

Dobór parametrów produkcji tektury falistej z zastosowaniem liniowych modeli zależności między zmiennymi procesowymi

Włodzimierz Szewczyk, Paweł Pełczyński

Politechnika Łódzka, Centrum Papiernictwa i Poligrafii, ul. Wólczańska 221, 93-005 Łódź

Adam Łuc, Łukasz Wobik

Rawibox S.A., ul. Strefowa 22, 43-392 Międzyrzecze Dolne

Streszczenie: W artykule zaprezentowano i porównano wybrane techniki doboru parametrów procesu produkcji tektury falistej bazujące na liniowych modelach zależności między zmiennymi procesowymi. Omówiono sposób wyznaczania parametrów tych modeli, uwzględniający wiedzę praktyczną i umiejętności operatorów prowadzących produkcję. W tym celu zaprojektowano i zainstalowano w środowisku przemysłowym tekturnicy system pomiaru i rejestracji temperatury surowców papierowych, wstęg wytwarzanej tektury dwuwarstwowej, płyty tektury wielowarstwowej oraz prędkości płyty wytwarzanej tektury. Rejestrowane dane poddawano analizie w celu opracowania i oceny przydatności wybranych modeli służących do zadawania początkowych parametrów produkcji tektury. Zaproponowane podejście pozwala na wykorzystanie indywidualnych doświadczeń każdego z operatorów prowadzących produkcję, co korzystnie wpływa na jakość wytwarzanej tektury i wydajność procesu produkcyjnego.

Słowa kluczowe: tektura falista, zmienne procesowe, parametry produkcji, regresja liniowa, analiza składowych głównych

1. Wprowadzenie

Tektura falista jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów do produkcji opakowań, a jej jakość i wytrzymałość mają kluczowe znaczenie dla funkcjonalności i estetyki gotowych produktów [1–4]. Osiągnięcie wysokiej wytrzymałości przy minimalnej masie opakowania jest ważne zarówno z ekonomicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia, podczas gdy estetyka i jakość powierzchni opakowań tekturowych są kluczowe dla ich atrakcyjności handlowej. W związku z tym w procesie produkcji tektury falistej szczególną wagę przykładają się do precyzyjnej kontroli parametrów procesu, takich jak np. temperatura i wilgotność wstęg papierów, gdyż wpływają one bezpośrednio na właściwości mechaniczne i estetyczne wytwarzanego produktu [5–7].

Współczesna tekturница, czyli maszyna do wytwarzania tektury falistej, jest skomplikowanym ciągiem technologicznym składającym się z szeregu modułów [8]. W sklejkach pojedy-

nych następuje formowanie warstw pofalowanych tektury oraz sklekanie papierów warstw płaskich z warstwami pofalowanymi. Tak powstałe wstęgi tektury dwuwarstwowej są transportowane do sklejkarki podwójnej, gdzie następuje sklekanie papieru dolnej warstwy pokryciowej oraz jednej lub kilku wstęg tektury. Uformowana w ten sposób płyta tektury jest suszona podczas transportu po stole suszącym, w wyniku czego następuje utrwalenie spoin klejowych. Po opuszczeniu suszarni płyta tektury jest opcjonalnie cięta wzdłużnie na tzw. użytki i nagniatana, a następnie cięta poprzecznie na arkusze układane w stosy. Powstawanie trwałych spoin klejowych wymaga precyzyjnej kontroli temperatur w poszczególnych miejscach ciągu technologicznego.

O jakości wyprodukowanej tektury decyduje również stabilność jej parametrów geometrycznych, jak grubość, czy zachowanie płaskości arkuszy w stosach. Wymaga to kontrolowanego nawilżania papierów na warstwy pofalowane w kondycjonerach przed sklejkarkami pojedynczymi oraz usuwania nadmiaru wody zawartej w zawieszinie klejowej. Otrzymanie produktu dobrej jakości stanowi poważne wyzwanie dla układów sterowania pracą ciągu technologicznego ze względu na dużą prędkość transportu wytwarzanej płyty tektury, sięgającą nawet 500 m/min i bardzo małymi czasami procesów jednostkowych realizowanych w ramach procesu produkcyjnego.

Obecnie stosowane w przemyśle systemy zarządzania jakością tektury, takie jak WCS firmy BHS czy rozwijany system QCS firmy Valmet, umożliwiając monitorowanie i sterowanie kluczowymi zmiennymi procesowymi w czasie rzeczywistym. Wykorzy-

Autor korespondujący:

Paweł Pełczyński, pawel.pelczynski@p.lodz.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 25.04.2025 r., przyjęty do druku 22.09.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

stują one m.in. stacjonarne pirometry do pomiaru temperatury papierów przed sklejkami, a także czujniki oceniające profile wilgotności i geometrię wytwarzanej tektury [9, 10]. Systemy te bazują na rejestracji danych produkcyjnych oraz ustawień wprowadzanych przez operatorów, co pozwala na doskonalenie procesu w oparciu o dane z wcześniejszych produkcji [11]. Niemniej jednak, żaden z tych systemów nie uwzględnia w pełni indywidualnego doświadczenia operatorów, które może znacząco wpłynąć na optymalizację parametrów procesu.

W artykule zaprezentowano kontynuację wcześniejszych badań, dotyczących wykorzystania rejestrowanych danych procesowych [12] w celu opracowania modeli liniowych, które pozwalają na bardziej precyzyjne zadawanie początkowych parametrów produkcji tektury falistej. Proponowane podejście uwzględnia indywidualne preferencje operatorów tekturnicy, które wynikają z intuicji oraz doświadczenia zdobytego podczas prowadzenia produkcji. Dzięki temu możliwe jest nie tylko uwzględnienie ogólnych zasad sterowania procesem, ale także personalizacja ustawień, co może pozytywnie wpłynąć na jakość wytwarzanego produktu i stabilność procesu.

Przedstawione badania koncentrują się na zastosowaniu technik analizy danych, takich jak wielowymiarowa regresja liniowa i analiza głównych składowych PCA (ang. *Principal Component Analysis*), w celu znalezienia zależności między zmiennymi procesowymi oraz ich wpływu na jakość tektury. Praktyczną korzyścią identyfikacji parametrów powstałych w ten sposób liniowych modeli procesu jest pomoc dla operatorów tekturnicy w zakresie zadawania pożądanych parametrów produkcji. Wyniki wskazują na możliwość integracji proponowanego podejścia z istniejącymi systemami zarządzania jakością, co pozwala na dalszy rozwój automatyzacji i personalizacji procesu produkcji tektury falistej.

2. System pomiaru wielkości procesowych

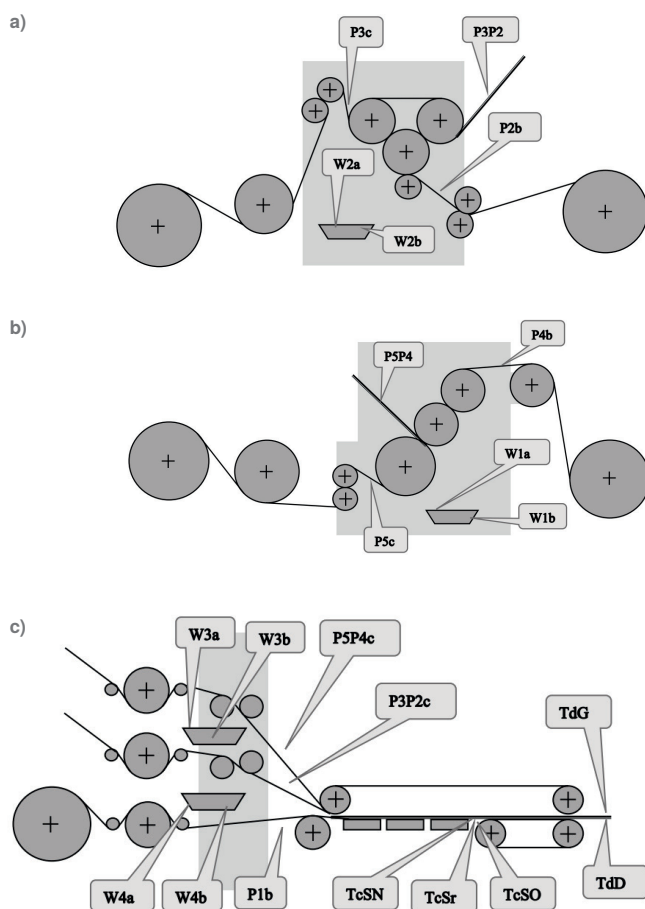
W ramach badań opracowano system rejestracji i analizy danych procesowych integrujący sieć czujników temperatury i miernik prędkości tekturicy. Do ciągłego, bezstykowego pomiaru temperatury wstęg papieru i płyty tektury zastosowano stacjonarne pirometry firmy Optris GmbH [13]. Zainstalowany w ciągu technologicznym tekturicy system pomiarowy obejmuje:

- pirometry OPTRIS serii CS i CT,
- termometry zanurzeniowe z czujnikami Pt 100 i przetwornikami AP-TOPGN1,
- przetwornik prędkości tekturicy stanowiący integralny element jej układu sterowania,
- rejestratory danych AR207/16U/S1/P/P/P/P/IP30 podłączone do lokalnej sieci komputerowej.

