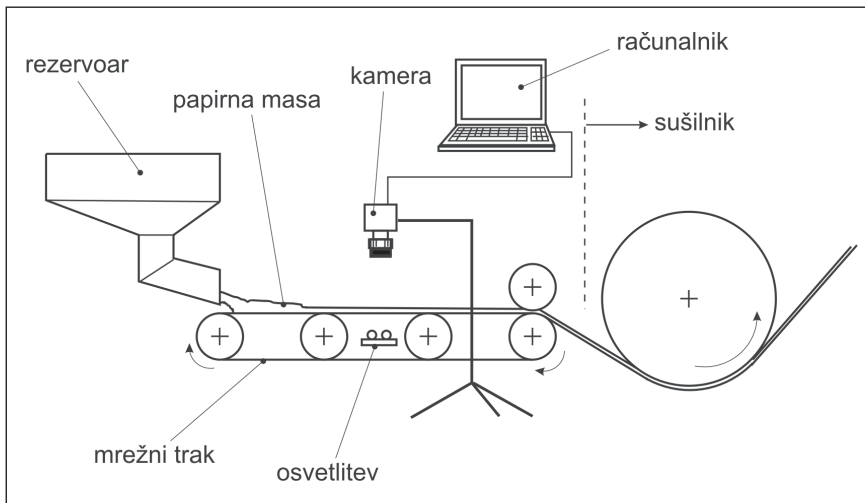
Pri proizvodnji papirja je pogosto pomembna hitra odzivnost pri iskanju napak (anomalij), hkrati pa je marsikateri parameter ali podatek, ki ga posredujejo kompleksne metode, manj pomemben v določenem segmentu procesa.

Namen tega članka je v iskanju osnovnih relacij, ki omogočajo ugotavljanje kakovosti papirja. Predstavljena je računalniško podprta optična metoda, namenjena spremljanju ključnih informacij o trenutnem stanju v procesu proizvodnje papirja, pri čemer je poudarek predvsem na robustnosti uporabljene opreme in hitri odzivnosti sistema.

2 Eksperimentalni del

Eksperiment je bil izveden na Inštitutu za celulozo in papir v Ljubljani na stroju za proizvodnjo papirja, in sicer s pomočjo snemanja plasti (filma) papirne mase pred vstopom v sušilnik stroja in nato suhega papirja po izstopu iz sušilnika. Slika 1 prikazuje shemo eksperimentalne proge. Papirna masa iz rezervoarja prehaja na mrežni trak, kjer se razporedi s periodičnimi prečnimi nihanji traku. Od tu potuje naprej skozi sušilnik, iz njega izstopi kot trak suhega papirja.

Za snemanje je bila uporabljena digitalna videokamera Fastec



Slika 1. Shema eksperimentalne proge (postavitev kamere pred sušilnikom)

HiSpec 4, ki omogoča snemanje črno-belih slik in se krmili s pomočjo osebnega računalnika. Frekvenca zajemanja slik je bila nastavljena na 300 slik/s. Osvetlitev je bila izvedena s pomočjo štirih vrst tračnih LED-diod, ki so bile pritrjene na letev, ta pa je bila položena pod premični mrežni trak (pred vstopom v sušilnik) ali pod plast papirja (na izstopu iz sušilnika) pravokotno na smer premikanja papirne mase ali papirja. Svetloba je bila dovolj močna, da je presvetljevala papirno maso in papir ter s tem omogočila opazovanje in snemanje vlaknaste strukture.

Pri eksperimentu so bile uporabljene tri različne vrste papirne mase, ki so se razlikovale po gostoti (t. i. gramaturi) končnega proizvoda – papirja. Končni proizvod, ki je izhajal iz sušilnika, je imel glede na posamezno uporabljeno papirno maso gramaturo 50 g/m², 110 g/m² ali 210 g/m².

