

**STUDIA I MONOGRAFIE**

**z. 325**

**Zbigniew PLUTECKI**

**Analiza wpływu mikroklimatu  
na emisję wyładowań niezupełnych  
maszyn elektrycznych**

**W WARUNKACH PRZEMYSŁOWEJ EKSPLOATACJI**



**POLITECHNIKA OPOLSKA**

ISSN 1429-6063

Opole 2012 ISBN 978-83-62736-78-8

## **POLITECHNIKA OPOLSKA**

### **KOMITET REDAKCYJNY**

Andrzej KNAPIK, Jan KUBIK,  
Tadeusz ŁAGODA – przewodniczący,  
Mariusz MIGAŁA, Iwona MULICKA,  
Jan SADECKI, Małgorzata WROBLEWSKA

### Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Gerhard BARTODZIEJ  
prof. dr hab. inż. Janusz JEŻOWIECKI

### Redaktor:

Jan SADECKI

Komitet Redakcyjny Wydawnictw Politechniki Opolskiej  
ul. Prószkowska 76

W badaniach wykorzystano czujniki pomiarowe wykonane w ramach projektu badawczego  
**Nr NN510 536639 „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych  
w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”**

**Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego**

Skład: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej  
Nakład: 150 egz. Ark. wyd. 17,5. Ark. druk. 17,0.  
Druk i oprawa: Sekcja Poligrafii Politechniki Opolskiej



# SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI .....	3
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	7
1. WPROWADZENIE .....	13
1.1. Wstęp .....	13
1.2. Zagadnienie emisji wyładowań niezupełnych w diagnostyce maszyn elektrycznych .....	13
1.3. Zagadnienie wpływu otaczającego środowiska na emisję <i>wnz</i> .....	15
1.4. Cele i zakres pracy .....	16
2. DIAGNOSTYKA STANU IZOLACJI UZWOJEŃ .....	19
2.1. Układ elektroizolacyjny maszyn elektrycznych .....	19
2.1.1. Konstrukcje i technologie wykonania układów izolacyjnych .....	19
2.1.2. Odporność układów izolacyjnych na temperaturę .....	23
2.2. Przyczyny występowania uszkodzeń izolacji uzwojeń .....	24
2.2.1. Narażenia elektryczne .....	25
2.2.2. Narażenia termiczne .....	28
2.2.3. Narażenia mechaniczne .....	29
2.2.4. Narażenia termomechaniczne .....	30
2.2.5. Narażenia klimatyczne .....	32
2.2.6. Narażenia chemiczne .....	33
2.2.7. Narażenia wywołane promieniowaniem .....	34
2.3. Warunki prawidłowej eksploatacji maszyn elektrycznych .....	34
2.4. Metody diagnostyki stanu izolacji uzwojeń .....	36
2.5. Diagnostyka stanu izolacji w oparciu o pomiar <i>wnz</i> .....	37
2.5.1. Mechanizm powstawania wyładowań niezupełnych .....	38
2.5.2. Wielkości opisujące emisję <i>wnz</i> .....	38
2.5.3. Metody pomiaru <i>wnz</i> .....	45
2.5.4. Systemy monitorowania on-line <i>wnz</i> .....	49
2.5.5. Interpretacja wyników pomiarowych .....	49

3. ZAKRES BADAŃ WRAZ Z CHARAKTERYSTYKĄ OBIEKTÓW BADAŃ I STOSOWANYCH NARZĘDZI.....	53
3.1. Ogólna charakterystyka obszaru i sposobu badań .....	53
3.2. Charakterystyka obiektów badań .....	55
3.3. Instalacja do pomiaru <i>wnz</i> .....	58
3.3.1. Instalacja do pomiaru <i>wnz</i> w napędzie SE-1 .....	58
3.3.2. Instalacja do pomiaru <i>wnz</i> w napędach SE-2 i SE-3.....	63
3.4. Instalacja do pomiaru drgań mechanicznych i innych wielkości procesowych.....	63
3.5. Instalacje do pomiaru mikroklimatu.....	67
3.6. Instalacje do pomiarów pomocniczych .....	71
3.7. Modelowanie zjawisk cieplnych i przepływowych .....	71
4. MODEL ZJAWISK CIEPLNO-PRZEPŁYWOWYCH ŚRODOWISKA PRACY MASZYN ELEKTRYCZNYCH.....	73
4.1. Koncepcja opisu zjawisk .....	73
4.2. Model zjawisk cieplnych i przepływowych .....	74
4.2.1. Wymiana ciepła na drodze konwekcji .....	74
4.2.2. Wymiana ciepła na drodze promieniowania .....	81
4.2.3. Przepływy wielofazowe .....	84
4.3. Implementacja modelu.....	85
4.3.1. Założenia i uproszczenia.....	85
4.3.2. Obszar obliczeniowy.....	87
4.3.3. Warunki brzegowe .....	87
4.3.4. Metodyka obliczeń .....	92
4.4. Testowanie poprawności działania modelu i weryfikacja eksperymentalna .....	95
5. WYNIKI POMIARÓW I BADAŃ SYMULACYJNYCH .....	97
5.1. Informacja ogólna.....	97
5.2. Metodyka oceny parametrów mikroklimatu.....	98
5.3. Warunki przemysłowej eksploatacji silnika SE-1 .....	101
5.3.1. Mikroklimat, badania bilansowe .....	101
5.3.2. Wyniki badań symulacyjnych .....	118

5.3.3.	Emisja wyładowań niezupełnych w silniku SE-1 .....	129
5.3.4.	Ważniejsze wnioski wynikające z prezentowanych wyników badań .....	139
5.4.	Warunki przemysłowej eksploatacji silnika SE-2.....	140
5.4.1.	Mikroklimat .....	140
5.4.2.	Emisja <i>wnz</i> w silniku SE-2.....	142
5.5.	Warunki przemysłowej eksploatacji generatora SE-3.....	146
5.5.1.	Mikroklimat .....	146
5.5.2.	Emisja <i>wnz</i> w generatorze SE-3 .....	148
5.6.	Podsumowanie .....	154
6.	ANALIZA WPŁYWU MIKROKLIMATU NA EMISJĘ <i>wnz</i> .....	157
6.1.	Wpływ temperatury na emisję <i>wnz</i> .....	157
6.1.1.	Analiza właściwości silnika SE-1.....	157
6.1.2.	Analiza właściwości silnika SE-2.....	163
6.1.3.	Analiza właściwości generatora SE-3 .....	166
6.2.	Wpływ wilgotności powietrza na emisję <i>wnz</i> .....	169
6.2.1.	Analiza właściwości silnika SE-1.....	169
6.2.2.	Analiza właściwości silnika SE-2.....	172
6.2.3.	Analiza właściwości generatora SE-3 .....	175
6.3.	Wpływ zapylenia na emisję <i>wnz</i> .....	179
6.4.	Wpływ drgań mechanicznych na emisję <i>wnz</i> .....	184
6.5.	Analiza wieloparametryczna .....	187
6.5.1.	Wyznaczenie obszarów występowania zróżnicowanej aktywności <i>wnz</i> ze względu na wskaźnik PPS .....	187
6.5.2.	Wyznaczenie obszarów występowania zróżnicowanej aktywności <i>wnz</i> ze względu na wskaźnik $Q_{max}$ .....	191
6.5.3.	Wyznaczenie obszarów występowania zróżnicowanej aktywności <i>wnz</i> ze względu na wskaźnik PDI .....	192
6.5.4.	Wyznaczenie zalecanych warunków mikroklimatycznych dla pracy maszyn elektrycznych .....	192
6.6.	Wnioski .....	193
7.	KONCEPCJA ROZBUDOWY SYSTEMU MONITOROWANIA EMISJI <i>wnz</i> .....	199
7.1.	Uwarunkowania zewnętrzne .....	199

7.2. Proponowany zakres zmian .....	199
7.3. Koncepcja modułu prognozowania emisji wnz oparta na zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych .....	201
7.4. Wskazówki do projektowania systemów grzewczo-wentylacyjnych pomieszczeń pracy maszyn elektrycznych.....	205
8. PODSUMOWANIE.....	209
LITERATURA .....	217
Spis załączników .....	233
Załącznik 1 .....	234
Załącznik 2 .....	244
Załącznik 3 .....	251
Załącznik 4 .....	258
Streszczenie .....	265
Summary.....	266

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

## A. Używane oznaczenia z wyłączeniem oznaczeń stosowanych przy opisie modelu zjawisk cieplnych i przepływowych

A, B, E, F, H	symbole klasy izolacji
C	pojemności układu izolacji
$C_b$	pojemność badanego uzwojenia
$C_b', C_b''$	pojemności składowe szeregowo inkluzji gazowej
CC	współczynnik korelacji wzajemnej
$C_C$	pojemność inkluzji gazowej
$C_s$	pojemność kondensatora impulsowego
D	wskaźnik kwadratowy
DMF	ang. <i>Dimethylformamide</i> , dimetyloformamid - organiczny związek chemiczny z grupy amidów
DD	ang. <i>Dielectric Discharge</i> , rozładowanie dielektryka
E	natężenie pola elektrycznego
f	częstotliwość sygnału, przebiegu napięcia
$f_1, f_{zasil}$	częstotliwość napięcia zasilania
G	wartość przyspieszenia ziemskiego
H	natężenia pola magnetycznego
$H_n(\varphi)$ ,	rozkład liczby impulsów wnz
$H_n(\varphi, q)$	rozkład trójwymiarowy obrazu ładunku wnz
HFCT	ang. <i>High Frequency Current Transformer</i> , przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości
I	średni prąd wyładowań wnz
$i_p$	prąd upływu
k	stała Boltzmanna
$k_t$	współczynnik temperaturowy izolacji
$L_1$	długość ochrony przeciwjarzeniowej czół
$L_2, L_3, L_4$	czas życia izolacji
m	współczynnik głębokości modulacji
N	liczba zarejestrowanych wyładowań wnz
n	częstość powtarzania impulsów wnz
$\underline{P}$	wektor polaryzacji
P	moc wyładowań
PD	ang. <i>Partial Discharge</i> , wyładowania niezupełne
PDI	ang. <i>Partial Discharge Intensity</i> , wskaźnik mocy wnz
PI	ang. <i>Polarization Index</i> , wskaźnik polaryzacji
PMV	ang. <i>Predicted Mean Vote</i> , średnia ocena komfortu
PPD	ang. <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> , odsetek osób niezadowolonych z warunków komfortu
PPS	ang. <i>Pulse Per Second</i> , wskaźnik intensywności wnz
$Q_{Amax}$	maksymalny ładunek przy pomiarze
$Q_m(Q_{max}), Q_{m+}$	współczynniki normalizujące dla polaryzacji dodatniej i ujem-