W szczególności monitorowano temperaturę:

- papierów na pofalowane i płaskie warstwy tektury przed sklejkami pojedynczymi i wstęg tektury za sklejkami,
- płyty tektury za stołem suszącym i w sekcjiciągającej suszarni,
- kleju przy dopływie i odpływie z wanien klejowych.

Punkty pomiarowe zostały pokazane na rys. 1. Umowne oznaczenia tych punktów, nawiązujące do numeru wstęgi papieru, numeru wanny klejowej lub miejsca pomiaru, wraz z ich opisem zostały zamieszczone w tabeli 1. W przeciwieństwie do standardowych systemów kontroli temperatury dla wstęg (punkty P3P2 i P5P4), zdecydowano się również na pomiar temperatury papierów (punkty P2b, P3c, P4b, P5c), co pozwoliło ocenić prawidłowość ich nagrzewania przed wejściem do sklejek. Dodatkowo wprowadzono pomiar temperatury kleju na dopływie (punkty W1a, W2a, W3a, W4a) i odpływie (punkty W1b,



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów ciągłego pomiaru: a) w sklejarce pojedynczej nr 1, b) w sklejarce pojedynczej nr 2, c) w sklejarce podwójnej i suszarni

Fig. 1. Arrangement of continuous measurement points: a) in single gluer no. 1, b) in single gluer no. 2, c) in double gluer and dryer

W2b, W3b, W4b) z wanien klejowych z zastosowaniem termometrów zanurzeniowych.

Zapewniono też rejestrację chwilowej prędkości płyty produkowanej tektury. System został szczegółowo opisany w [12]. Zebrane dane posłużyły do analizy parametrów procesowych i budowy modeli liniowych opisujących zależności między zmiennymi procesowymi.

3. Modelowanie zależności między zmiennymi procesowymi

W realizowanych wcześniej badaniach [12] opracowano metodę podpowiadania początkowych parametrów produkcji, która bazowała na sukcesywnym uśrednianiu danych historycznych. Metoda ta została przeanalizowana zarówno w wersji ogólnej, obejmującej dane rejestrowane podczas produkcji prowadzonej przez wszystkich operatorów, jak i w wersji spersonalizowanej, uwzględniającej dane związane z indywidualnym doświadczeniem poszczególnych operatorów. Jej istotną wadą jest ograniczona elastyczność i powolna reakcja na zmiany parametrów ciągu technologicznego, zastosowanych surowców czy innych warunków produkcji, takich jak zmienna wilgotność otoczenia czy różnice w strukturze papieru. W celu poprawy szybkości reakcji systemu oraz lepszego uwzględnienia zmiennych warunków produkcji podjęto prace nad opracowaniem modeli opisujących zależności między kluczowymi zmiennymi procesowymi. Modele te pozwolą na bardziej dynamiczne dostosowanie parametrów wstępnych do aktualnych warunków przez danie ope-

ratorowi swobody modyfikacji wybranych, zaproponowanych ustawień [14]. Dzięki znajomości modelu zależności między poszczególnymi zmiennymi nastąpi automatyczne korygowanie pozostałych parametrów w celu zachowania dobrej jakości produkowanej tektury. Zwiększa to znacząco elastyczność procesu produkcji i daje możliwość szybszej optymalizacji jego parametrów. Przykładowo próba zwiększenia średniej temperatury płyty tektury na wyjściu z suszarni T_d , bez zmiany innych parametrów produkcji, pociąga za sobą sugestię zwiększenia średniej temperatury płyty za stołem suszącym T_c . Wynika to z oczywistej zależności między obiema temperaturami. Podobnie próba zwiększenia temperatury papierów na wejściu do sklejarzki pojedynczej zachęca do zwiększenia temperatury

Tabela 1. Opis punktów pomiaru temperatury w ciągu technologicznym tekturnicy
Table 1. Description of temperature measurement points in the corrugator process line

Symbol	Punkt pomiaru temperatury
P3c	Papier 3 przed pasem dociskowym
P3P2	Tektura dwuwarstwowa na wyjściu ze sklejarzki nr 2
P2b	Papier 2 za podgrzewaczem (kondycjonerem)
W2a	Klej na dopływie do wanny
W2b	Klej na wypływie z wanny
P5c	Papier 5 (górna warstwa płaska tektury 5-warstwowej) przed walcem dociskowym
P5P4	Tektura dwuwarstwowa na wyjściu ze sklejarzki nr 1
P4b	Papier 4 za podgrzewaczem (kondycjonerem)
W1a	Klej na dopływie do wanny
W1b	Klej na wypływie z wanny
W3a	Klej na dopływie do wanny górnej
W3b	Klej na wypływie z wanny górnej
W4a	Klej na dopływie do wanny dolnej
W4b	Klej na wypływie z wanny dolnej
P1b	Papier 1 przed cylindrem wprowadzającym wstęgę na stół suszący
P3P2c	Dolna wstęga tektury dwuwarstwowej przed wejściem do suszarni
P5P4c	Górna wstęga tektury dwuwarstwowej przed wejściem do suszarni
TcSO	Dolna warstwa płaska tektury za sekcją grzewczą S3 po stronie obsługi
TcSr	Dolna warstwa płaska tektury za sekcją grzewczą S3 na środku płyty
TcSN	Dolna warstwa płaska tektury za sekcją grzewczą S3 po stronie napędu
TdG	Górna warstwa płaska tektury za suszarnią
TdD	Dolna warstwa płaska tektury za suszarnią

wstęgi tektury na wyjściu ze sklejarzki. Co prawda w tym przypadku operator nie dysponuje możliwością niezależnej regulacji temperatury wstęgi, ale ta zależność może być wykorzystana w celu detekcji wystąpienia niepożądanych warunków będących wynikiem nieprawidłowego działania sklejarzki, a nawet wystąpienia awarii.

W pierwszym podejściu do opracowania modeli zależności procesowych zidentyfikowano powiązania między prędkością maszyny oraz temperaturami w wybranych punktach ciągu technologicznego, na które operator ma bezpośredni wpływ, a pozostałymi temperaturami w systemie. Wykorzystano w tym celu liniową regresję wielowymiarową, opartą na danych zarejestrowanych podczas pracy tekturnicy.

Regresja liniowa w wielu wymiarach polega na opisanu zmiennej zależnej Y (np. temperatury wstęgi tektury na wyjściu ze sklejarzki pojedynczej) jako kombinacji liniowej zmiennych niezależnych $X_1, X_2, \dots, X_n$ (np. prędkość maszyny, temperatury kontrolowane przez operatora), z uwzględnieniem dodatkowego wyrazu wolnego β_0 [15]. Ogólną postać modelu wielowymiarowej regresji liniowej można zapisać jako:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n + \varepsilon \tag{1}$$

gdzie: β_0 – wyraz wolny, odpowiadający wartości zmiennej zależnej przy zerowych wartościach zmiennych niezależnych, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – współczynniki kierunkowe, określające wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych X_i na zmienną zależną Y , ε – składnik losowy, reprezentujący błędy modelu lub wpływ czynników nieuwzględnionych w analizie.

Celem regresji jest wyznaczenie wartości współczynników $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, które minimalizują sumę kwadratów różnic między wartościami rzeczywistymi Y a przewidywanymi przez model $\hat{Y}$.