Posnetih je bilo 6 zaporedij (sekvenc) posnetkov, in sicer za vsako gramaturo na vstopu in izstopu iz sušilnika. Posamezna sekvenca je vsebovala 500 posnetkov. Na sliki 2 so prikazani tipični posnetki strukture papirja ali papirne mase pred vstopom v sušilnik in na izstopu iz njega. Vlaknasta struktura se na posnetkih lahko razbere po sivih območjih različne jakosti. Jakost sivine ima lahko 256 stopenj, in sicer od nič (črna) do 255 (bela). Če privzamemo, da se ho-

mogenost vlaknaste strukture na sliki 2 kaže v enovitosti (enakomernosti) lokalnih jakosti sivin in s tem prosojnosti na posameznem posnetku, je opazno, da se homogenost vlaknaste strukture papirne mase večja s povečevanjem gramature papirja. Še bolj je to opazno v končnem produktu – papirju, ki izstopa iz sušilnika.

Za vsako zaporedje (serijo) posnetkov so bili izbrani segmenti kvadratne oblike (opazovalna okna), v katerih se je spremljalo spreminjanje vrednosti sivine med trajanjem celotnega zaporedja. Zaradi spreminjajoče se intenzitete osvetlitve po celotnem posnetku posameznega zaporedja so bila izbrana tri opazovalna okna: na sredini posnetka in na skrajnih mejah v prečni smeri posnetka (slika 3). Velikost posameznega opazovalnega okna je bila izbrana tako, da je njegova izmera v smeri premikanja papirne mase ali papirja ustrezala premiku, ki ga papirna masa ali papir opravi med dvema zaporednima posnetkoma. Na ta način so bile zajete vse spremembe v sivinah na izbranem mestu na posnetkih, nastale med zajemanjem sekvence posnetkov. Po drugi strani pa se dobljena informacija s posnetkov ni nikoli ponavljala. Z izbiro več oken na isti sekvenci posnetkov (vzorcu) in povprečenjem rezultatov med njimi se je poskušalo nadomestiti tudi ponavljanje snemanja pri različnih vzorcih iste gramature, saj je kamera omogočala le okoli 2 s

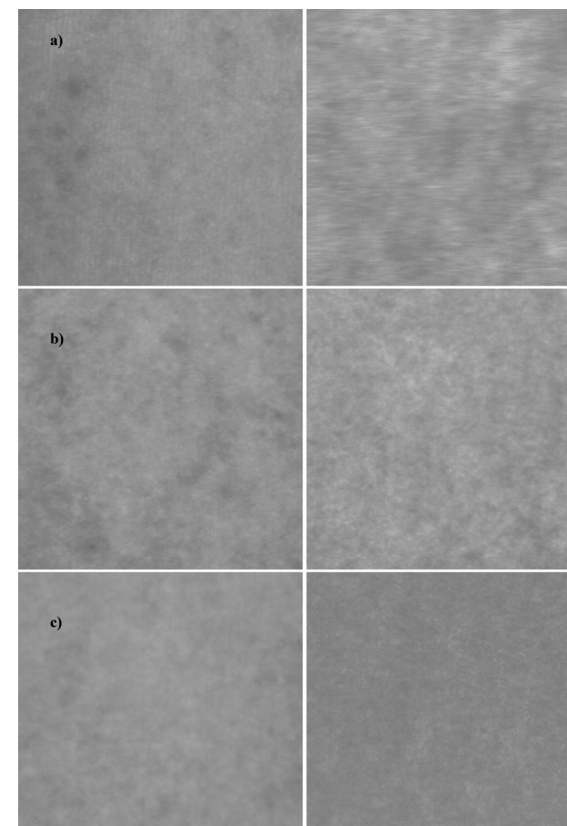
snemalnega časa na sekvenco.