$Q_m$	nej impulsów <i>wnz</i>
$q$	ang. <i>Apparent Charge</i> , ładunek pozorny
$q_c$	ładunek rzeczywisty wyładowania
$q_i$	ładunek pozorny pojedynczego wyładowania
$q_{max}$	ładunek maksymalny wyładowań
NQN, NQN+, NQN-	ang. <i>Normalized Quantity Number</i> , współczynniki normalizujące całkowitej aktywności <i>wnz</i> przy danej polaryzacji
RFCT	ang. <i>Radio Frequency Current Transformer</i> , przekładnik prądowy częstotliwości radiowej
$R_{iz,t}$	oporność izolacji w temperaturze $t$
$R_C$	zastępcza rezystancja kanału wyładowania w jego źródle
RR	ang. <i>Resin-Rich</i> , izolacja termoutwardzalna
$R_{15}, R_{60}, R_{600}$	rezystancje izolacji po upływie 15, 60 i 600 sek. od momentu przyłożenia napięcia
$R_1, R_2, R_3$	rezystancje wewnętrzne izolacji
RMS	wartość skuteczna danej wielkości
RTD	ang. <i>Resistance Temperature Detector</i> , termorezystor
$s_{wnz}$	ang. <i>Skewness</i> , współczynnik skośności rozkładu dla <i>wnz</i>
SV	ang. <i>Step Voltage</i> , badanie napięciem narastającym schodkowo
SSC	ang. <i>Stator Slot Couplers</i> , antena paskowa w stojanie
$T$	przedział czasu pomiaru (rejestracji) lub temperatura
$T_{Cu}$	cieplna stała czasowa miedzi
$T_{Fe}$	cieplna stała czasowa żelaza
$t$	czas
$t_i$	chwila wystąpienia impulsu wyładowania
$t_u$	temperatura uzwojenia
$t_0$	czas trwania, czas impulsu
$U$	napięcie robocze
$U_a$	napięcie na zewnętrznych elektrodach układu – napięcie probiercze
$U_{cg}$	napięcie gaśnięcia wyładowań
$U_{cz}$	napięcie zapłonu wyładowań
$U_i$	wartości chwilowe napięcia
$U_j$	początkowe napięcie wyładowań
$U_0$	probiercze napięcie stałe
$U_{od}$	napięcie odbudowy w układzie izolacyjnym
$U_p$	napięcie próby odbiorczej
$U_{p0}$	średnie napięcie przebicia nowego układu izolacyjnego
$U_N$	napięcie znamionowe
VPI	ang. <i>Vacuum Pressure Impregnation</i> , izolacja wykonywana technologią próżniowo-ciśnieniową
$W$	energia aktywacji cząsteczki
$W_i$	energia pojedynczego $i$ -tego wyładowania
WN	wysokie napięcie, silniki wysokiego napięcia
<i>wnz</i>	wyładowania niezupełne
$S$	naprężenia mechaniczne

$S_N$	moc znamionowa pozorna silnika
$tg\delta$	współczynnik strat dielektrycznych
$\alpha_{Cu}$	współczynnik rozszerzalności cieplnej miedzi
$\alpha_{Fe}$	współczynnik rozszerzalności cieplnej rdzenia żelaza
$\varepsilon$	przenikalność dielektryczna
$\varepsilon_g$	przenikalność elektryczna inkluzji gazowej
$\varepsilon_S$	przenikalność elektryczna dielektryka izolacji
$\Delta\varepsilon$	polaryzowalność, przyrost przenikalności dielektrycznej
$\varphi_i$	kąt fazowy wystąpienia impulsu wyładowania <i>wnz</i>
$\varphi_{cz}, \varphi_{cq}$	kąty fazowe zapłonu i gaśnięcia wyładowań <i>wnz</i>
$\Delta\varphi$	zakresy fazowe wyładowań <i>wnz</i>
$\sigma$	konduktywność
$\tau$	czas trwałości materiału, czas relaksacji

## B. Oznaczenia stosowane przy opisie zjawisk cieplnych i przepływowych

$a$	współczynnik absorpcji promieniowania,
$c$	stała zależna od typu i rodzaju źródła ciepła,
$c_p$	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
$e$	gęstość strumienia energii promienistej,
$f$	gęstość jasności,
$g$	przyśpieszenie ziemskie,
$g_x, g_y, g_z$	składowe przyśpieszenia ziemskiego,
$k$	współczynnik przenikania ciepła (obecne oznaczenie U),
$k$	energia kinetyczna turbulencji,
$m_p$	strumień masy powietrza infiltrującego,
$m_g$	strumień masy czynnika przepływającego przez silnik,
$n$	indeks refrakcyjny ,
$\vec{n}$	wektor normalny,
$p$	ciśnienie,
$p_a$	ciśnienie cząstkowe pary wodnej,
$q$	gęstość strumienia ciepła,
$q_{r,w}$	wymieniany na drodze promieniowania strumień ciepła przez prze- grode,
$\vec{r}$	wektor położenia,
$\vec{s}$	wektor kierunku promieniowania,
$\vec{s}'$	wektor kierunkowy rozpraszania energii,
$t$	czas,
$\Delta t$	przyrost czasu lub czasowy zakres uśredniania,
$u$	prędkość,
$u_x, u_y, u_z$	składowe wektora prędkości, $\vec{u} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j} + u_z \vec{k}$
$v_{ar}$	względna prędkość przepływu powietrza,

$v_w$	wartość prędkości wiatru w pobliżu rozpatrywanej przegrody,
$y_p$	odległość punktu P od ścianki,
$A$	pole powierzchni,
$A_i$	pole powierzchni rozpatrywanej przegrody,
$\vec{A}$	wektor pola powierzchni,
<i>CAD</i>	ang. <i>Computer Aided Design</i> , komputerowe wspomaganie projektowania,
<i>CAE</i>	ang. <i>Computer Aided Engineering</i> , komputerowe wspomaganie prac inżynierskich,
<i>CFD</i>	ang. <i>Computational Fluid Dynamics</i> , numeryczna mechanika płynów i wymiana ciepła,
$C_{1\phi}$ , $C_{1\sigma}$ , $C_2$ , $C_{3\epsilon}$	współczynnik modelu turbulencji,
$C_\mu$	współczynnik modelu turbulencji,
$E$	stała w logarytmicznym prawie ścianki,
$F$	jasność powierzchni,
$G$	wypadkowa wartość energii promieniowania,
$Gr$	liczba kryterialna <i>Granshofa</i> ,
$G_b$	powstawanie energii kinetycznej turbulencji spowodowanej efektem wyporności dla przepływu turbulentnego,
$G_k$	powstawanie energii kinetycznej turbulencji w wyniku oddziaływania średniego gradientu prędkości,
$J_c$	intensywność promieniowania,
$L$	charakterystyczny wymiar liniowy,
<i>MES</i>	metoda elementów skończonych,
<i>MOS</i>	metoda objętości skończonych,
<i>MRS</i>	metoda różnic skończonych,
$Pr$	liczba kryterialna <i>Prandtla</i> ,
$Q$	strumień ciepła,
$Q_g$	strumień ciepła dostarczany przez silnik,
$Ra$	liczba kryterialna <i>Rayleigha</i>
$R_m$	opór przewodzenia ciepła przegrody wielowarstwowej,
$S_\phi$	składnik źródłowy zmiennej $\phi$ ,
$T$	temperatura,
$T_a$	temperatura powietrza,
$T_o$	temperatura w dużej odległości od powierzchni wymiany ciepła,
$T_s$	temperatura ścianki,
$T_r$	temperatura promieniowania,
$T_w, t_w$	temperatura powierzchni ciała stałego,
$T_{zew i}$	temperatura powietrza na zewnątrz rozpatrywanej przegrody,
$\bar{T}_r$	średnia temperatura promieniowania,
$t_a$	mierzona temperatura powietrza,
$t_d$	mierzona temperatura punktu rosy,
$t_g$	mierzona temperatura czarnej kuli,
$t_h$	mierzona temperatura wilgotna wentylowana,
$t_o$	temperatura odczuwalna,
$t_r$	temperatura promieniowania,



$U$	prędkość przepływu niezakłóconego,
$U_p$	prędkość płynu w punkcie przyległym do ścianki,
$X$	zawartość wilgoci w powietrzu, wilgotność bezwzględna,
$\alpha_c$	współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję,
$\alpha_i, \alpha_e$	współczynniki przejmowania ciepła,
$\beta$	temperaturowy współczynnik rozszerzalności objętościowej,
$\delta_i$	grubość warstwy $i$ ,
$\delta\rho$	zmiana gęstości,
$\varepsilon$	współczynnik emisji promieniowania lub prędkość dyssypacji energii turbulencji,
$\varepsilon_w$	współczynnik emisji promieniowania danej powierzchni ciała stałego,
$\varphi, RH$	wilgotność względna powietrza,
$\phi$	dowolna wielkość skalarna,
$\eta$	wartość chwilowa zmiennej,
$\bar{\eta}$	wartość średnia zmiennej w przedziale czasu $\Delta t$ ,
$\eta'$	składowa pulsacyjna zmiennej,
$\varphi$	współczynnik konfiguracji elementarnej powierzchni,
$\kappa$	stała <i>Karmana</i> , $\kappa = 0,42$ ,
$\lambda$	współczynnik przewodzenia ciepła rozpatrywanego materiału,
$\lambda_i$	współczynnik przewodzenia ciepła warstwy $i$ ,
$\mu$	współczynnik lepkości dynamicznej,
$\mu_{ef}$	efektywny współczynnik lepkości,
$\mu_t$	turbulentny współczynnik lepkości,
$\nu$	współczynnik lepkości kinematycznej,
$\rho$	gęstość,
$\rho_w$	współczynnik odbicia promieniowania na powierzchni ciała stałego,
$\sigma$	naprężenia normalne,
$\sigma$	stała <i>Stefana-Boltzmana</i> ( $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ),
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	turbulentne liczby <i>Prandtla</i> w modelu turbulencji $k$ i $\varepsilon$ ,
$\sigma_s$	współczynnik rozpraszania promieniowania,
$\tau$	naprężenia styczne, czas,
$\tau_w$	naprężenia styczne na powierzchni ścianki,
$\Phi$	funkcja dysypacji (rozpraszania energii) lub funkcja fazowa definiująca rozkład kąta bryłowego promieniowania rozproszonego dla promienia padającego w kącie bryłowym, lub współczynnik wzajemnej konfiguracji powierzchni,
$\Gamma_\phi$	współczynnik dyfuzji w ogólnym równaniu transportu,
$\Omega'$	kąt bryłowy opisany w przestrzeni trójwymiarowej,
$dT$	zmiana temperatury,
$dx$	odcinek wzdłuż kierunku przepływu ciepła,



# 1. WPROWADZENIE

## 1.1. Wstęp

Użytkownicy maszyn elektrycznych wysokiego napięcia stanowiących odpowiedzialne napędy z punktu widzenia realizowanych procesów technologicznych są poddawani ciągłej presji otoczenia wynikającej z coraz większych oczekiwań w zakresie wysokiej efektywności i niezawodności pracy tych urządzeń. Od inżynierów żąda się, aby naturalny proces starzenia się elementów maszyn przebiegał jak najwolniej i w sposób na tyle kontrolowany, aby nie dopuścić do powstania zatrzymań procesów produkcyjnych wynikających z awarii i uszkodzeń.