Regresję przeprowadzono na danych zebranych w ramach ciągłej rejestracji parametrów procesu, ograniczając się do poszukiwania zależności między zmiennymi procesowymi w obrębie danej sklejarzki oraz na wyjściu z suszarni. W ten sposób ograniczono liczbę zmiennych poddawanych analizie. W ciągu technologicznym tekturnicy ma to też uzasadnienie praktyczne – największej korelacji między mierzonymi temperaturami można się spodziewać w obrębie danej sklejarzki a także w poszczególnych punktach suszarni. Ze względu na silną zależność skuteczności podgrzewania surowców i produktu od prędkości transportu płyty tektury v_t , do analizy włączono tę prędkość jako jedną ze zmiennych niezależnych. Temperatury wstęg tektury na wyjściach ze sklejarzek pojedynczych uznano za zmienne zależne, a temperatury papierów na ich wejściach były analizowane zarówno jako zmienne niezależne, jak i zależne, gdyż uznano, że operator może modyfikować wstępne ustawienie temperatury dowolnego papieru. Temperaturę mierzoną w trzech punktach na szerokości płyty za stołem suszącym uśredniono, otrzymując jedną zmienną T_c , gdyż jej rozkład poprzeczny jest wykorzystywany jedynie do detekcji problemów wynikających z nierównomiernego ogrzewania przez płyty stołu grzewczego. W podobny sposób uśredniono temperaturę górnej i dolnej powierzchni płyty tektury za suszarnią, otrzymując zmienną T_d oraz zmienną zależną – różnicę między temperaturami dolnej i górnej powierzchni R_d , która nie powinna być zbyt duża, by nie powodować powstawania odkształceń w arkuszach produkowanej tektury (tzw. kołyskowanie). Uznano, że temperatury T_c i T_d mogą być zarówno zmiennymi niezależnymi i jak i zależnymi.

W ten sposób wyodrębniono cztery grupy zmiennych procesowych:

1. Sklejarzka pojedyncza 1: $v_t, T_{P3c}, T_{P2b}, T_{P3P2}$
2. Sklejarzka pojedyncza 2: $v_t, T_{P5c}, T_{P4b}, T_{P5P4}$
3. Sklejarzka podwójna: $v_t, T_{P5P4c}, T_{P3P2c}, T_{P1b}$
4. Suszarnia: v_t, T_c, T_d, R_d

Przyjęto, że operator ma pełną kontrolę nad prędkością, która jest wspólna dla wszystkich grup zmiennych oraz opcjonalnie zadaje wartość początkową wybranej temperatury. Pozostałe wielkości są wyliczane z równania (1), w którym stałe parametry są wyznaczone na podstawie historii produkcji danego typu tektury. Możliwe jest wybranie wariantu historii wszystkich produkcji lub produkcji prowadzonych przez aktualnie załogowanego do systemu operatora.

Wykorzystanie regresji liniowej do identyfikacji modelu zależności między zmiennymi procesowymi nie zakłada badania występowania korelacji między zmiennymi zależnymi. Nie wykorzystuje to w pełni potencjału liniowych modeli procesu. Technika odznaczająca się taką możliwością jest analiza głównych składowych PCA [16]. W przeciwieństwie do regresji liniowej, która zakłada istnienie zależności przyczynowo-skutkowych między zmiennymi niezależnymi i zależnymi, PCA pozwala na analizę wszystkich zmiennych jednocześnie bez dokonywania takiego podziału. PCA umożliwia redukcję wymiarowości zbioru danych, przy jednoczesnym zachowaniu jak największej ilości informacji zawartej w oryginalnych zmiennych. Jest to szczególnie przydatne w przypadku złożonych systemów przemysłowych, takich jak ciąg technologiczny tekturnicy, gdzie wzajemne powiązania zmiennych procesowych mogą być trudne do jednoznacznego określenia.

Podstawowym celem PCA jest przekształcenie oryginalnego układu współrzędnych (zmiennych) na układ, w którym nowe zmienne – główne składowe – są wzajemnie ortogonalne i uporządkowane według malejącej wariancji. Pierwsza główna składowa (PC1) reprezentuje największy możliwy udział zmienności w danych, a każda kolejna składowa uwzględnia resztkową wariancję, która nie została ujęta przez poprzednie składowe. W praktyce, niewielka liczba głównych składowych często wystarcza do opisu większości zmienności danych, co umożliwia skuteczną redukcję wymiarowości.

Matematycznie PCA opiera się na dekompozycji macierzy kowariancji (lub korelacji) zbioru danych. Wynik tej dekompozycji to wektory własne (główne składowe) i odpowiadające im wartości własne, które reprezentują wariancję ujętą przez każdą składową. Oryginalne dane mogą być zapisane jako kombinacja liniowa głównych składowych:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{P}^T, \quad (2)$$

gdzie: $\mathbf{X}$ – macierz oryginalnych zmiennych, $\mathbf{Z}$ – macierz wartości głównych składowych, $\mathbf{P}^T$ – macierz współczynników określających kombinacje liniowe głównych składowych (wektory własne).

W kontekście analizy procesu produkcji tektury falistej, analiza PCA może być zastosowana do identyfikacji wzorców współzmienności między różnymi temperaturami oraz ich związku z prędkością transportu tektury. W przypadku danych zarejestrowanych w różnych punktach ciągu technologicznego PCA może również pomóc w identyfikacji zmiennych kluczowych, które w największym stopniu przyczyniają się do zmienności parametrów produkcji. Zaletą PCA, w porównaniu z regresją liniową, jest możliwość jednoczesnego uwzględnienia wszystkich zmiennych, co pozwala na bardziej kompleksowe modelowanie procesu. Ponadto PCA umożliwia znalezienie takich kombinacji zmiennych procesowych, które najlepiej reprezentują ogólny stan systemu, co może być pomocne w projektowaniu algorytmów sterowania i monitorowania.

Stosowanie PCA w zadaniu podpowiadania parametrów początkowych wiąże się z problemem braku wyraźnego podziału na zmienne niezależne i zależne. W omawianym zastosowaniu zmienne, takie jak prędkość tekturnicy czy temperatury początkowe zadawane przez operatora, pełnią rolę zmiennych niezależnych, podczas gdy pozostałe temperatury i parametry

technologiczne są wynikiem zachodzących procesów i powinny być traktowane jako zmienne zależne. PCA, przez traktowanie wszystkich zmiennych na równi, pomija ten kontekst przyczynowo-skutkowy, co może prowadzić do trudności w interpretacji wyników oraz do rekomendowania parametrów, które nie są zgodne z praktycznymi możliwościami sterowania procesem. Aby uwzględnić podział na zmienne niezależne i zależne, można zastosować podejście hybrydowe, które łączy PCA z metodami regresji liniowej lub innymi technikami modelowania zależności. W pierwszym kroku PCA można zastosować do redukcji wymiarowości całego zbioru danych, co pozwala na uproszczenie analizy i identyfikację kluczowych wzorców współzmienności. Następnie zmienne wybrane na podstawie PCA mogą zostać podzielone na niezależne i zależne, a na tej podstawie można zbudować model regresyjny do przewidywania zmiennych zależnych.

4. Identyfikacja parametrów modeli procesu i ocena ich skuteczności

Na podstawie analizy raportu historii dwóch kolejnych miesięcy produkcji wyselekcjonowano najczęściej wytwarzaną tekturę o oznaczeniu CB67-079N i wykonano dla niej analizę rozkładu temperatury w omawianych wcześniej punktach rejestracji ciągłej. W tym czasie produkcja była prowadzona przez trzech operatorów o dużym doświadczeniu, a na podstawie inspekcji organoleptycznej i laboratoryjnych pomiarów parametrów wytworzonych tektur [17] ich jakość oceniono jako dobrą. Wyznaczone właściwości fizyczne tektur produkowanych przez poszczególnych operatorów były porównywalne, co pozwalało uznać stosowane przez nich ustawienia maszyny za prawidłowe i dające produkt o dobrej jakości. Wspomniany rodzaj tektury był produkowany 90 razy w okresie dwóch miesięcy, co pozwoliło otrzymać istotne statystycznie wyniki porównań. W prezentowanych badaniach [12] wartości temperatur i prędkości poddano progresywnemu uśrednianiu polegającemu na tym, że wynikowa wartość danej zmiennej jest średnią ze wszystkich wartości osiąganych w produkcjach, od pierwszej w analizowanym okresie do aktualnej. Średnie wartości temperatur w analizowanym okresie w poszczególnych punktach pomiarowych oraz średnie prędkości stosowane przez poszczególnych operatorów i ich rozrzuty reprezentowane przez odchylenie standardowe zostały pokazane w tabeli 2. Wartości odchylenia standardowych poszczególnych temperatur są miarą zdolności tak wyznaczonego modelu procesu do aproksymowania rzeczywistych parametrów osiąganych podczas kolejnych produkcji wybranego rodzaju tektury.