Vrednosti sivine v vsakem opazovalnem oknu so bile statistično obdelane. Posamezno opazovalno okno je zajemalo več slikovnih točk, v vsaki točki pa se je lahko določila vrednost sivine. Srednja vrednost jakosti sivine A v opazovalnem oknu na posameznem posnetku se določi v skladu z naslednjo enačbo [7]:

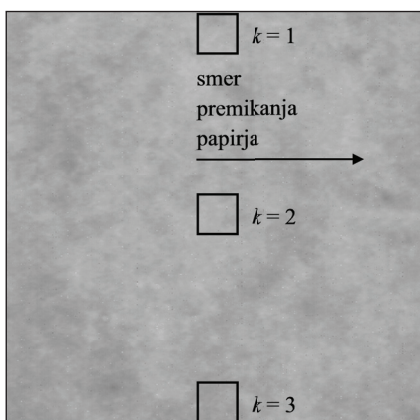
$$A(k,t) = \sum_l \sum_m E(l,m) \quad (1)$$

kjer je k označba opazovalnega okna na posameznem posnetku (središčno ali skrajni okni), t pa označuje posnetek v sekvenci. E označuje jakost sivine v posamezni slikovni točki, l in m pa sta koordinati položaja posamezne slikovne točke v opazovalnem oknu k .

Ker je že s posnetkov na sliki 2 razvidna razlika v prosojnosti strukture glede na gramaturo papirja, je bila



Slika 2. Struktura papirne mase (levo) in papirja (desno): vrsta a – gramatura 50 g/m², vrsta b – gramatura 110 g/m², vrsta c – gramatura 210 g/m²



Slika 3. Postavitev opazovalnih oken

kot cenilka uporabljena tudi standardna deviacija jakosti sivine s v posameznem opazovalnem oknu čez celotno sekvenco posnetkov [8]:

$$s(k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (A(k,t) - \overline{A(k)})^2} \quad (2)$$

$$\overline{A(k)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n A(k,t) \quad (3)$$

kjer je n število posnetkov v sekvenci, $\overline{A(k)}$ pa je srednja vrednost jakosti sivine v k -tem opazovalnem oknu za celotno sekvenco posnetkov.

■ 3 Rezultati

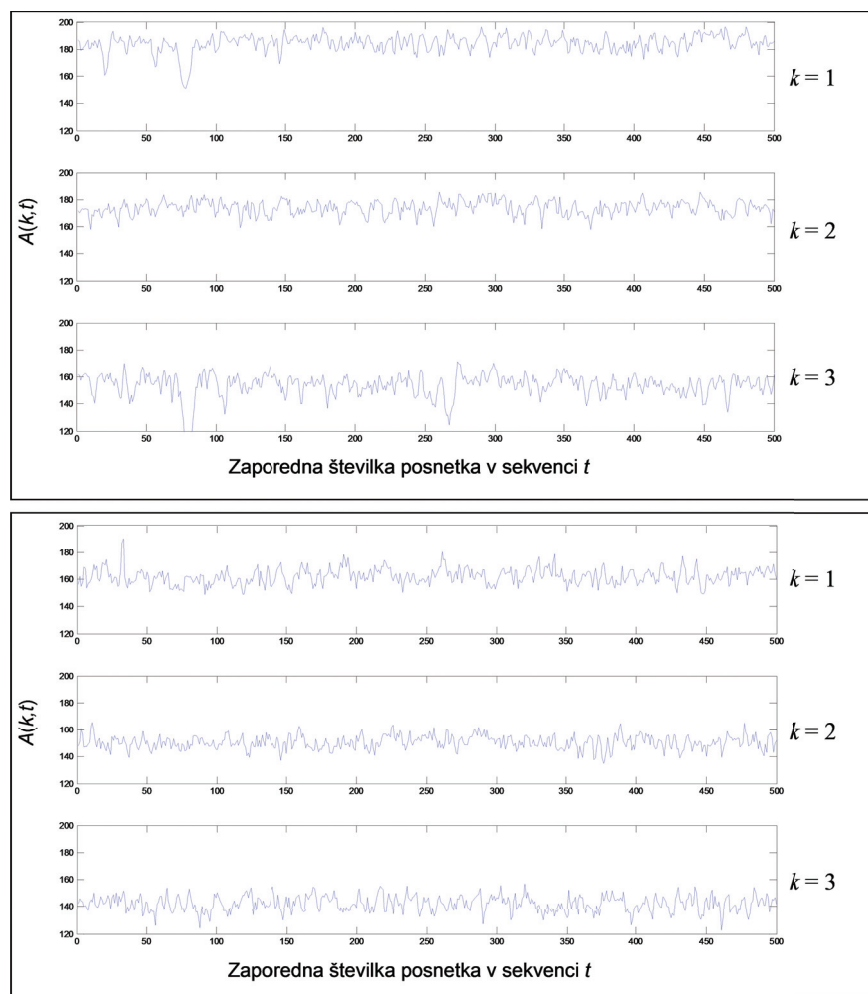
Slika 4 prikazuje časovne vrste srednjih vrednosti jakosti sivine $A(k,t)$ pri sekvenci posnetkov gramature 110 g/m^2 pred vstopom v sušilnik in po izstopu iz njega. S slike 4 je razvidno, da se srednja vrednost sivine v sekvenci med posameznimi okni nekoliko spreminja, kar je posledica predvsem nekoliko neenakomerne osvetlitve prečno na glavno smer premikanja papirne mase in papirja. Signali med opazovalnimi okni so si sicer precej podobni, prav tako so si podobni odzivi pred sušilnikom in po njem, pri čemer so amplitude nihanja srednje vrednosti sivine posameznega posnetka nekoliko nižje v slednjem primeru. Močnejši skoki v jakosti sivine običajno pomenijo prisotnost neželenih vključkov ali anomalij v papirni masi. Tako je npr. pred sušilnikom na sliki 4 opazen pojav anomalije v opazovalnih oknih $k = 1$ in $k = 3$