W celu sprostania oczekiwaniom, wielu użytkowników stosuje narzędzia do ciągłej obserwacji stanu technicznego swoich maszyn podczas ich normalnej eksploatacji [48, 134, 217, 220, 221]. Systemy te są najczęściej stosowane do monitorowania i diagnozowania stanu łożysk tocznych jako tych elementów, które zużywają się najszybciej [220]. Coraz częściej monitoring stanu technicznego maszyn elektrycznych jest stosowany do oceny stanu izolacji uzwojeń stojanów [48, 140, 221]. Na podstawie obserwowanych trendów zmian badanych parametrów technicznych można podejmować na bieżąco decyzje o pracach remontowych i ewentualnych modernizacjach w taki sposób, aby okres przestoju był jak najkrótszy, a koszt remontu minimalny.

Efektywna organizacja procesów zmierzających do bieżącej oceny stanu technicznego badanych elementów maszyn elektrycznych, podczas ich przemysłowej eksploatacji, jest obecnie podstawowym zadaniem nowoczesnej diagnostyki technicznej [22, 31, 175, 177, 220].

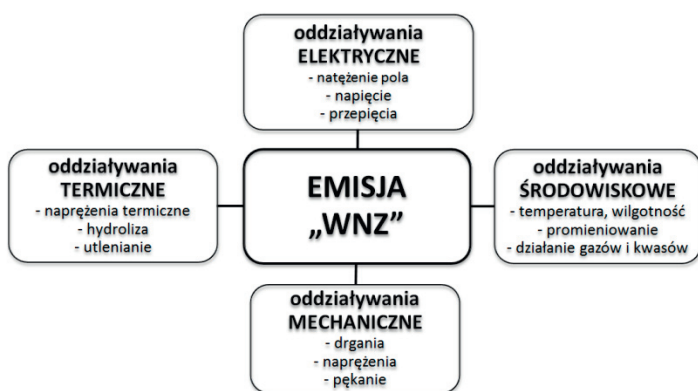
## 1.2. Zagadnienie emisji wyładowań niezupełnych w diagnostyce maszyn elektrycznych

Prawidłowa i długotrwała eksploatacja maszyn elektrycznych wymaga znajomości wielu złożonych zagadnień z zakresu zjawisk elektrycznych, termicznych, mechanicznych, termomechanicznych, ciepłno-przepływowo- promieniowania czy zjawisk chemicznych [11, 28, 141, 142, 220]. Elementami maszyn elektrycznych najbardziej narażonymi na działanie wszystkich wyżej wymienionych zjawisk jednocześnie są izolacje uzwojeń stojana i wirnika. Izolacja uzwojeń stojana dodatkowo narażona jest na emisję wyładowań niezupełnych (*wnz*), których natura i przebieg może w konsekwencji doprowadzić do trwałego jej uszkodzenia [1, 11, 19, 20, 23, 38, 220].

Wielu autorów [1, 13, 21, 24, 30, 65, 66, 73, 81, 82, 84, 87, 112, 113, 177, 183, 190, 191, 213, 220] wskazuje, że pomiar emisji wyładowań niezupełnych podczas eksploatacji maszyn dostarcza cennych informacji o jakości technologii wykonania maszyny i o aktualnym stanie układów izolacyjnych jej uzwojeń.

Śledzenie zmian *wnz* w długich okresach czasu dzięki zastosowaniu systemów monitorowania *on-line* pozwala śledzić proces starzenia układów izolacyjnych i dzięki temu odpowiedzialnie planować przerwy serwisowe, remontowe i modernizacyjne [142, 175, 193, 221, 238, 247].

Na wielkość emisji *wnz* w układach izolacyjnych wysokiego napięcia mają wpływ czynniki inicjujące w postaci wewnętrznych defektów struktury albo gdy sprzyja im usytuowanie zewnętrznych elektrod tego układu [65]. Wyładowania rozwijają się głównie w defektach zwanych inkluzjami i porami, gdy występują mikrostrza w gazie lub w dielektryku stałym i na powierzchniach granicznych między dielektrykiem stałym i gazowym. Pod wpływem oddziaływań elektrycznych, cieplnych, mechanicznych oraz otaczającego środowiska następuje łączenie się inkluzji w większe wtrąciny gazowe, co prowadzi do intensyfikacji emisji *wnz* (rys.1.1).



**Rys. 1.1.** Czynniki wpływające na wielkość emisji wyładowań niezupełnych

Gdy izolacja ulega degradacji, częstość i intensywność *wnz* wzrasta [23, 24, 81, 88, 221]. W dużych generatorach i silnikach wysokiego napięcia próby oceny stanu uzwojeń poprzez rejestrację *wnz* są z powodzeniem realizowane już od drugiej połowy ubiegłego wieku [23, 81]. Choć wielkość impulsów *wnz* nie przekłada się bezpośrednio na prognozę czasu „życia” badanego uzwojenia to metody pomiaru *wnz* i wykorzystania ich w ocenie stanu technicznego izolacji uzwojeń są cały czas rozwijane i udoskonalane [21, 82, 81, 84, 221, 235]. Rezultatem tych prac jest cały czas rozszerzana oferta komercyjnych systemów do pomiaru i monitoringu *wnz*. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć systemy firm *Iris*, *Eaton*, *Adwel* czy *Vibrocenter* [1, 24, 61, 81, 103, 190, 191]. Firmy te preferują systemy przeznaczone do pomiaru *wnz* podczas normalnej pracy maszyn elektrycznych (systemy *on-line*).

Do niedawna systemy monitorowania *on-line* były trudne do praktycznego zastosowania z uwagi na obecność występujących zakłóceń elektrycznych, np. od pracujących podzespołów elektrycznych, wyładowań koronowych pochodzą-

cych od aparatury rozdzielczej czy innych lokalnych źródeł fal radiowych nie pochodzących od uzwojeń izolacji [21, 29, 220].

Obserwowanie *wnz* w stałych odstępach czasu pozwala na obserwację procesu starzenia się izolacji uzwojeń badanej maszyny [21, 23, 29, 81, 190, 192, 198, 203, 206, 207, 220]. Pogarszanie się stanu izolacji z powodu emisji *wnz* jest procesem powolnym. Na podstawie tych obserwacji nie można jednoznacznie wskazać momentu awarii. Ostateczne uszkodzenie izolacji może bowiem nastąpić z innego powodu, jak np. gwałtownego włączenia lub wyłączenia maszyny (obciążenie udarowe), słabej synchronizacji czy dynamicznych zmian obciążenia maszyny, doprowadzając do przebicia izolacji w najsłabszym punkcie.

Wykrywanie wyładowań niezupełnych wiąże się z pomiarem wielkości charakteryzujących przebieg emisji *wnz*. Do najważniejszych w nich należy zaliczyć wielkość wyładowań, liczbę impulsów, charakter polaryzacji wyładowań czy położenie wyładowań na przebiegu napięcia pomiędzy fazą a uziemieniem [65, 66, 67, 141, 220]. Każdy z tych parametrów pozwala oceniać inne cechy defektów. Na przykład wielkość wyładowania mówi o wielkości lub objętości wtrącin gazowych, wskaźnik liczby impulsów wskazuje na liczbę pustych przestrzeni lub defektów, znak polaryzacji ładunków wskazuje na położenie inkluzji w izolacji względem miedzi i stali, a położenie *wnz* względem wykresu fazowo-rozdzielczego odnosi się do położenia defektów w szczelinie lub w czole uzwojeń [81].

Rejestrowane wyniki pomiarów *wnz* dla danej maszyny można analizować, jeśli zostały wykonane przy podobnych parametrach pracy (obciążenie, temperatura, wilgotność) oraz jeśli zostały wykonane przy użyciu tych samych narzędzi pomiarowych [81]. Możliwe jest również przybliżone porównywanie wyników uzyskanych przy badaniu jednej maszyny z wynikami maszyn podobnych, ale tylko wtedy, gdy pomiary wykonano przy użyciu takich samych czujników, przyrządów pomiarowych, przy użyciu tej samej metody kalibracji oraz gdy pomiary wykonywano w zbliżonych warunkach środowiskowych. Z dostępnych analiz statystycznych wynika, że typ maszyny nie ma dużego wpływu na poziom emisji *wnz*. Na wyniki porównań silnie wpływa zmienność obciążenia momentem i temperatura otoczenia pracy [1, 81, 190, 191, 217]. Te czynniki w dużym stopniu zależą od typu i stanu technicznego systemu izolacji. Pozostałe zmienne robocze: napięcie i czynnik chłodzący, muszą być podobne.

### **1.3. Zagadnienie wpływu otaczającego środowiska na emisję *wnz***

Warunki środowiskowe w jakich pracują maszyny elektryczne mogą determinować czas ich bezawaryjnej eksploatacji [14, 81, 174, 178, 179, 190, 220]. Wielu autorów wskazuje, że nieprzestrzeganie wymagań producentów w tym zakresie może prowadzić do przegrzewania się uzwojeń, niedotrzymywania deklarowanych parametrów eksploatacyjnych, obniżenia sprawności, czy w dłuższym okresie czasu do przedwczesnego starzenia się układów izolacyjnych uzwojeń [81, 178, 220].

Według różnych ośrodków badających przyczyny uszkodzeń maszyn elektrycznych, udział czynników związanych z oddziaływaniem otoczenia w jakich pracują maszyny szacowany jest między 32 a 39% [179, 246]. Duży udział tych awarii i uszkodzeń wynika ze zbyt wysokiej lub zbyt niskiej temperatury i wilgotności powietrza oraz z nieprawidłowego przewietrzania izolacji uzwojeń silników. Te przyczyny stanowią aż 12,7% wszystkich uszkodzeń [18, 246]. Jedną z głównych przyczyn takiego stanu rzeczy jest niedocenianie wpływu parametrów środowiska na jakość pracujących elementów.