Prace prezentowane w artykule rozpoczęły się od identyfikacji parametrów (rozdz. 3) modeli liniowych procesów zachodzących w poszczególnych podzespołach ciągu technologicznego. W przypadku regresji liniowej skupiono się na zależnościach jednowymiarowych, w których prędkość stanowiła zmienną niezależną, a także na wybranych wariantach zależności dwuwymiarowych, w których oprócz prędkości przyjmowano jedną z temperatur jako zmienną niezależną. Za miarę jakości danego modelu przyjęto jego zdolność do przewidywania wartości zmiennych zależnych – poszczególnych temperatur rejestrowanych w poszczególnych produkcjach w wybranym okresie. W celu jej ilościowego opisu wyznaczano błąd średniokwadratowy RMS (ang. *Root Mean Square*) między danymi rzeczywistymi i ich aproksymacją wynikającą z regresji liniowej. Taka miara jest spójna z wyznaczaniem odchylenia standardowego pokazanych w tabeli 2 dla modelu bazującego jedynie na wyznaczeniu średnich wartości poszczególnych temperatur.

Współczynniki równań regresji w jednowymiarowym przypadku zależności temperatur od prędkości v_t oraz wartości błędu RMS aproksymacji poszczególnych temperatur otrzymywanych

Tabela 2. Średnie wartości i odchylenia standardowe wielkości procesowych podczas produkcji tektury CB67-079N
Table 2. Mean values and standard deviations of process quantities during the production of CB67-079N cardboard

	Wartość średnia				Odchylenie standardowe			
Zmienna procesowa	Wszyscy operatorzy	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Wszyscy operatorzy	Operator 1	Operator 2	Operator 3
$T_{P5c}, ^\circ C$	112,35	110,46	115,17	113,56	9,24	4,41	7,00	20,77
$T_{P5P4}, ^\circ C$	79,62	79,49	78,54	85,21	7,36	6,75	7,65	5,64
$T_{P4b}, ^\circ C$	54,76	53,59	57,24	50,91	6,70	5,80	6,80	6,27
$T_{P3c}, ^\circ C$	106,75	107,22	106,02	107,13	3,23	1,23	4,42	1,13
$T_{P3P2}, ^\circ C$	93,95	95,31	93,34	87,72	3,76	2,52	3,10	6,80
$T_{P2b}, ^\circ C$	94,79	95,62	94,82	88,54	3,85	3,15	3,60	5,93
$T_{P5P4c}, ^\circ C$	64,53	64,36	64,33	66,58	2,56	1,76	3,00	2,41
$T_{P3P2c}, ^\circ C$	74,58	75,46	74,03	70,34	3,64	3,57	3,14	4,33
$T_{P1b}, ^\circ C$	50,04	50,10	49,64	50,70	4,60	3,77	5,56	2,15
$T_c, ^\circ C$	107,75	105,75	107,71	115,32	11,21	8,71	12,94	7,58
$T_d, ^\circ C$	84,61	84,88	84,22	85,31	3,16	2,45	3,67	2,93
$R_d, ^\circ C$	17,49	18,14	17,09	18,18	2,74	2,15	2,97	3,14
$v_i, m/min$	140,49	145,31	137,09	126,69	21,84	23,57	20,76	8,78

Tabela 3. Liniowe modele zależności między poszczególnymi temperaturami w procesie produkcyjnym a prędkością transportu płyty tektury wyznaczone na podstawie danych z produkcji prowadzonych przez wszystkich operatorów (Wsz.), operatora 1 (Op.1), operatora 2 (Op.2) i operatora 3 (Op.3)

Table 3. Linear models of the relationship between individual temperatures in the production process and the transport speed of the cardboard plate determined on the basis of data from production carried out by all operators (Wsz.), operator 1 (Op.1), operator 2 (Op.2) and operator 3 (Op.3)

Zmienna zależna, $^\circ C$	Współczynnik kierunkowy				Wyraz wolny, $^\circ C$				RMS, $^\circ C$			
	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3
T_{P5c}	-0,015	0,003	0,095	-1,924	113,5	109,8	98,1	353,4	9,23	4,41	6,72	12,08
T_{P5P4}	0,036	0,062	0,048	-0,125	73,6	70,1	70,6	98,8	7,31	6,59	7,58	5,53
T_{P4b}	-0,109	-0,089	-0,121	-0,622	70,6	66,4	74,2	129,1	6,27	5,41	6,32	3,08
T_{P3c}	0,024	0,012	0,039	0,039	103,4	105,4	100,8	102,6	3,18	1,20	4,35	1,08
T_{P3P2}	0,008	-0,020	0,010	-0,154	92,5	97,8	91,8	109,6	3,76	2,48	3,10	6,67
T_{P2b}	0,010	-0,021	0,040	-0,381	93,5	98,4	89,5	139,3	3,84	3,11	3,50	4,89
T_{P5P4c}	-0,024	-0,027	-0,018	0,131	68,0	68,3	67,0	50,3	2,50	1,64	2,97	2,12
T_{P3P2c}	-0,004	-0,046	0,005	0,110	75,3	82,2	73,8	58,6	3,64	3,40	3,14	4,22
T_{P1b}	-0,056	-0,040	-0,086	0,140	57,5	55,3	61,7	32,8	4,44	3,65	5,26	1,76
T_c	-0,224	-0,172	-0,273	0,541	138,2	130,1	144,5	49,1	10,09	7,72	11,64	5,91
T_d	-0,007	-0,017	-0,006	0,220	85,6	87,3	85,0	58,4	3,16	2,41	3,67	2,21
R_d	-0,018	-0,025	-0,025	0,168	20,1	21,7	20,4	-2,4	2,71	2,07	2,93	2,77

przez wszystkich operatorów oraz niezależnie dla każdego z operatorów zostały zestawione w tabeli 3.

Niewielkie wartości współczynnika kierunkowego równań regresji w przypadku wyboru prędkości płyty tektury, w większości przypadków sugerują słabą korelację między prędkością a temperaturami w poszczególnych punktach ciągu technologicznego. Z tego względu zdecydowano się na włączenie do równań regresji kolejnej zmiennej niezależnej, jaką jest jedna z temperatur w danym podzespole. W praktyce sprowadza się to do oddania operatorowi decyzji o zadaniu jednej z temperatur papierów lub wstęg tektury na wejściu do danej sklejkarki oraz na wyjściu z suszarni. Uzasadnione charakterem procesu technologicznego, przypadki regresji zmiennych zależnych w funkcji wybranych zmiennych niezależnych zostały zebrane w tabeli 4.

W każdym z poddanych analizie zespołów tekturnicy (sklejkarki pojedyncze, sklejkarka podwójna i suszarnia) wyznaczono także dwie główne składowe PCA na podstawie czterech wyselekcjonowanych zmiennych procesowych, odpowiednio: $\{v_t, T_{P5c}, T_{P4b}, T_{P5P4}\}, \{v_t, T_{P3c}, T_{P2b}, T_{P3P2}\}, \{v_t, T_{P1b}, T_{P3P2c}, T_{P5P4c}\}$ i $\{v_t, T_c, T_d, R_d\}$. Odpowiada to praktycznej sytuacji oddania operatorowi decyzji o zadaniu dwóch zmiennych procesowych w każdym zespole, przy jednoczesnym wyznaczeniu pozostałych zmiennych ze składowych głównych PC1 i PC2. W tym przy-

padku nie ma sztywnego wskazania, które zmienne mogą być zadane przez operatora. Z praktycznego punktu widzenia jedną z nich powinna być prędkość, która jest wspólna dla wszystkich podzespołów. Wyniki analizy PCA z błędami RMS rekonstrukcji rzeczywistych przypadków układu zmiennych procesowych zestawiono w tabeli 5.