na posnetkih 70–90, kjer se srednja vrednost jakosti sivine občutno zniža, v oknu $k = 2$ pa ne; anomaliji v obliki temnih lis, kot sta z belima puščicama označeni na sliki 5, sta se pojavili le na skrajnih delih posnetkov. Podobna anomalija se pojavi tudi npr. v oknu $k = 3$ na posnetkih 255–275 pred sušilnikom (slika 4).

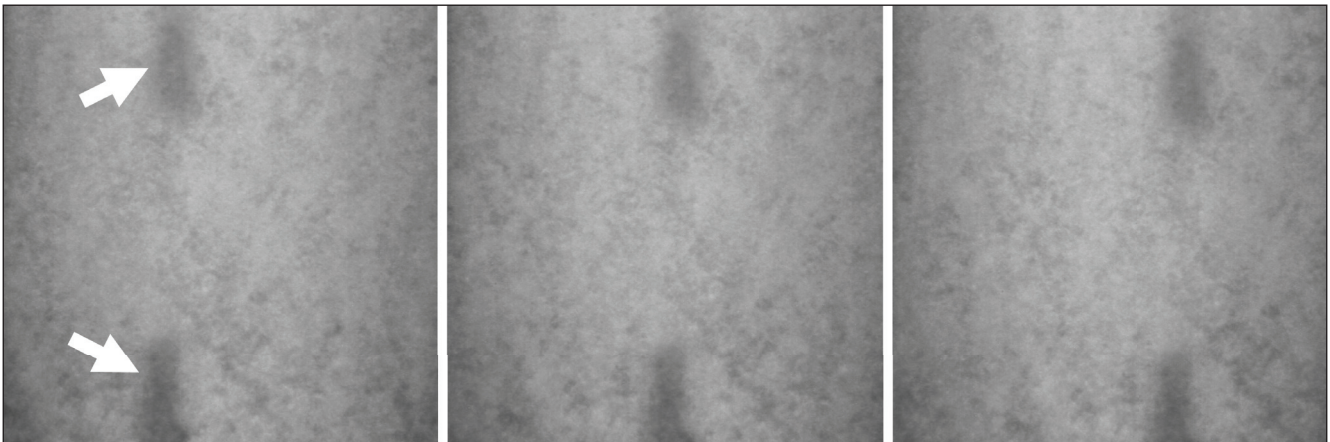
Razlika v časovnih vrstah jakosti sivin v opazovalnih oknih med različnimi gramaturami je opazna na sliki 6, kjer je prikazana primerjava med gramaturama 50 g/m^2 in 210 g/m^2 po izstopu iz sušilnika. Glede na velikost amplitud nihanja srednje vrednosti jakosti sivine posameznega posnetka okoli srednje vrednosti celotne sekvence je opazno višje v primeru manjše gramature. Pričakovano naj bi bil tudi večji raztros in s tem višja vrednost standardne deviacije srednje vrednosti jakosti sivine v primeru manjše gramature. Na sliki 7 je