Wpływ temperatury roboczej może silnie wpływać na wyniki mierzonej emisji *wnz* [24, 81]. Kompozycje materiałowe stosowane do budowy izolacji uzwojeń różnie reagują na zmiany temperatur. Zmiany te mogą być nieznaczne w przypadku niewielkich zmian temperatury pracy rzędu  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  bądź drastyczne, gdy różnice temperatur sięgają  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  i więcej.

Duży, choć nie do końca przewidywany wpływ na emisję *wnz* ma wilgotność powietrza. Dotyczy to głównie maszyn chłodzonych powietrzem. Wilgotność może obniżyć wytrzymałość powietrza na przebicie elektryczne, a przez to spowodować wzrost emisji *wnz* na powierzchni izolacji. Dowiedziono w literaturze, że w niektórych sytuacjach wpływ wilgotności powoduje wahania *wnz* aż o 300% [81]. Ponieważ każdy scenariusz jest inny, jest niezwykle ważne, aby podczas badań rejestrować wilgotność otoczenia, tak, aby można było należycie ocenić trendy i nie podejmować decyzje na podstawie rosnących trendów, które mogą być spowodowane wpływami wilgotności a nie zmianami stanu uzwojenia. Obecne doświadczenie wskazuje, że wilgotność wpływa tylko na aktywność powierzchniową *wnz* [81].

#### 1.4. Cele i zakres pracy

Głównym celem pracy jest dokonanie analizy określającej wpływ wybranych wielkości mikroklimatu na emisję wyładowań niepełnych w indukcyjnych maszynach elektrycznych wysokiego napięcia w warunkach przemysłowej eksploatacji oraz wskazanie na jej podstawie zaleceń dla właściwej eksploatacji tych maszyn.

Celem poznawczym pracy jest teoretyczna i eksperymentalna analiza określająca jakościowy i ilościowy wpływ temperatury, wilgotności, zanieczyszczeń powietrza oraz drgań mechanicznych na poziom emisji wyładowań niepełnych jako tego parametru, który w sposób obiektywny pozwala monitorować stan techniczny izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych podczas ich pracy w różnych warunkach eksploatacyjnych i środowiskowych.

Celem użytkowym jest opracowanie metody pozwalającej na określanie właściwych warunków mikroklimatycznych, przy których eksploatacja maszyn elektrycznych będzie przebiegać w stopniu najmniej obciążającym stan izolacji uzwojeń. Dzięki temu możliwe będzie wykorzystywanie systemów grzewczo-wentylacyjnych do kształtowania właściwego mikroklimatu w środowisku pracy maszyn.

Zakres monografii obejmuje:

- opracowanie kompleksowej metodyki pomiaru emisji wyładowań niezupełnych oraz wybranych wielkości mikroklimatu w celu prowadzenia przedmiotowej analizy,
- charakterystykę obiektów badań oraz opis instalacji badawczych wykorzystanych do badań eksperymentalnych,
- realizację długoterminowych badań eksperymentalnych wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych podczas przemysłowej eksploatacji silników i generatora WN,
- opracowanie wyników badań (analiza wieloparametryczna),
- analizę wpływu badanych wielkości mikroklimatu na emisję *w<sub>nz</sub>* wraz z podaniem metodyki określania właściwych warunków komfortu cieplnego,
- opracowanie założeń i dobór modeli matematycznych pozwalających na opis zjawisk cieplnych i przepływowych jakie towarzyszą pracy maszyn elektrycznych w pomieszczeniu ich pracy przy uwzględnieniu złożonej wymiany ciepła oraz wentylacji pomieszczeń,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych zjawisk cieplnych i przepływowych obejmujących w szczególności przypadki występowania konwekcji naturalnej, konwekcji wymuszonej, konwekcji wymuszonej połączonej ze zjawiskiem promieniowania oraz różnych warunków pracy silników dla modelowego pomieszczenia,
- eksperymentalną weryfikację wyników obliczeń symulacyjnych zjawisk cieplnych i przepływowych w celu potwierdzenia poprawności przyjętych założeń, doboru modeli i warunków brzegowych,
- przeprowadzenie analizy wyników obliczeń symulacyjnych zjawisk cieplnych i przepływowych z punktu widzenia wpływu warunków i sposobu eksploatacji maszyn elektrycznych na możliwość zapewnienia komfortu cieplnego,
- ocenę możliwości wykorzystania opracowanego modelu do prognozowania warunków komfortu cieplnego maszyn elektrycznych już w fazie projektowania instalacji przemysłowych.





## **2. DIAGNOSTYKA STANU IZOLACJI UZWOJEŃ**

### **2.1. Układ elektroizolacyjny maszyn elektrycznych**

Głównym zadaniem układu elektroizolacyjnego maszyn elektrycznych jest niedopuszczenie do powstania przepływu prądu między elementami obwodu elektrycznego a elementami obwodu magnetycznego i konstrukcją maszyny oraz odizolowanie poszczególnych elementów tego samego obwodu elektrycznego [44, 45, 46].

Izolacja uzwojeń maszyn elektrycznych WN powinna zapewnić okres użytkowania tych maszyn w przewidzianych dla nich warunkach eksploatacji przez okres nie krótszy niż 15÷20 lat. Z praktyki eksploatacyjnej znane są przypadki, gdy silniki lub generatory WN są eksploatowane 30÷40 lat bez ich przewijania [220].

Dobre wykonanie układu elektroizolacyjnego jest jednym z trudniejszych zadań konstrukcyjnych i technologicznych budowy maszyn elektrycznych [44, 45, 46, 84, 129, 131, 138, 206, 207, 208, 220]. Obwody elektryczne silników muszą być odizolowane od pozostałych elementów tworzących ich konstrukcję. Współczesne znaczenie pojęcia układ elektroizolacyjny odnosi się nie tylko do użytych w maszynie materiałów elektroizolacyjnych, ale obejmuje również konstrukcję uzwojenia, klinowanie w żłobkach rdzenia stojana oraz mocowanie części czołowej [138, 208, 220].

O jakości układów izolacyjnych decydują użyte materiały oraz technologia wykonania. Dielektryki stałe są elementami poddawanyymi naprężeniom mechanicznym, zmianom temperatury i różnym oddziaływaniom środowiska. Muszą zatem spełniać określone wymagania elektryczne, mechaniczne, cieplne i mieć odpowiednią odporność na działanie środowiska. Najważniejszymi parametrami elektrycznymi dielektryków są: rezystywność skrośna i powierzchniowa, przenikalność elektryczna i współczynnik strat dielektrycznych, wytrzymałość elektryczna, odporność na działanie łuku elektrycznego i powierzchniowych prądów pełzających oraz odporność na wyładowania niezupełne, a także podatność na elektryzację [138].

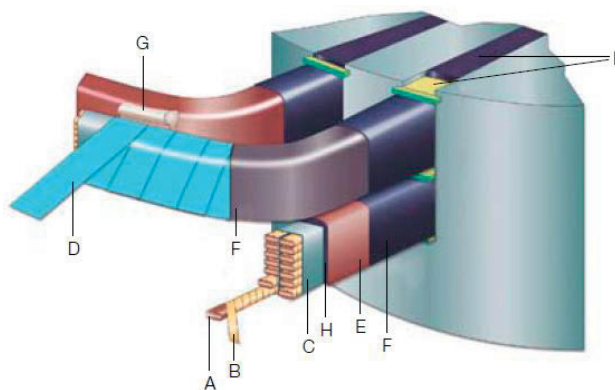
#### **2.1.1. Konstrukcje i technologie wykonania układów izolacyjnych**

Zagadnienia związane z konstrukcją układu izolacyjnego maszyn elektrycznych są przedmiotem wielu publikacji krajowych i zagranicznych. Do ważniejszych należy zaliczyć [44, 45, 55, 65, 66, 84, 127, 183, 207, 209, 211, 213]. Główny obszar zainteresowań powyższej literatury to analiza właściwości cech konstrukcyjnych w zakresie geometrii, materiałoznawstwa, jakości i niezawodności wykonania układu izolacyjnego [44, 45, 213, 220]. Biorąc pod uwagę obszerność zagadnień związanych z tematyką układów elektroizolacyjnych oraz specyfikę niniejszej monografii i zakres prowadzonych badań, autor ograniczy się tylko do niektórych wybranych spośród tych zagadnień.

Konstrukcja układu elektroizolacyjnego maszyn elektrycznych ma zapewnić jej niezawodność i długotrwałość w różnych warunkach eksploatacyjnych. Układ izolacyjny dobierany jest w zależności od wymagań technicznych, jakie ta maszyna powinna spełniać ze względu na warunki pracy, ale również ze względu na możliwości technologiczne i wykonawcze producenta lub zakładu remontowego. Bardzo istotnym kryterium wyboru typu izolacji są własności i charakterystyka użytych materiałów elektroizolacyjnych oraz technologia wykonania. Te ostatnie parametry bezpośrednio przekładają się na ostateczny koszt izolacji w cenie zakupu maszyny elektrycznej, który może sięgać 35% całkowitego kosztu zakupu [44, 45, 220].

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat ukształtował się pewien schemat konstrukcji ochrony uzwojeń maszyn elektrycznych wysokiego napięcia [44, 45, 213, 220]. Ideogram tego rozwiązania przedstawiono na rysunku 2.1. Izolacja w tym rozwiązaniu dzieli się na izolację główną (D), tj. izolację względem pozostałych elementów konstrukcyjnych maszyny i innych obwodów elektrycznych oraz izolację zwojową (B) izolującą elementy tego samego obwodu elektrycznego między sobą [213]. Podział ten wynika między innymi z możliwości pomiarowych [220].

Ze względu na dielektryczne warunki pracy, w układzie elektroizolacyjnym można wyodrębnić następujące trzy strefy: żłobkową, przejściową (po wyjściu boków cewek ze żłobków) oraz czołową (czoła uzwojeń) [104].