5. Analiza jakości opracowanych modeli

Wykonano analizę porównawczą modeli zależności między zmiennymi procesowymi w tekturnicy, której celem była ocena ich zdolności do reprezentowania rzeczywistych ustawień stosowanych przez operatorów prowadzących produkcję. Na rysunkach 2–7 zamieszczono wyniki porównania badanych modeli.

Zastosowanie regresji liniowej w przypadku temperatur wstęg tektury na wyjściu ze sklejek pojedynczych (rys. 2 i 3) nie daje znaczącej poprawy w stosunku do prostego modelu bazującego na średnich wartościach. W tym samym czasie analiza PCA pokazuje pewien potencjał w zakresie przewidywania ustawień poszczególnych operatorów. Z pewnością została wykryta korelacja między zmiennymi, które nie były brane pod uwagę podczas wyznaczania regresji liniowej.

Tabela 4. Liniowe modele zależności między poszczególnymi temperaturami w procesie produkcyjnym a prędkością transportu płyty tektury i inną temperaturą, wyznaczone na podstawie danych z produkcji prowadzonych przez wszystkich operatorów (Wsz.), operatora 1 (Op.1), operatora 2 (Op.2) i operatora 3 (Op.3)

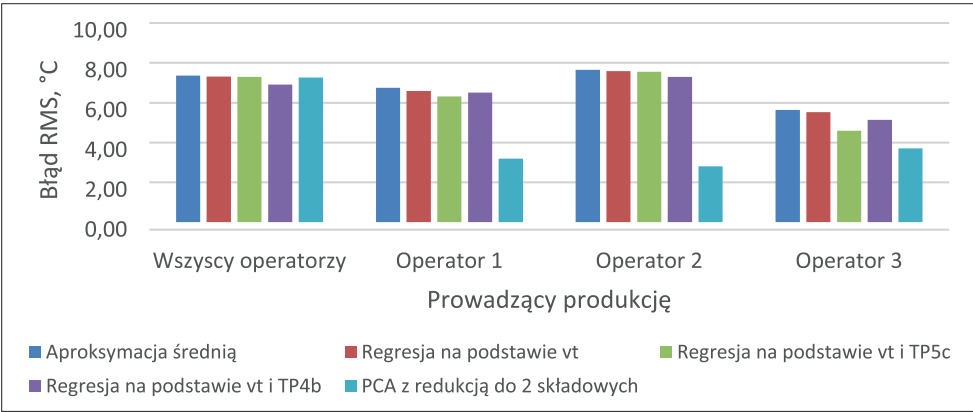
Table 4. Linear models of the relationship between individual temperatures in the production process and the transport speed of the cardboard plate and other temperatures, determined on the basis of data from production carried out by all operators (Wsz.), operator 1 (Op.1), operator 2 (Op.2) and operator 3 (Op.3)

Temperatura w funkcji dwóch zmiennych procesowych, °C	Pierwszy współczynnik kierunkowy				Drugi współczynnik kierunkowy				Wyraz wolny, °C				RMS, °C			
	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3
$T_{P5P4}(v_t, T_{P5c})$	0,037	0,063	0,057	0,364	0,064	-0,432	-0,104	0,254	66,3	117,6	80,8	9,0	7,29	6,31	7,55	4,60
$T_{P4b}(v_t, T_{P5c})$	-0,107	-0,091	-0,119	-0,627	0,127	0,694	-0,021	-0,003	56,1	-9,8	76,3	130,0	6,15	4,46	6,32	3,08
$T_{P5P4}(v_t, T_{P4b})$	-0,006	0,016	0,008	0,287	-0,381	-0,509	-0,326	0,663	100,5	104,0	94,7	13,3	6,91	5,98	7,30	5,14
$T_{P5c}(v_t, T_{P4b})$	0,015	0,044	0,092	-1,951	0,276	0,461	-0,024	-0,042	94,0	79,2	99,9	358,8	9,07	3,63	6,72	12,1
$T_{P3P2}(v_t, T_{P3c})$	0,004	-0,025	0,005	-0,360	0,198	0,409	0,117	5,267	72,0	54,7	80,0	-430,6	3,70	2,43	3,05	3,50
$T_{P2b}(v_t, T_{P3c})$	0,010	-0,026	0,034	-0,476	0,000	0,412	0,152	2,433	93,5	55,0	74,2	-110,2	3,84	3,07	3,44	4,13
$T_{P3P2}(v_t, T_{P2b})$	0,004	-0,015	0,005	0,252	0,421	0,248	0,126	1,066	53,2	73,3	80,6	-38,9	3,39	2,36	3,07	4,15
$T_{P3c}(v_t, T_{P2b})$	0,023	0,013	0,030	0,030	0,127	0,061	0,234	0,234	91,5	99,4	79,8	79,8	3,15	1,18	4,27	2,55
$T_{P3P2c}(v_t, T_{P5P4c})$	0,000	-0,038	0,010	0,130	0,185	0,262	0,271	-0,157	62,7	64,3	55,6	66,5	3,61	3,37	3,03	4,21
$T_{P1b}(v_t, T_{P5P4c})$	-0,045	-0,007	-0,081	0,112	0,440	1,238	0,279	0,217	27,6	-29,3	43,1	21,9	4,30	3,04	5,20	1,70
$T_{P5P4c}(v_t, T_{P3P2c})$	-0,024	-0,024	-0,019	0,135	0,087	0,061	0,244	-0,040	61,5	63,3	49,0	52,6	2,48	1,63	2,87	2,11
$T_{P1b}(v_t, T_{P3P2c})$	-0,054	-0,028	-0,091	0,143	0,432	0,257	0,929	-0,024	25,0	34,1	-6,8	34,2	4,15	3,55	4,38	1,76
$T_{P5P4c}(v_t, T_{P1b})$	-0,017	-0,017	-0,011	0,087	0,139	0,249	0,089	0,311	60,0	54,5	61,5	40,1	2,42	1,36	2,93	2,04
$T_{P3P2c}(v_t, T_{P1b})$	0,012	-0,037	0,033	0,129	0,290	0,223	0,330	-0,138	58,6	69,8	53,4	63,1	3,40	3,30	2,61	4,21
$T_d(v_t, T_c)$	0,011	0,002	0,009	0,160	0,082	0,114	0,055	0,111	74,2	72,5	77,1	53,0	3,05	2,25	3,61	2,11
$R_d(v_t, T_c)$	0,008	-0,002	0,003	0,080	0,116	0,134	0,102	0,164	4,1	4,3	5,7	-10,5	2,44	1,79	2,68	2,59
$T_c(v_t, T_d)$	-0,218	-0,152	-0,269	0,368	0,839	1,160	0,551	0,789	66,4	28,8	97,6	2,9	9,73	7,19	11,5	5,65
$R_d(v_t, T_d)$	-0,013	-0,013	-0,021	-0,062	0,705	0,714	0,650	1,048	-40,2	-40,7	-34,8	-63,7	1,54	1,14	1,70	1,50

Tabela 5. Liniowe modele rekonstrukcji poszczególnych temperatur w procesie produkcyjnym wyznaczone w drodze analizy PCA wykonanej na podstawie danych z produkcji prowadzonych przez wszystkich operatorów (Wsz.), operatora 1 (Op.1), operatora 2 (Op.2) i operatora 3 (Op.3)