prikazan diagram standardne deviacije povprečne srednje vrednosti jakosti sivine (tj. povprečje med vsemi tremi opazovalnimi okni v posamezni sekvenci) za vse tri različne gramature.

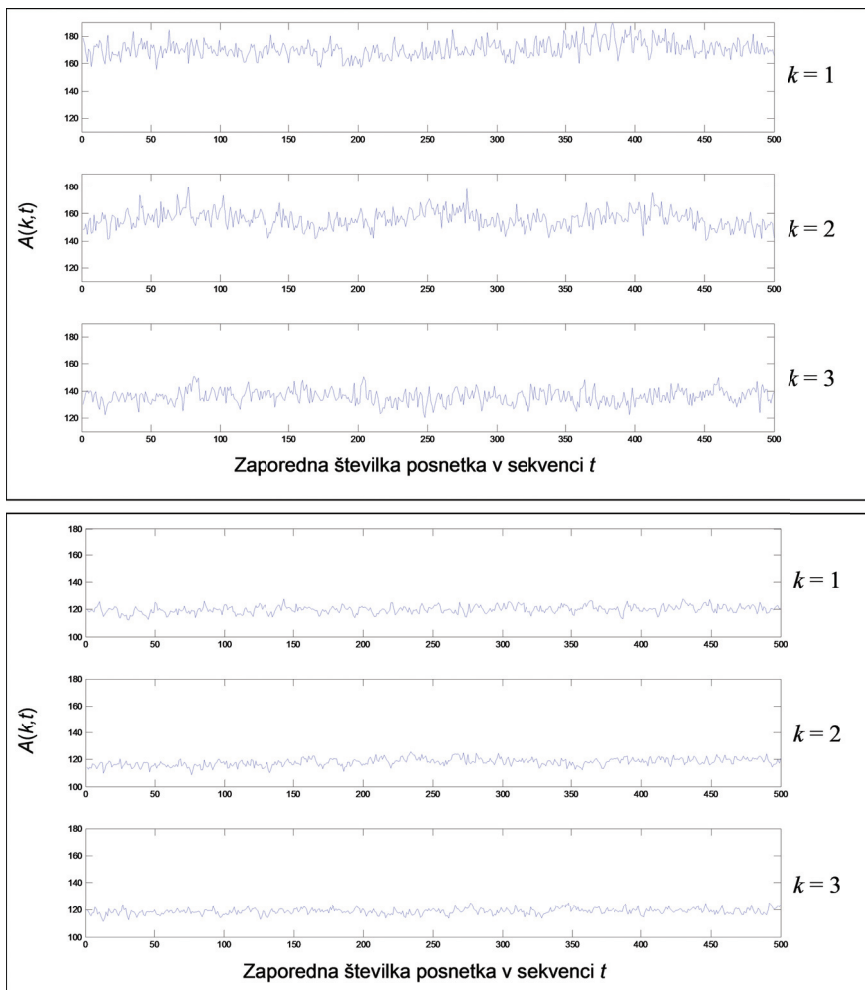
Z diagrama na sliki 7 je razvidno, da se na izstopu papirja iz sušilnika povprečna standardna deviacija jakosti sivine v opazovalnih oknih značilno manjša z naraščanjem gramature. Pri gramaturah 110 g/m^2 in 210 g/m^2 to velja tudi za papirno maso pred vstopom v sušilnik, pri čemer je razvidno, da so vrednosti standardne deviacije pri odgovarjajoči gramaturi v tem primeru nekoliko višje od vrednosti na izstopu iz sušilnika. Posnetki papirja po sušenju so namreč prosojnejši, zaradi večje suhosti so lokalne spremembe v jakostih sivine manj izrazite. Izstopa pa vrednost povprečne standardne deviacije jakosti sivine pred