**Rys. 2.1.** Obraz konstrukcji układu elektroizolacyjnego: przewody miedziane (A), izolacja przewodu (B), materiały na łączenie pakietów (C), materiały na izolację główną (H) wykonane w technologii: *VPI* – taśma mikowa (D) + żywica (H) lub w technologii *Resin-Rich* – taśmy mikowe (D), farba przewodząca lub taśma przewodząca w części żłobkowej (F) oraz taśma półprzewodząca w części czoł cewek, taśmy wykończeniowe lub uszczelniające (E), materiały usztywniające (G) i wzmacniające kliny i podkładki pod kliny (I) [220]

Stosowane do produkcji układów elektroizolacyjnych materiały to głównie termoutwardzalny kompozyt typu *epoxy-mika-szkło* [208, 211, 212, 213, 220]. Producenci materiałów elektroizolacyjnych opracowują kompletne układy izolacyjne dedykowane do zastosowań w maszynach elektrycznych, dobierając okre-

ślone udziały poszczególnych komponentów i materiały, jak również technologię wykonania. Producenci maszyn elektrycznych najczęściej nadają im swoje nazwy, które umieszczają w dokumentacjach techniczno-ruchowych (DTR) tych maszyn. I tak w maszynach elektrycznych produkcji *Westinghouse Electric Co.* można spotkać nazwy [208]: *Thermalastic*<sup>TM</sup>, *Neccobond*<sup>TM</sup>, *Micalastic*<sup>TM</sup>. W maszynach *General Electric* występują nazwy: *Micapals I i II*<sup>TM</sup>, *Epoxy Mica Mat*<sup>TM</sup>, *Micapal HT*<sup>TM</sup>, *Hydromat*<sup>TM</sup> [158]. W maszynach produkcji *Alsthom*, *GEC Alsthom*, *Alsthom Power* występują nazwy układów izolacyjnych: *Isotenax*<sup>TM</sup>, *Resitherm*<sup>TM</sup>, *Resiflex*<sup>TM</sup>, *Resivac*<sup>TM</sup>, *Duritenax*<sup>TM</sup> [158]. *Siemens AG* i *KWU* produkuje maszyny elektryczne, w których stosuje układy izolacyjne o nazwie: *Micalastic*<sup>TM</sup>. W maszynach produkcji *ABB Industric AG* występują układy o nazwie: *Micadur*<sup>TM</sup>, *Micadur Compact*<sup>TM</sup>, *Micapact*<sup>TM</sup> i *Micarex*<sup>TM</sup> [158]. Maszyny elektryczne produkcji *Toshiba Corporation* mają układy izolacyjne: *Tosrich*<sup>TM</sup> i *Tostight-I*<sup>TM</sup> [158]. Firma *Hitachi Ltd* stosuje układy izolacyjne o nazwie: *Hi-Resin*<sup>TM</sup>, *Hi-Mold*<sup>TM</sup>, *Super Hi-Resin*<sup>TM</sup> [208].

Obecnie na świecie dominują dwie podstawowe technologie wykonywania izolacji w produkcji nowych silników i generatorów WN [208, 213, 220, 247]. W zależności od technologicznego zaawansowania producenta spajanie materiałów izolacyjnych w jeden układ izolacyjny wykonuje się albo poprzez przesycaanie żywicą kolejnych warstw miki i maty szklanej wraz z późniejszym formowaniem w wysokiej temperaturze (technologia *Resin-Rich*) albo w technologii ciśnieniowo-próżniowej impregnacji (technologia *VPI*). W eksploatacji w krajowych zakładach przemysłowych można jeszcze spotkać silniki z izolacją ciągłą *kompaudowaną* [220].

Izolacja *Resin-Rich* charakteryzuje się stosowaniem taśm mikowych z dużą zawartością żywicy (około 40%). Taśmy te po nałożeniu na cewkę muszą być sprasowane oraz wymagają utwardzenia w podwyższonej temperaturze. Część żłobkową cewki umieszcza się w odpowiednim oprzyrządowaniu dostosowanym do wymiarów cewki, a następnie prasuje i utwardza w prasie hydraulicznej [30, 213, 220, 247]. Można wyodrębnić dwa rodzaje izolacji *Resin-Rich* [212, 213, 220]: izolację mieszaną i izolację ciągłą.

Cechą charakterystyczną izolacji mieszanej jest zastosowanie różnego rodzaju taśmy mikowej w części prostej (żłobkowej) i w części czołowej. Taśma w części prostej musi być sprasowana i utwardzona tak, aby uzyskać właściwe parametry izolacji i aby zmieściła się w żłobku. Taśma stosowana w części czołowej cewki posiada żywicę już utwardzoną lub utwardzenie następuje w czasie pracy silnika. Taśmy stosowane na część czołową cewki muszą pozostawać elastyczne nawet po utwardzeniu. Umożliwia to między innymi końcowe ukształtowanie czoła cewki podczas montażu uzwojenia w stojanie. Niewłaściwe wykonanie połączenia tych dwóch rodzajów izolacji: części prostej i części czołowej niesie ryzyko uszkodzenia izolacji w tym właśnie miejscu. W przypadku awarii najczęściej dochodzi do przebicia, na połączeniu dwóch rodzajów izolacji. To jest najłabszy punkt tego rozwiązania technologicznego [212, 220].

Izolacja ciągła nie ma mankamentów izolacji mieszanej. Na całej długości uzwojenia jest zastosowana taka sama taśma mikowa. Część prosta i część czołowa muszą być sprasowane i utwardzone w tym samym czasie. Nie ma możliwości dodatkowego kształtowania czoł cewek w trakcie końcowego montażu. Czoła muszą być bardzo dokładnie uformowane w czasie produkcji uzwojenia. Wymaga to dysponowania specjalistycznym oprzyrządowaniem do wykonania izolacji na czołach. Podnosi to wyraźnie koszty tej technologii.

Dla ograniczenia wyładowań niezupełnych (*wnz*) w technologii *Resin-Rich* stosowany jest system ochrony przeciwjarzeniowej [44, 208, 220]. Służą do tego materiały przewodzące i półprzewodzące w postaci lakierów i taśm, zastosowane w miejscach największych narażeń. Gotowe uzwojenie wykonane w technologii *Resin-Rich* należy już na etapie produkcji poddać badaniom diagnostycznym [208, 220].

Izolacja *VPI* jest stosowana w różnych odmianach. Układ izolacyjny bazuje na materiałach porowatych [30, 208, 221, 247]. Cewki posiadają izolację główną ciągłą, wykonaną z taśm mikowych w stanie nieutwardzonym. Następnie tymi cewkami zwoi się rdzeń stojana bez kadłuba. Układ izolacyjny silnika uzyskuje się w procesie impregnacji próżniowo-ciśnieniowej w żywicach poliestrowych lub epoksydowych i utwardzeniu w piecu [208, 213, 220]. Parametry impregnacji dobiera się w zależności od rodzaju materiałów izolacyjnych i grubości izolacji. Sam proces jest zaprogramowany i przebiega automatycznie. Najważniejsze parametry procesu takie jak: ciśnienie, wielkość próżni, temperatura i pojemność elektryczna uzwojeń są na bieżąco mierzone oraz analizowane. Pojemność elektryczna układu izolacyjnego powinna się podczas impregnacji ustabilizować na najmniejszej wartości [220].

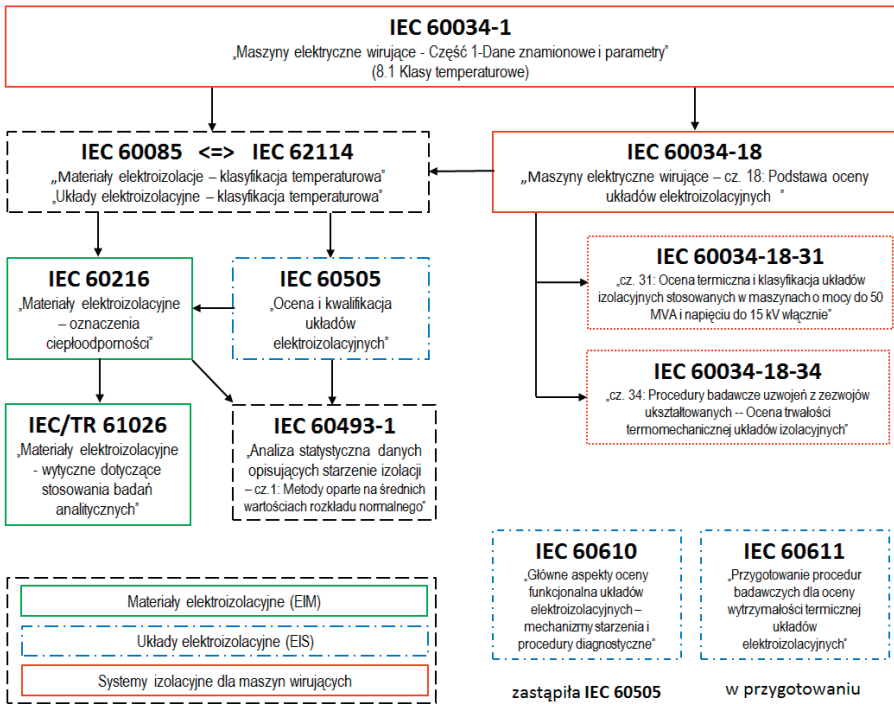
Ze względu na budowę monolityczną uzwojenia, w zasadzie nie jest możliwe wymiana pojedynczej cewki w przypadku awarii jednej czy kilku cewek. Żywicę trzeba wytopić w piecu, całe uzwojenia niezależnie od ilości uszkodzonych cewek jest złomowane i bardzo często pakiet nie nadaje się do powtórnego wykorzystania. Dlatego aby uniknąć ewentualnych dużych kosztów napraw na poszczególnych etapach produkcji uzwojenia i wykonywania układu izolacyjnego, stosuje się pomiary kontrolne, próby napięciowe i diagnostykę.

W silnikach i generatorach średnich i dużych mocy uzwojenie stojana jest dwuwarstwowe [44, 45, 126, 127, 208]. Przewód nawojowy jest z miedzi elektrolitycznej profilowanej o przekroju prostokątnym z zastosowaniem różnych rodzajów izolacji (rys. 2.1). Warstwa ochronna przeciwjarzeniowa zapewnia właściwy rozkład potencjału, niweluje szczególne nierównomierności pola elektrycznego, zwłaszcza w miejscach wyjścia boku cewki ze żłobka. W części żłobkowej jest to lakier lub taśma przewodząca o rezystywności powierzchniowej  $10^3 \div 10^6 \Omega$ . W części czołowej uzwojenia nakłada się lakier lub taśmę półprzewodzącą o rezystywności  $10^6 \div 10^{12} \Omega$  zależnie od napięcia [44, 45, 208, 220]. Warstwy te zapewniają równomierny rozkład potencjału na całej długości czoła uzwojenia oraz zapobiegają ewentualnym wyładowaniom [44, 45, 206, 207, 208, 220].