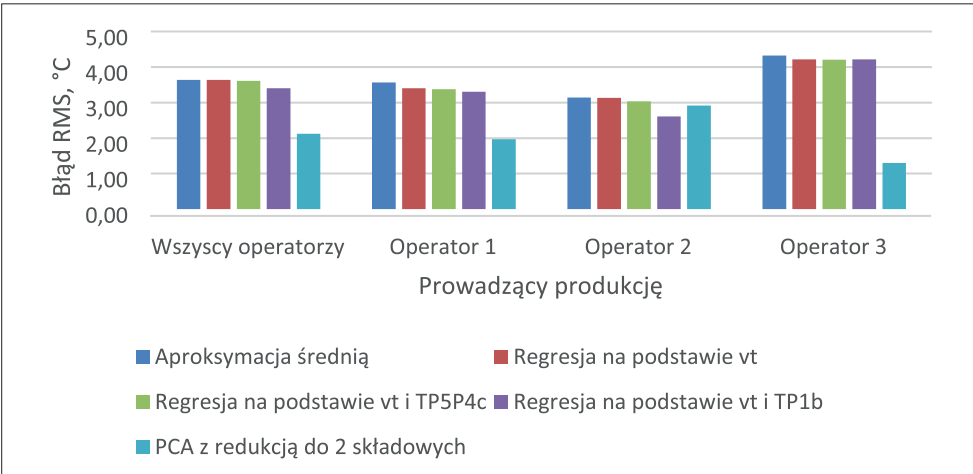
Table 5. Linear models of the reconstruction of individual temperatures in the production process determined by PCA analysis performed on the basis of production data conducted by all operators (Wsz.), operator 1 (Op.1), operator 2 (Op.2) and operator 3 (Op.3)

Rekonstrukcja temperatury w wybranym punkcie, °C	Udział głównej składowej PC1 w rekonstrukcji zmiennej procesowej				Udział głównej składowej PC2 w rekonstrukcji zmiennej procesowej				Wyraz wolny biorący udział w rekonstrukcji zmiennej procesowej, °C				Błąd rekonstrukcji RMS, °C			
	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3	Wsz.	Op.1	Op.2	Op.3
T_{P5c}	-0,021	-0,001	0,110	0,911	0,979	0,357	-0,229	0,213	111,4	110,1	111,1	-0,335	1,09	3,47	6,51	1,34
T_{P5P4}	0,044	0,069	0,057	0,117	0,077	0,752	0,871	0,532	78,5	78,9	77,0	83,5	7,26	3,19	2,81	3,71
T_{P4b}	-0,120	-0,095	-0,133	0,213	0,187	-0,544	-0,427	-0,440	55,7	53,8	57,9	52,9	5,91	3,39	5,16	2,92
T_{P3c}	0,025	0,012	0,041	-0,010	0,237	0,084	0,906	0,133	106,6	107,1	106,1	107,3	2,99	1,17	1,41	0,62
T_{P3P2}	0,009	-0,020	0,011	-0,423	0,671	0,453	0,232	0,723	93,6	95,0	93,2	90,7	2,13	1,97	2,91	1,30
T_{P2b}	0,010	-0,022	0,041	-0,508	0,703	0,887	0,351	0,292	94,8	95,4	94,9	92,6	2,06	1,02	3,11	2,05
T_{P5P4c}	-0,205	-0,027	-0,019	0,135	0,167	0,225	0,136	-0,077	64,7	64,5	64,5	66,3	2,36	1,36	2,87	2,05
T_{P3P2c}	-0,005	-0,047	0,003	0,134	0,494	0,542	0,393	0,988	74,7	75,7	74,4	72,0	2,74	2,60	2,22	0,15
T_{P1b}	-0,058	-0,041	-0,092	0,143	0,851	0,808	0,906	-0,055	49,9	49,6	50,1	50,0	1,60	1,65	1,09	1,71
T_c	-0,270	-0,188	-0,357	0,601	0,949	0,963	0,925	0,765	107,7	105,7	107,7	115,3	0,57	0,52	0,51	0,71
T_d	-0,012	-0,019	-0,012	0,201	0,098	0,129	0,068	0,003	84,6	84,9	84,2	85,3	3,00	2,19	3,58	1,96
R_d	-0,024	-0,028	-0,034	0,176	0,126	0,143	0,106	0,104	17,6	18,1	17,1	18,2	2,38	1,72	2,62	2,43



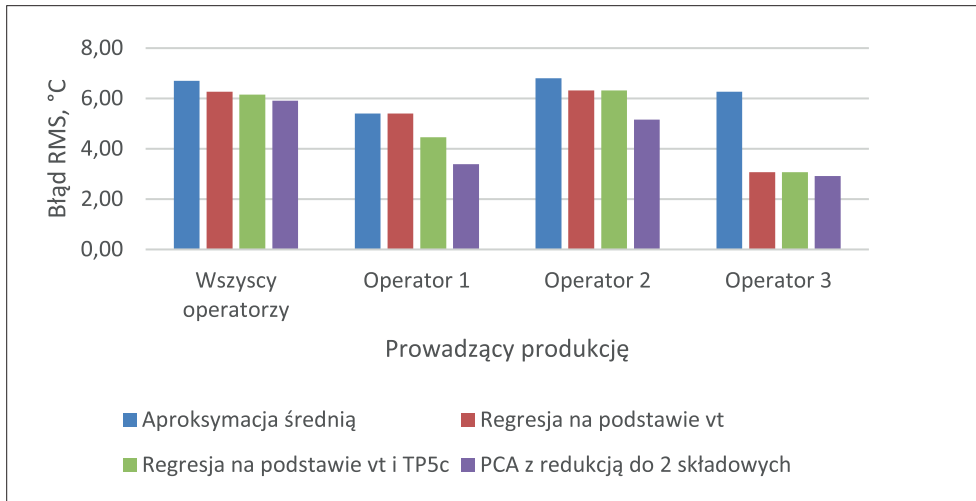
Rys. 2. Błąd aproksymacji oryginalnych wartości temperatury TP5P4 (wstęga tektury na wyjściu ze sklejarki pojedynczej) za pomocą różnych modeli liniowych

Fig. 2. Approximation error of the original temperature values of TP5P4 (cardboard web at the output of the single gluer) by different linear models



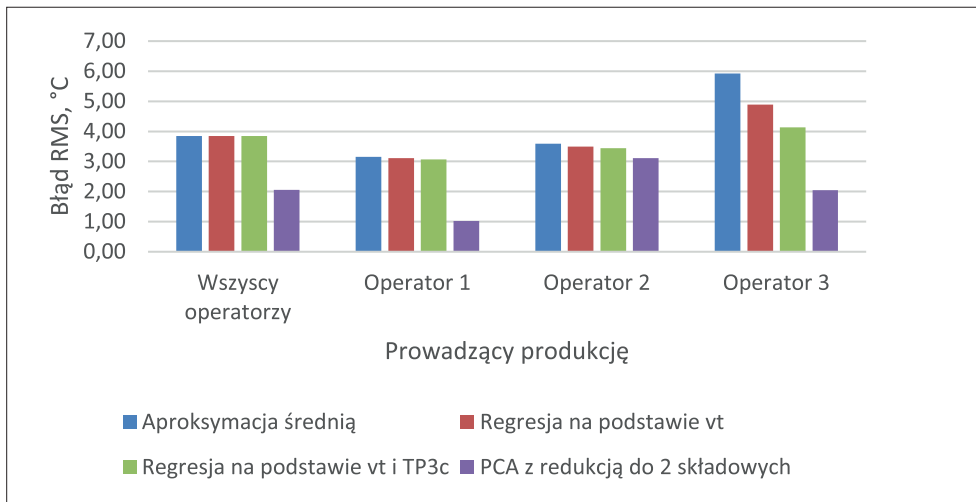
Rys. 3. Błąd aproksymacji oryginalnych wartości temperatury TP3P2c (wstęga tektury na wejściu do sklejarki podwójnej) za pomocą różnych modeli liniowych

Fig. 3. Error of approximation of the original TP3P2c temperature values (cardboard web at the input of the double gluer) using different linear models



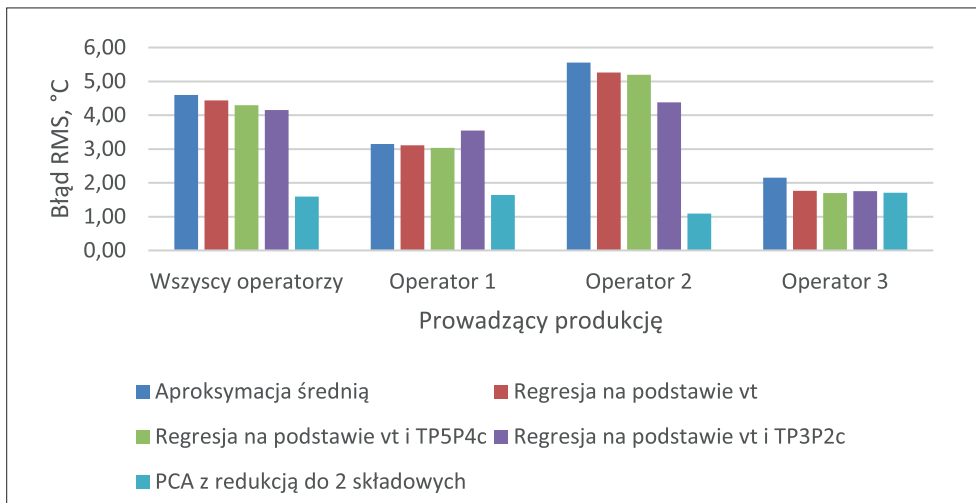
Rys. 4. Błąd aproksymacji oryginalnych wartości temperatury TP4b (papier na warstwę pofalowaną na wejściu do sklejarńki pojedynczej) za pomocą różnych modeli liniowych