Slika 4. Primerjava časovnih vrst jakosti sivin v posameznem opazovalnem oknu k pri gramaturi 110 g/m^2 pred vstopom v sušilnik (zgoraj) in po izstopu iz njega (spodaj)



Slika 5. Gramatura 110 g/m² pred sušilnikom, posnetki št. 70, 80 in 90: pojav anomalij v papirni masi



Slika 6. Primerjava časovnih vrst jakosti sivine v posameznem opazovalnem oknu k na izstopu iz sušilnika pri gramaturi 50 g/m² (zgoraj) in gramaturi 210 g/m² (spodaj)

sušilnikom v primeru gramature 50 g/m². Tu so vrednosti bistveno nižje kot na izstopu iz sušilnika. Razlog je zelo verjetno v mrežnem traku pred vstopom v sušilnik (slika 1). Struktura traku ima izrazite, gosto posejane linije pod kotom pribl. 85° glede na smer premikanja papirne mase.

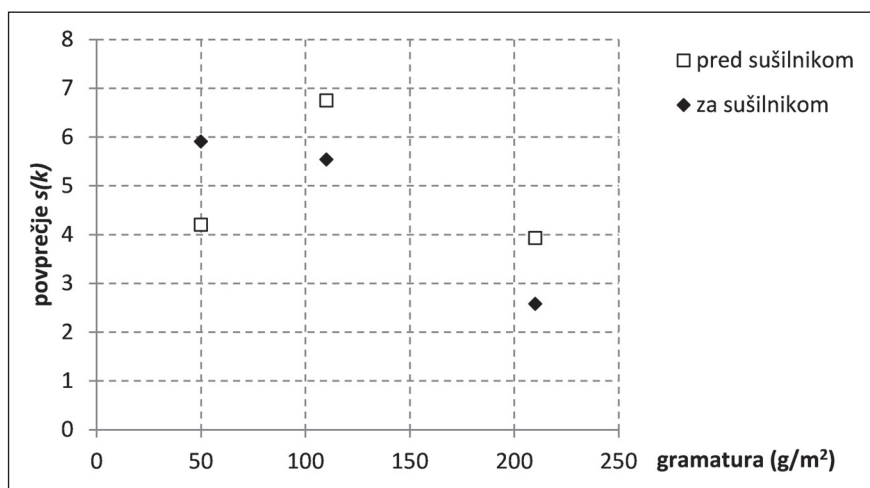
Ta struktura deloma zastira svetlobo iz svetlobnega vira in povzroči navidezno povečanje enakomernosti jakosti sivine (prosojnosti) na posnetkih papirne mase, kjer je ta redka (nizke gramature). Zato se povprečna standardna deviacija jakosti sivine v opazovalnih oknih zniža

in doseže vrednost, ki je bistveno nižja od tiste na izstopu iz sušilnika pri isti gramaturi.

4 Zaključki

V prispevku je bila prikazana izhodiščna metoda kot možnost spremljanja kakovosti papirja med proizvodnjo na papirnem stroju od izstopa papirne mase iz rezervoarja do izstopa končnega produkta iz sušilnika. Kakovost papirja je v tem primeru predstavljala stopnja jakosti sivine – prosojnost vlaknaste strukture na izbrani površini, ki se je ugotavljala s pomočjo posnetkov papirne mase pred vstopom v sušilnik papirnega stroja in posnetkov papirja na izstopu iz sušilnika. V ta namen so bile uporabljene statistične metode na izbranih opazovalnih površinah (oknih) na posnetkih traku s papirno maso ali končnega produkta – papirja.