## 2.1.2. Odporność układów izolacyjnych na temperaturę

Jedną z podstawowych cech materiałów elektroizolacyjnych jest odporność na działanie temperatury. Należy przez to rozumieć zdolność materiału do utrzymywania określonej właściwości izolacyjności podczas długotrwałego oddziaływania podwyższonej temperatury [208, 220].

Wymagania stawiane materiałom i układom elektroizolacyjnym ze względu na odporność temperaturową są ściśle znormalizowane. W zakresie maszyn elektrycznych wirujących (silniki, generatory) wymagania te opisują przede wszystkim normy międzynarodowe. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć IEC 60034-1, IEC 60034-18, IEC 60085, IEC 62114, IEC 60216, IEC 60505, IEC/RT 61026, IEC 60493-1 [90, 91, 92, 93, 94, 97, 96, 97, 98, 99, 100, 101]. Dla zilustrowania wzajemnych relacji między wymaganiami zawartymi w tych normach przedstawiono na rysunku 2.2 schemat wzajemnych powiązań.



Rys. 2.2. Wymagania temperaturowe dla materiałów i układów izolacyjnych stosowanych w maszynach elektrycznych wirujących [194]

W oparciu o zapisy w powyższych normach materiały i układy elektroizolacyjne dzieli się na klasy według odporności na temperaturę [206, 208, 220]. Klasyfikacja opiera się na wprowadzeniu pojęcia temperatury najgorętszego miejsca izolacji występującej podczas znamionowych warunków pracy maszyny

elektrycznej. Kolejnym istotnym parametrem brany pod uwagę jest największy dopuszczalny wzrost temperatury średniej od tak zwanej referencyjnej temperatury otoczenia. Za temperaturę referencyjną przyjmuje się maksymalną dopuszczalną temperaturę czynnika chłodzącego na wejściu do układu chłodzącego. W przypadku silników chłodzonych powietrzem jest to dopuszczalna temperatura powietrza w pomieszczeniu pracy. Dla maszyn elektrycznych wirujących chłodzonych powietrzem wynosi ona 40°C, a dla chłodzonych wodą 25°C [90]. Ostatecznie dopuszczalną temperaturę izolacji określa się jako sumę referencyjnej temperatury otoczenia, dopuszczalnego wzrostu temperatury oraz rezerwy temperaturowej mającej na celu uwzględnienie miejscowego chwilowego przegrzewania się izolacji, tak zwany *hot spot*. Wartość rezerwy według różnych źródeł przyjmuje się między 10 a 15°C [92, 93]. Klasyfikację odporności temperaturowej izolacji maszyn elektrycznych przedstawiono w tabeli 2.1.

W Polsce najczęściej starsze silniki elektryczne mają izolację klasy B. Nowsze silniki to w przeważającym stopniu klasa F lub klasa H.

**Tabela 2.1.** Klasy odporności izolacji maszyn elektrycznych na temperaturę [92]

symbol klasy izolacji	maksymalna dopuszczalna temperatura pracy °C	referencyjna temperatura otoczenia °C	dop. wzrost temperatury przy pełnym obciążeniu (wsp. mocy 1,0) °C	dop. wzrost temperatury przy obciążeniu (wsp. mocy 1,15) °C
<b>A</b>	105	40	60	70
<b>B</b>	130	40	80	90
<b>F</b>	155	40	105	115
<b>H</b>	180	40	125	-

Przy projektowaniu i wytwarzaniu układu izolacyjnego maszyn elektrycznych oprócz wymagań formalnych korzysta się z doświadczeń praktycznych uzyskanych przy produkcji i eksploatacji maszyn. Korzysta się również z wyników doświadczeń na układach modelowych z wykorzystaniem nowych rozwiązań technicznych układów elektroizolacyjnych [138, 141, 142, 194, 208, 220]. Dla prac projektowych nad nowymi konstrukcjami silników oraz dla wydłużenia czasu bezawaryjnej pracy już eksploatowanych silników podstawowe znaczenie ma analiza warunków pracy układów izolacyjnych silników WN.

## 2.2. Przyczyny występowania uszkodzeń izolacji uzwojeń

Przyczyny uszkodzeń izolacji w maszynach elektrycznych są przedstawiane w literaturze bardzo obszernie między innymi w [8, 24, 44, 45, 59, 89, 208, 126, 127, 153, 180, 183, 208, 216, 219, 220, 234, 235, 238, 239, 240, 241, 250].

Klasyczny podział na przyczyny występowania uszkodzeń izolacji uzwojeń wynika z oddziaływania narażeń elektrycznych, termicznych, mechanicznych, termomechanicznych, klimatycznych, chemicznych, wywołanych promienio-



waniem, utlenianiem i hydrolizą. Inny spotykany w literaturze podział wynika z oddziaływań czynników wpływających na właściwości materiału w objętości izolacji, tj.: struktura materiału, ciśnienie, temperaturę, wilgotność, rodzaj i intensywność promieniowania czy wpływ pola elektrycznego w postaci efektów nieliniowych oraz na czynniki związane z występowaniem procesów przejściowych określonych przez polaryzację wolnorelaksacyjną, ewolucję ładunku przestrzennego oraz przez inne procesy fizyczne takie jak elektrooczyszczanie, starzenie [138].

Wszystkie wymienione wyżej przyczyny są szeroko opisane w literaturze. W związku z powyższym poniżej przytoczono jedynie te informacje, które uznano za istotne z punktu widzenia prowadzonych w monografii rozważań.

### 2.2.1. Narazenia elektryczne

Źródłem narażeń elektrycznych jest pole elektryczne wywołane przepływem prądu w uzwojeniach stojana silnika w wyniku przyłożenia napięcia roboczego [44, 45, 208, 213, 220]. W nowych układach izolacyjnych wytrzymałość elektryczna nie jest mniejsza niż 5-krotna wartość napięcia znamionowego [220]. Z upływem czasu ta wytrzymałość pogarsza się. Działanie pola elektrycznego może powodować jonizację gazów występujących w szczelinach układu izolacyjnego [208, 220]. Następstwem tego jest destrukcyjne oddziaływanie na materiał izolacji w pobliżu szczelin [81, 208, 220]. Narazenia elektryczne to również narażenia izolacji głównej uzwojeń podczas przepięć typu łączeniowego, występujące w stanach przejściowych przy załączeniu i wyłączeniu silnika [72, 73, 74, 77, 208, 220].

M. Dąbrowski przedstawił w swoich pracach [44, 45] analizę pod kątem rozpoznania w układzie izolacyjnym miejsc szczególnie zagrożonych. Rozpoznaje w nich żłobkową część izolacji, w której występują obszary o płaskich warstwach dielektryków i równomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego oraz obszary naroży żłobka, w których rozkład pola jest silnie nierównomierny. Z przedstawionej analizy sformułował następujące wnioski [44, 45, 46]. Izolacja w narożu żłobka jest bardziej narażona na wyładowania elektryczne niż izolacja na powierzchniach bocznych (rys. 2.1). Największe natężenie pola występuje w narożu na krawędzi drutu nawojowego, krawędzi profilu uzwojenia. W celu jego zmniejszenia, należy szczególnie w tym miejscu zastosować izolację przylegającą do uzwojenia z materiału o dużej przenikalności elektrycznej i unikać groźnych szczelin gazowych. Szczególnie nierównomierne pole elektryczne występuje w strefie przejściowej, to znaczy na końcach pakietów blach tworzących rdzeń w miejscach, w których rozpoczynają się części czołowe uzwojenia. W strefie tej może dojść do wyładowań wzdłuż zewnętrznej powierzchni izolacji. Przeciwdziałać temu można pokrywając powierzchnię izolacji cewki (rys. 2.1) warstwą przewodzącą o rezystywności mniejszej w pobliżu rdzenia i większej w części oddalonej od rdzenia.

Mechanizm przebicia, który może wystąpić w układzie izolacyjnym silnika pod wpływem oddziaływania pola elektrycznego, zależy w dużej mierze od cza-

su działania tego czynnika. Można tu przy przekroczeniu natężenia przewodzanego dla danego układu, wyróżnić trzy przypadki [208, 220]: gdy czas jest krótki, poniżej 1s (odpowiada to narażeniom typu impulsowego, wówczas ma miejsce przebiecie typu elektrycznego), gdy czas działania pola elektrycznego trwa do kilku godzin (wówczas może wystąpić cieplne przebiecie układu izolacyjnego) oraz gdy czas działania pola elektrycznego jest długi (wówczas może mieć miejsce mechanizm jonizacyjno-starzeniowy, wytrzymałość dielektryka spada pod wpływem występowania wylądowań niezupełnych, dochodzi do degradacji izolacji).

W literaturze [65, 66, 67, 81, 208, 220] jest przedstawiony pogląd, że działanie pola elektrycznego na układ izolacyjny maszyny elektrycznej powoduje przede wszystkim powstawanie wylądowań niezupełnych w miejscach, gdzie występują defekty wewnętrzne układu izolacyjnego (wtarćiny gazowe, rozwarstwienia) oraz w obszarach szczególnie narażonych, takich jak wspomniane już wyjścia ze łożka i czoła uzwojeń.

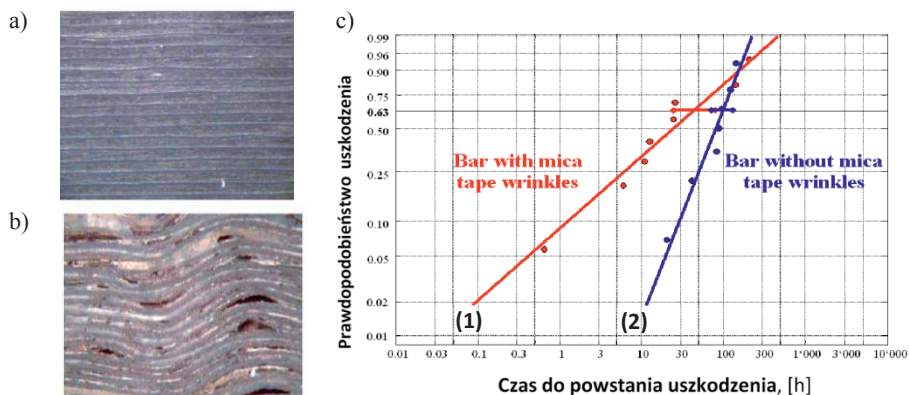
Współczesne układy izolacyjne silników i generatorów oparte są na mące, materiale bardzo odpornym na działanie wylądowań niezupełnych, to jednak rozwiązanie nie chroni w pełni układu izolacyjnego przed wylądowaniami. Stosowane materiały izolacyjne posiadają czasem niewielkie defekty strukturalne lub niewłaściwie ułożone taśmy mikowe, co powoduje, że pod wpływem pola elektromagnetycznego, generowane są wylądowania niezupełne. Proces ten stopniowo degraduje układ izolacyjny, a efektem długotrwałego działania wylądowań niezupełnych jest powiększanie istniejących defektów oraz tworzenie nowych.