Fig. 4. Approximation error of the original TP4b temperature values (paper to corrugated layer at the input of the single gluer) by different linear models



Rys. 5. Błąd aproksymacji oryginalnych wartości temperatury TP2b (papier na warstwę pofalowaną na wejściu do sklejarńki pojedynczej) za pomocą różnych modeli liniowych

Fig. 5. Error of approximation of the original TP2b temperature values (paper to corrugated layer at the input of the single gluer) using different linear models



Rys. 6. Błąd aproksymacji oryginalnych wartości temperatury TP1b (papier na warstwę płaską na wejściu do sklejarńki podwójnej) za pomocą różnych modeli liniowych

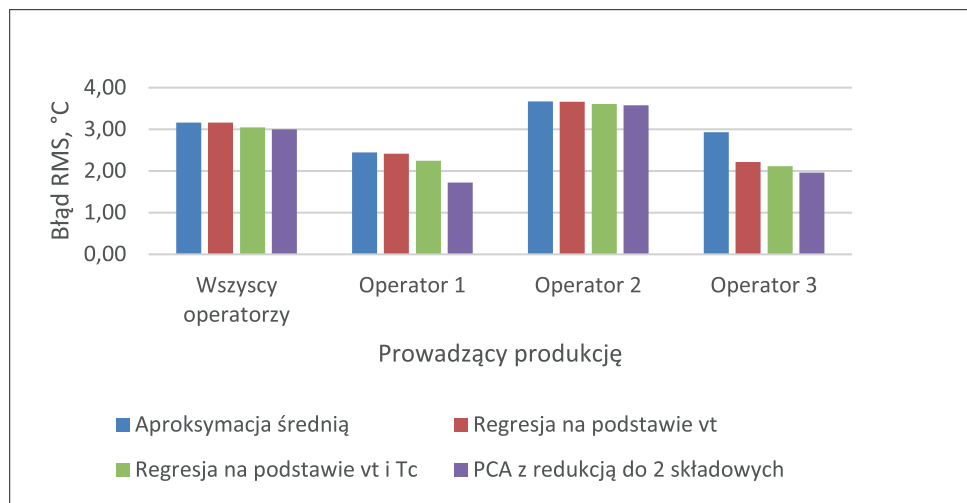
Fig. 6. Error of approximation of original TP1b temperature values (paper to flat layer at input of double gluer) using different linear models

Przewidywanie temperatury papieru na falę w obu sklejarkach pojedynczych (rys. 4 i 5) staje się lepsze w przypadku zastosowania regresji liniowej niż wyznaczania jedynie wartości średnich, a analiza PCA daje dalszą poprawę. Jest to szczególnie dobrze widoczne w analizie danych uzyskanych podczas produkcji prowadzonych przez operatora 3.

Obserwowane błędy przewidywania temperatur za pomocą analizy PCA w większości przypadków ujawniają korelację między zmiennymi procesowymi w danej sklejarce, która nie jest w pełni wykorzystana w modelu bazującym na średnich oraz regresji liniowej. Jednocześnie widoczne są różnice w precyzji,

z jaką poszczególni operatorzy utrzymują pożądane wartości temperatur. Przykładowo temperatura papieru na dolną warstwę pokryciową tektury (rys. 6) była utrzymywana na pożądanym poziomie przez operatora 3 z dużą precyzją, podczas gdy operator 2 nie poświęcał temu dużej uwagi. Ta sytuacja pokazuje, że nie można oceniać jakości poszczególnych modeli na podstawie danych wypracowanych przez różnych operatorów. Użycie danych rejestrowanych podczas produkcji prowadzonych przez jednego operatora jest bardziej prawidłowym podejściem.

Zastosowanie liniowych modeli przewidywania średniej temperatury płyty tektury na wyjściu z suszarni T_d dało niewielką



Rys. 7. Błąd aproksymacji oryginalnych wartości temperatury T_d (płyta tektury na wyjściu z suszarni) za pomocą różnych modeli liniowych

Fig. 7. Approximation error of the original temperature values T_d (cardboard plate at the exit of the dryer) by various linear models

poprawę przewidywania wartości tej zmiennej procesowej. Najlepsze efekty zaobserwowano w przypadku produkcji tektury prowadzonej przez operatora 3 (rys. 7).

Zestawienie błędów RMS popełnianych przez poszczególne modele w zadaniu dopasowania do rzeczywistych danych z produkcji nasuwa szereg ogólnych wniosków. Zastosowanie regresji liniowej względem prędkości transportu płyty wytwarzanej tektury w większości przypadków nie dało zdecydowanej poprawy modelu w stosunku do bazowania na średnich. Zauważalną poprawę dokładności aproksymacji obserwuje się jedynie w przypadku temperatury T_{pib} papieru na warstwę płaską na wejściu do sklejkarki podwójnej oraz temperatury T_c płyty tektury po opuszczeniu stołu suszącego. Zastosowanie regresji liniowej na podstawie prędkości i wybranej temperatury zwykle dawało dalszą, niewielką poprawę dokładności aproksymacji danych z produkcji.

Zastosowanie analizy PCA dało w większości przypadków zdecydowaną poprawę dokładności aproksymacji. Osiągnięto to dzięki uwzględnieniu wszystkich zmiennych w danej grupie podczas estymacji parametrów modelu. W kilku przypadkach następowało pogorszenie aproksymacji, lecz jest to efekt jednoczesnego dopasowania do danych w kilku wymiarach. Skuteczne zastosowanie PCA wiąże się niestety z pewną niedogodnością polegającą na tym, że na podstawie ustawionych wstępnie przez operatora wartości początkowych wybranych zmiennych obliczane są nie tylko sugerowane wartości pozostałych zmiennych, ale też tych już ustawionych. Wynika to z faktu, że w przypadku PCA nie ma podziału na zmienne niezależne i zależne, lecz wszystkie są traktowane jednakowo.

6. Wnioski

Główną korzyścią wynikającą z zastosowania opracowanych modeli procesu jest zwolnienie operatora z konieczności pamiętania najlepszych ustawień do danej produkcji przy jednoczesnej swobodzie w poszukiwaniu nowych ustawień. Operator może zmieniać wybrane zmienne procesowe (temperatury) w celu poszukiwania ich wartości zapewniających lepszą jakość albo wydajność [18–20]. Dzięki zastosowaniu wypracowanych na podstawie historii produkcji modeli zależności między zmiennymi procesowymi każda zmiana wybranej zmiennej niesie za sobą sugerowaną korektę pozostałych zmiennych w danym podzespole, zabezpieczając przed niekorzystnymi efektami nietrafionych zmian. Brak możliwości dalszej korekty jest sygnałem, że została osiągnięta graniczna akceptowalna wartość wybranej zmiennej, co daje możliwość ostrzegania o potencjalnie niekorzystnym zestawie parametrów, zabezpieczając przed stratami wywołanymi niską jako-

ścią wytworzonej tektury. Opracowane podejście pozwala na zastosowanie zarówno modeli zależności między zmiennymi procesowymi, które zostały wyznaczone na podstawie historii produkcji prowadzonych przez wszystkich operatorów danej maszyny, jak i każdego z operatorów indywidualnie. Umożliwia to sukcesywne dążenie do osiągnięcia wysokiej jakości produktu oraz wydajności procesu produkcyjnego w warunkach produkcji prowadzonej przez danego operatora. W rezultacie możliwe jest szybkie ustawienie parametrów pracy ciągu produkcyjnego do produkcji danego asortymentu tektury, a przy wielokrotnym powtarzaniu tego samego asortymentu znalezienie optymalnych parametrów jego produkcji.