Rezultati so pokazali, da sta srednja vrednost jakosti sivine v izbranih opazovalnih oknih in njena povprečna standardna deviacija v sekvenci posnetkov lahko uporabni kot merilo za ugotavljanje kakovosti papirja. Časovna vrsta povprečnih jakosti sivine v izbranih opazovalnih oknih lahko služi za odkrivanje prisotnosti anomalij, njihovih lokacij in velikosti v papirni masi ali papirju. Standardna deviacija jakosti sivine kot merilo za raztros okoli srednje vrednosti daje informacijo o kakovosti vlaknaste strukture in s tem o primernosti želene gramature končnega proiz-



Slika 7. Povprečna standardna deviacija jakosti sivine po posamezni sekvenci glede na gramaturo papirja

voda. Eksperiment je pokazal, da se z višanjem gramature zmanjšuje standardna deviacija jakosti sivin na izbranih opazovalnih mestih sekvence posnetkov papirne mase ali papirja. Prav tako je standardna deviacija jakosti sivin nižja po izstopu iz sušilnika kot pred njim.

Predstavljena metoda je zaradi zgoraj navedenih značilnosti, robustne opreme in preprostih uporabljenih statističnih algoritmov (hitro odziv) lahko uporabna za spremljanje primernosti uporabljene papirne mase za proizvodnjo papirja želene gramature ter za hitro odkrivanje anomalij v papirju med njegovo proizvodnjo. Za praktično uporabo pa bi bila v prihodnje potrebna še dodatna optimizacija metode v zvezi z vključitvijo in preučitvijo dodatnih gramatur, op-

timiranjem velikosti opazovalnih oken, določitvijo sprejemljivih meja standardnih deviacij za posamezno gramaturo papirja ter odstranitvijo določenih pomanjkljivosti, ki so se pokazale predvsem pri obdelavi podatkov pri najnižji gramaturi.

Literatura

- [1] Trunkhardt, M., Wiericks, C., 2012. Faster and More Accurate Decision-making Using Integrated Solutions Throughout the Paper Manufacturing Process. *O Papel* 73, str. 69–73.
- [2] Lampinen, J., 1994. Optimization and Simulation of Quality Properties in Paper Machine with Neural Networks. *Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence*,

Orlando, Florida, June 28–July 2, 1994, str. 3812–3815.

- [3] Bernié, J.-P., Murray Douglas, W. J., 2001. Paper quality determination and control using scale of formation data. United States Patent, Patent No. US 6,301,373 B1.
- [4] Reis, M. S., Bauer, A., 2009. Using Wavelet Texture Analysis in Image-Based Classification and Statistical Process Control of Paper Surface Quality. *10th International Symposium on Process Systems Engineering – PSE2009*, Rita Maria de Brito Alves, Claudio Augusto Oller do Nascimento and Evaristo Chalbaud Biscaia Jr. (Editors), str. 1209–1214.
- [5] Reis, M.S., Bauer, A., 2009. Wavelet texture analysis of on-line acquired images for paper formation assessment and monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 95, str. 129–137.
- [6] Facco, P., Masiero, A., Bezz, F., Barol, M., Beghi, A., 2011. Improved multivariate image analysis for product quality monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 109, str. 42–50.
- [7] Širok, B., Blagojević, B., Novak, M., 2002. Influence of blow away velocity field on the primary layer fibre structure in the mineral wool production process. *Glass Technology* 43, str. 188–194.
- [8] Sachs, L., 2003. *Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden*. Springer, Berlin.

Method for monitoring product quality in paper production process

Abstract: The paper presents a computer-aided visualization method for monitoring of paper quality during paper production process. The method is based on processing of images of paper mass layer before it enters the drier, and of paper after it exits the drier. Fibrous structure of the paper was monitored in selected observation windows with the size that was adapted to the paper mass velocity through the paper machine. Image processing was carried out by applying some basic statistic methods, which enable quick response of the monitoring system. The presented method is able to detect anomalies in paper through time series of average greyscale level intensities in observation windows. Presented relations enable the determination of suitability of the raw paper mass to achieve the desired grammage of the end product. Further development of the method shall focus on adjustment of observation windows' size, on optimization of prediction for low grammages and on determination of tolerance limits for different paper grammages.

Keywords: paper; visualization; quality control