Przykład działania destrukcyjnego *wnz* na zmianę struktury układu izolacyjnego przedstawiono na rysunku 2.3. Porównano na nim w dużym powiększeniu wygląd przekroju poprawnie wykonanej izolacji (rys. 2.3a) i izolacji, w której taśma mikowa przy nakładaniu została pofałdowana, a następnie poddana działaniu pola elektrycznego (rys. 2.3b). W efekcie *wnz* doszło do znacznego rozwoju rozwarstwień izolacji oraz powstania inkluzji gazowych. Zmiana struktury układu izolacyjnego następuje dużo szybciej w izolacji o pofałdowanej strukturze taśm (2) aniżeli w izolacji z taśmami ułożonymi równolegle (1). Prawdopodobieństwo uszkodzenia izolacji w wyniku emisji *wnz* jest znacznie większe w przypadku izolacji (1) (rys. 2.3c).

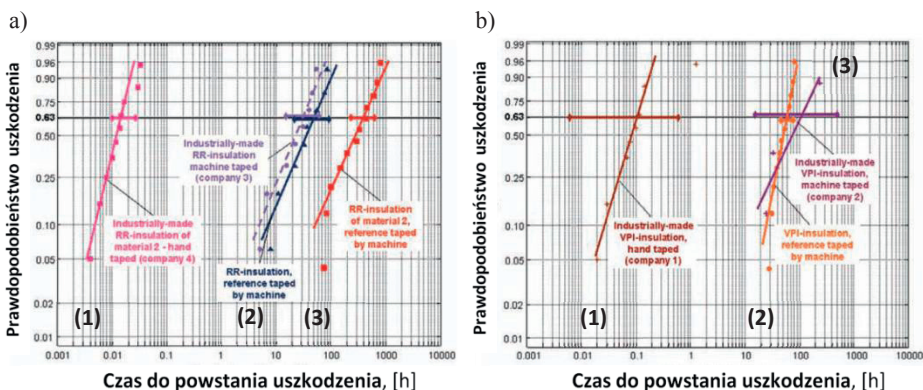
Maszyny elektryczne wyposażone w izolację uzwojeń tej samej technologii *Resin-Rich* lub *VPI* i wykonanych z tych samych komponentów mogą się znacznie różnić trwałością. Prowadzone badania wskazują, że minimalne odstępstwa technologiczne lub niezachowanie jednorodnej struktury użytych komponentów pod wpływem działania pola elektrycznego powodują znaczne skrócenie żywotności izolacji [247]. Przedstawiony na rysunku 2.4a przykład ilustruje wpływ jakości izolacji uzyskanej przy ręcznym nakładaniu taśm (1), taśmowaniu maszynowym bez kontroli komponentów w trakcie nawijania (2) oraz przy taśmowaniu maszynowym z dodatkową kontrolą jakości używanych komponentów (3). W tym przypadku, główna przyczyna złej jakości wiązała się



z ręcznym taśmowaniem, które mimo że wykonywane było przez bardzo doświadczony zespół pracowników, powodowało powstawanie delaminacji i kawern. Dla porównania na rysunku 2.4b przedstawiono wpływ uwarunkowań jakościowych przy stosowaniu technologii *VPI*. Porównano jakość izolacji wytworzoną maszynowo pod nadzorem wykwalifikowanego pracownika i przy częstym kontrolowaniu komponentów (2) z izolacją wytworzoną maszynowo w typowym zakładzie produkcyjnym (3) i z izolacją formowaną ręcznie (1). W maszynowym wytwarzaniu nie ma istotnej różnicy w jakości uzyskanej izolacji. Natomiast udział czynnika ludzkiego przy produkcji izolacji wpływa na znaczne pogorszenie jej jakości (3).



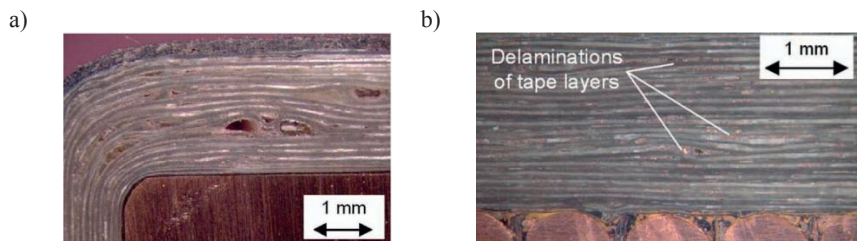
Rys. 2.3. Wpływ *wzn* na uszkodzenia i trwałość izolacji, a) struktura układu izolacyjnego dobrze wykonana, b) efekt działania *wzn* w izolacji o pofalowanej strukturze taśm, c) wpływ dobrze i wadliwie położonej taśmy mikowej na czas życia izolacji [30]



Rys. 2.4. Wpływ odstępstw technologicznych i jakości użytych materiałów na czas życia izolacji wykonanej w technologii: a) *Resin-Rich* (RR) i b) *VPI* [247]

Prezentowane przykłady potwierdzają ogólne spostrzeżenie, że pierwsze inkluzje powstają już w procesie produkcyjnym, a ich ilość i geometria jest pochodną jakości wykonania [213], co wyraźnie można zaobserwować na rysunku

2.5. W pierwszym przypadku (technologii *Resin-Rich*) przeważają wady związane z obecnością inkluzji (rys. 2.5a). Natomiast w technologii próżniowo-ciśnieniowej *VPI* najczęściej występującą wadą jest delaminacja na granicy faz „żywica – taśma szklana lub mika” [247].



Rys. 2.5. Struktura układu izolacyjnego pod wpływem działania wzn: a) izolacja wykonana w technologii *Resin-Rich* (RR), b) izolacja wykonana w technologii *VPI* [247]

### 2.2.2. Narażenia termiczne

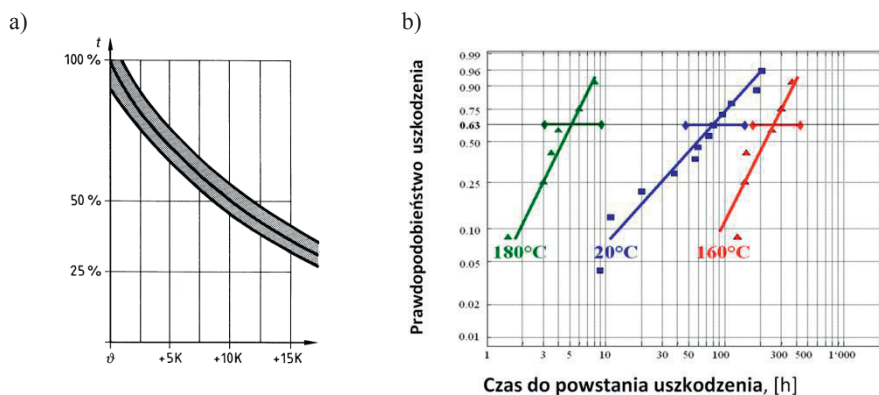
W maszynach elektrycznych występują straty mocy, które prowadzą do wydzielania się ciepła. Straty powstają w uzwojeniach, w rdzeniu, występują również straty na prądy wirowe w częściach konstrukcyjnych. Ich skutkiem jest wzrost temperatury w poszczególnych częściach maszyny. Obliczenia przyrostów temperatur w elementach uzwojenia są podstawą do wyboru materiałów izolacyjnych i konstrukcji układu izolacyjnego [44, 45, 141, 208, 220]. Wysokie temperatury działające na materiały izolacyjne mogą spowodować [138, 208, 220]: zmiany ich wytrzymałości elektrycznej, stratności i przenikalności dielektrycznej (które w pewnym zakresie są odwracalne), zmiany własności mechanicznych (które w wielu przypadkach są nieodwracalne) oraz zmiany o charakterze skrajnym (typu: zwęglenie i zapłon). Zmiany te prowadzą do pogorszenia własności układu izolacyjnego, do szybszego starzenia się, a nawet do jego zniszczenia.

Niekorzystnym następstwem działania wysokich temperatur na układ izolacyjny silników jest pogorszenie własności mechanicznych (spowodowane np. procesami termicznego utwardzania żywic), powstanie odkształceń typu pęknięcia oraz chemicznego starzenia i wydzielania się aktywnych substancji [208, 220].

Pogorszenie własności układu izolacyjnego prowadzi do ograniczenia dopuszczalnej temperatury roboczej. Szacowanie stopnia degradacji układu izolacyjnego jest sprawą trudną. W literaturze często spotyka się podejście klasyczne (wzór *Montsingera*), w którym wiąże się temperaturę dopuszczalną dla materiału izolacyjnego z jego trwałością (*czasem życia*) [141, 208, 220]. Inną formą szacowania *czasu życia* układu izolacyjnego, pracującego w określonej temperaturze, to równanie *Arrheniusa* [220]. Wpływ wzrostu temperatury ponad dopuszczalną na szacowany czas życia układu izolacyjnego przedstawiono na

rysunku 2.5a. Wynika z niego, że przekroczenie temperatury o 10°C skraca czas o połowę [189].

Zbyt wysoka temperatura negatywnie wpływa na układ elektroizolacyjny, ale zbyt niska również może osłabiać izolację. Jak wskazują publikacje zespołu Instytutu Federalnego w Zurichu [30, 247] ważnym jest, aby doświadczalnie wyznaczyć optymalną temperaturę dla danego typu izolacji. Według *T. Weiers* taką temperaturą pracy dla izolacji epoksydowych na bazie miki, przy której uzyskuje się maksymalny czas życia, to 90°C [30]. Na rysunku 2.6 porównano wpływ temperatury na czas zesterzenia się izolacji. W tym doświadczeniu najlepszą żywotność zachowała izolacja w temperaturze 160°C. Autorzy tłumaczą to lepszą elastycznością żywicy wiążącej, która redukuje ryzyko powstawania pęknięć, ale również poprzez zmniejszenie wewnętrznych naprężeń pochodzących z reakcji utwardzania. W temperaturze 180°C następuje termiczna degradacja żywicy wiążącej, przez co żywotność znacznie się redukuje, a przy zbyt niskiej temperaturze pracy (około 20°C) biorą górę narażenia mechaniczne.