Podziękowania

Prezentowane badania były wykonywane w ramach projektu POIR.01.01.01-00-1456/19 „Opracowanie innowacyjnej, wysokowydajnej technologii produkcji tektury falistej, charakteryzującej się istotnie obniżoną odpadowością” realizowanego w firmie Rawibox współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Bibliografia

1. Rzepa S., *Parametry papieru*, Sympozjum Mondi Packaging “From Fibre to Corrugated Board”, Świecie, 1–2 grudnia 2004.
2. Bai J., Wang J., Pan L., Lu L., Lu G., *Quasi-static axial crushing of single wall corrugated paperboard*, “Composite Structures”, Vol. 226, 2019, DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111237.
3. Fadji T., Coetzee C.J., Opara U.L., *Analysis of the creep behaviour of ventilated corrugated paperboard packaging for handling fresh produce—An experimental study*, “Food and Bioproducts Processing”, Vol. 117, 2019, 126–137, DOI: 10.1016/j.fbp.2019.07.001.
4. Gong G., Liu Y., Fan B., Sun D., *Deformation and compressive strength of corrugated cartons under different indentation shapes: Experimental and simulation study*, “Packaging Technology and Science”, Vol. 33, No. 6, 2020, 215–226, DOI: 10.1002/pts.2499.
5. Schaffrath H.J., Reichenbach F., Schabel S., *Prediction of Box Failure from Paper Data for Asymmetric Corrugated Board*, “TAPPI JOURNAL”, Vol. 17, No. 8, 2018, 429–434.
6. Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Kołakowski Z., *Calculation of honeycomb paperboard resistance to edge crush test*, “Materials”, Vol. 13, No. 7, 2020, DOI: 10.3390/ma13071706.
7. Kołakowski Z., Szewczyk W., Bieńkowska M., *Distribution of Bending Stiffness of Orthotropic Fibrous Material Based*

- on an Example of Corrugated Board, "Fibres & Textiles in Eastern Europe", Vol. 28, No. 3, 2020, 50–54, DOI: 10.5604/01.3001.0013.9018.
8. Szewczyk W., *Maszyny do produkcji tektury falistej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2018, ISBN 978-83-7283-778-3.
9. Kus A., Isik Y., Cakir M.C., Coşkun S., Özdemir K., *Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting*, "Sensors", Vol. 15, No. 1, 2015, 1274–1291, DOI: 10.3390/s150101274.
10. Dong L., Chi F., Shan G., Ketui D., Liwei C., *Effect of pyrometer type and wavelength selection on temperature measurement errors for turbine blades*, "Infrared Physics & Technology", Vol. 94, 2018, 255–262, DOI: 10.1016/j.infrared.2018.09.004.
11. Back S., *Controlling warp on the corrugator*, "Corrugated Today", May/June 2017, [www.valmet.com/globalassets/automation/quality-management/grades/converting/controlling-warp.pdf].
12. Pełczyński P., Kadys K., Szewczyk W., *Measurement and Control of Corrugated Board Production Parameters Taking into Account Individual Operator Preferences*, "Sensors", Vol. 23, No. 14, 2023, DOI: 10.3390/s23146478.
13. *Basic Principles of non-contact temperature measurement*, <https://optris.com/wp-content/uploads/2024/09/Infrared-Basics.pdf>.
14. Montgomery D.C., Runger G.C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, 2013.
15. Khuri A.I., *Introduction to Linear Regression Analysis*, Fifth Edition by Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. "International Statistical Review", Vol. 81, No. 2, 2013, DOI: 10.1111/insr.12020_10.
16. Krzanowski W.J., *Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective*, Oxford University Press, 2000, ISBN 978-0-19-850708-6.
17. Mark R.E., Habeger C., Borch J., Lyne M.B. (Eds.). *Handbook of Physical Testing of Paper*: Vol. 1, 2nd ed., CRC Press, 2002, DOI: 10.1201/9781482290103.
18. Pereira T., Neves A.S.L., Silva F.J.G., Godina R., Morgado L., Pinto G.F.L., *Production Process Analysis and Improvement of Corrugated Cardboard Industry*, "Procedia Manufacturing", Vol. 51, 2020, 1395–1402, DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.194.
19. Bujak J., *Energy savings and heat efficiency in the paper industry: A case study of a corrugated board machine*, "Energy", Vol. 33, No. 11, 2008, 1597–1608, DOI: 10.1016/j.energy.2008.07.005.
20. Reczulski M., *Formowanie papierów opakowaniowych i tektur wielowarstwowych*, „Przegląd Papierniczy”, Vol. 75, Nr 7, 2019, 419–423.

Setting the Parameters of Corrugated Board Production Using Linear Models of Dependencies Between Process Variables

Abstract: The article presents and compares selected techniques for the selection of parameters of the corrugated board production process based on linear models of relationships between process variables. The method of determining the parameters of these models is discussed, taking into account the practical knowledge and skills of operators conducting production. For this purpose, a system for measuring and recording the temperature of paper raw materials, the webs of the produced double-layer cardboard, the multi-layer board and the speed of the board of the produced cardboard was designed and installed in the industrial environment of the corrugator. The recorded data were analysed in order to develop and evaluate the suitability of selected models used to set initial parameters of cardboard production. The proposed approach allows the use of individual experience of each operator conducting production, which has a positive effect on the quality of the produced cardboard and the efficiency of the production process.

Keywords: corrugated board, process variables, production parameters, linear regression, principal components analysis

dr inż. Włodzimierz Szewczyk

wlodzimierz.szewczyk@p.lodz.pl
ORCID: 0000-0002-0178-2345

Uzyskał stopień doktora na Politechnice Łódzkiej w 1997 r. Do 2024 r. pełnił funkcję zastępcy dyrektora ds. rozwoju Centrum Papiernictwa i Poligrafii Politechniki Łódzkiej. Jest autorem lub współautorem dwóch książek i ponad 50 publikacji w czasopiśmie. Posiada sześć patentów. Jego działalność naukowa koncentruje się na badaniu właściwości wytrzymałościowych papierów, tektury i wyrobów z nich wykonanych.



dr inż. Paweł Pełczyński

pawel.pelczynski@p.lodz.pl
ORCID: 0000-0002-2228-8952

Uzyskał stopień doktora na Politechnice Łódzkiej w 2003 r. Obecnie pracuje w Centrum Papiernictwa i Poligrafii Politechniki Łódzkiej. Jest autorem lub współautorem ponad 25 publikacji w czasopiśmie i 20 publikacji konferencyjnych. Posiada cztery patenty. Jego obecne badania koncentrują się na metodach pomiarowych opartych na obrazach i ich zastosowaniu w badaniu wyrobów papierniczych.



mgr inż. Adam Łuc

adam.luc@rawibox.com.pl
ORCID: 0009-0002-8647-3361

Ukończył pierwszy stopień studiów na kierunku zarządzanie i inżynieria produkcji na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu, a drugi stopień na kierunku zarządzanie i inżynieria produkcji w Gdańskiej Szkole Wyższej. Odbił staż w dziale Administracji produkcji w VOLVO POLSKA, Wrocław. Jest starszym specjalistą ds. Technologii w firmie Rawibox S.A. Brał udział w realizacji projektu unijnego, ustalanie technologii wykonania produktów, analiza technologiczna oraz finansowa nowych projektów, wprowadzaniu norm ISO 9001 oraz ISO 14001.



Łukasz Wobik

lukasz.wobik@rawibox.com.pl
ORCID: 0009-0001-8509-7555

Absolwent technikum w Zespole Szkół Silesia: Czecho-wice-Dziedzice, Śląsk. Zdobył tytuł technika-elektryka. Od początku pracy związany z utrzymaniem ruchu. Pracował jako elektryk i automatyzm zdobywając doświadczenie w diagnostyce i naprawie systemów automatyki przemysłowej. Po kilku latach objął stanowisko technika utrzymania ruchu, gdzie poszerzył swoje kompetencje o naprawy układów pneumatycznych i hydraulicznych. Pracę w firmie Rawibox rozpoczął jako technik, a następnie awansował na lidera oraz na kierownika utrzymania ruchu.