**Rys. 2.6.** Skrócenie czasu życia izolacji pod wpływem niewłaściwej temperatury izolacji uzwojeń stojana: a) zbyt wysoka temperatura izolacji [189], b) zbyt wysoka lub zbyt niska temperatura izolacji [30]

### 2.2.3. Narażenia mechaniczne

Przyczyną mechanicznego oddziaływania na układ izolacyjny w silnikach i generatorach są siły elektrodynamiczne. Siły te są wywołane prądami w uzwojeniach stojana i wirnika. Powodują drgania uzwojenia stojana, czego następstwem jest stopniowa degradacja izolacji oraz usztywnień uzwojenia stojana. Ich działanie uwidacznia się szczególnie w stanach przejściowych w czasie załączania silników (maksymalna wartość prądu) oraz w stanie ustalonym. W czasie rozruchu silników w pierwszym okresie, największe amplitudy sił elektrodynamicznych występują z częstotliwością równą częstotliwości prądów zasilania –  $f_{zasil}$  (50 Hz). W miarę upływu czasu i zaniku składowych aperiodycznych prądów, siły elektrodynamiczne działają z podwójną częstotliwością prądów silnika ( $2 \times f_{zasil}$ ). Występuje również składowa stała [44, 45, 53]. Przy powtórnym roz-

ruchu silnika, po chwilowym zaniku napięcia zasilania i napięciu resztkowym na zaciskach stojana, siły te zależą od kąta  $\delta$  między wektorem napięcia silnika i sieci zasilającej. Największe siły występują, gdy kąt ten wynosi  $180^\circ$  [38].

Ze względu na charakter oddziaływań mechanicznych rozpatruje się oddzielnie [44, 45, 51, 52, 54, 56, 57] siły i naprężenia działające w części żłobkowej uzwojenia (w tym działanie sił na układ izolacyjny na dnie żłobka oraz działanie sił przez układ izolacyjny na klin żłobkowy) oraz siły i naprężenia występujące na czołach uzwojeń stojana. W literaturze [44, 45] M. Dąbrowski szczegółowo analizuje narażenia izolacji uzwojeń w części żłobkowej i czołowej.

Drak w publikacjach [51, 52, 53, 54, 55] zajmuje się czołami uzwojeń, najbardziej narażonym na uszkodzenia fragmentem uzwojenia. Wyniki jego obliczeń i badań pozwalają sformułować wniosek, że strefy największych naprężeń mechanicznych wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych występują [87, 90]: na wyjściu cewek ze żłobka stojana, na wykorbieniu czoł cewek, przy przejściu z części żłobkowej w główne łuki stożkowe i na główkach cewek. W tych miejscach występuje działanie momentów gnących i skręcających powodujących duże naprężenia w izolacji cewek. Pociąga to za sobą pęknięcia i odpryski w izolacji.

Drgania i wstrząsy, którym poddane są silniki w czasie swojej eksploatacji, przyczyniają się do wzrostu ich awaryjności. Zagadnienie to było i jest przedmiotem badań [183, 208, 220], z których wynika wniosek, że intensywne wstrząsy i drgania, zwłaszcza stojana, przyczyniają się do przyspieszonej degradacji układu izolacyjnego. Trwałość izolacji zależy od jej wytrzymałości zmęczeniowej na działanie zmiennych w czasie sił [220].

#### 2.2.4. Narażenia termomechaniczne

Są to jedne z najpoważniejszych narażeń układu izolacyjnego w maszynach elektrycznych [141, 208, 220]. Prowadzą do pęknięć, rozwarstwień i innych deformacji w układzie izolacyjnym, pogarszających jego własności elektryczne i mechaniczne. Narażenia termomechaniczne układu izolacyjnego są szczególnie istotne w dużych maszynach elektrycznych, zwłaszcza w generatorach [183, 208, 215, 220, 236]. Z powodu różnych współczynników rozszerzalności cieplnej  $\alpha_{Cu}$  miedzi uzwojenia i  $\alpha_{Fe}$  rdzenia żelaza, różnych temperatur miedzi i żelaza, różnic w cieplnych stałych czasowych  $T_{Cu}$  miedzi i  $T_{Fe}$  żelaza, dochodzi do przesunięć uzwojeń w żłobkach. Ruchy te są nazywane dylatacyjnymi [183, 208] i mają inny charakter w stojanie i inny w wirniku.

W stojanach maszyn elektrycznych bardzo istotnym jest spełnienie zasady dążenia do minimalizacji oddziaływań termomechanicznych (sił, naprężeń i przemieszczeń) wywołanych zmianami temperatury poprzez odpowiednie skoordynowanie wartości współczynników rozszerzalności termicznej. Ruchy uzwojeń wywołane zmianami temperatur są przyczyną przesunięć poszczególnych elementów układu izolacyjnego. Może to prowadzić do trwałych zmian w wymiarach układu izolacyjnego, a tym samym przyczyniać się do jego degra-

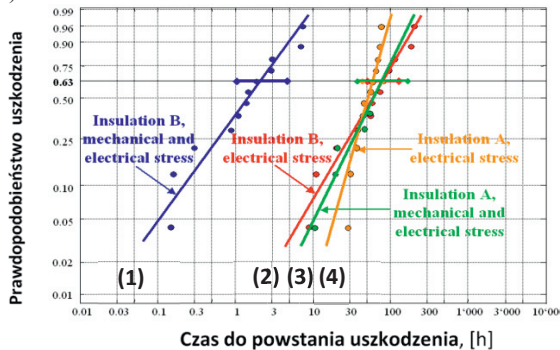
dacji. Zagadnienie to jest przedmiotem badań, przedstawiono je w literaturze [183, 208, 220]. Wniosek ogólny z tych badań jest taki, że w kolejnych powtarzających się ruchach uzwojenia i jego izolacji, w następstwie narażeń termomechanicznych izolacja może się odspoić od uzwojenia i od żłobka. Może nawet wysunąć się ze żłobka. Przebieg zjawiska jest bardzo złożony. Charakter odkształceń zależy od zmian własności mechanicznych układu izolacyjnego w funkcji temperatury i czasu.

W wyniku stosowania izolacji kompozytowych, których składniki charakteryzują się różnymi współczynnikami rozszerzalności objętościowej, zmiana obciążenia silnika wpływa na powstawanie nowych naprężeń. Cennych informacji w tym zakresie dostarczają prowadzone eksperymenty laboratoryjne [30, 247]. Poddając, np. izolowany pręt miedziany, wibracjom o częstotliwości 100Hz i amplitudzie  $\pm 0,5\text{mm}$  oraz jednocześnie obciążeniom elektrycznym  $U=28\text{kV}$ , uzyskano dla wybranych kompozycji układów izolacyjnych wyraźne skrócenie czasu ich życia (rys. 2.7b). Próbie poddano dwa różne materiały izolacyjne: izolację A wykonaną na bazie połączenia szkła, taśmy mikowej i żywicy epoksydowej wykonanej w technologii *VPI* (3,4) i izolację B wykonaną z połączenia włókniny poliestrowej pokrytej taśmą z miki wykonanej również w technologii *VPI* (1,2). Wyniki pokazują, że żywotność izolacji B została 10-krotnie zredukowana poprzez wpływ drgań (1), podczas gdy żywotność izolacji poddanej jedynie oddziaływaniom elektrycznym (2) nie wykazuje dużych różnic w stosunku do izolacji A (rys. 2.7b). Przedstawione na rysunku 2.7a powiększenie mikroskopowe ilustruje powstałe w izolacji B rozwarstwienie równoległych warstw miki, które spowodowały i przyspieszyły powstanie zjawiska drzewienia. Nie obserwuje się natomiast pęknięć prostopadłych do warstw miki. Żywice poliestrowe cechują się mniejszą przyczepnością oraz większą odkształcalnością postaciową (kurczliwością) podczas procesu utwardzania aniżeli żywice epoksydowe. W izolacji B zastosowanie włókniny poliestrowej w połączeniu z taśmą mikową spowodowało niższą wytrzymałość mechaniczną izolacji niż tkaniny szklanej (izolacja A).

a)



b)



Rys. 2.7. Wpływ oddziaływań termomechanicznych na skrócenie czasu życia izolacji: a) struktura izolacji z rozwarstwieniem, b) prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia [30]



Z metrologicznego punktu widzenia miarą stopnia degradacji wywołanych oddziaływaniem termomechanicznym może być poziom wyładowań niezupełnych mierzonych na każdym etapie „życia” maszyny [65, 66, 123, 189, 208, 220]. Niezbędnym jest wówczas przyjęcie odpowiedniego układu odniesienia, np. poziomu emisji *wnz* zmierzonej zaraz po wykonaniu maszyny lub po próbach i odbiorze końcowym rozpoczynających okres właściwej eksploatacji.

### 2.2.5. Narażenia klimatyczne

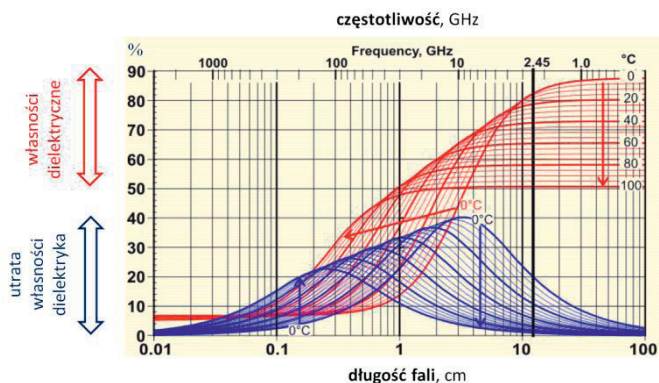
Układ izolacyjny maszyny elektrycznej jest elementem narażonym na bezpośrednie lub pośrednie działanie klimatu (pracy na zewnątrz lub w pomieszczeniach zamkniętych) [62, 194, 208, 220]. Do najważniejszych parametrów określających stan klimatu należy zaliczyć: temperaturę i wilgotność powietrza, promieniowanie słoneczne, wietrzność, wielkość opadów oraz ciśnienie atmosferyczne wynikające z położenia nad poziomem morza, ale również zanieczyszczenie powietrza czy magnetyzm ziemi [9, 32, 33, 34]. O właściwościach danego klimatu decydują wartości średnie wymienionych parametrów oraz ich zmienność w czasie np. w ciągu roku [9].

Wykonanie silnika dla potrzeb przemysłu krajowego jest najczęściej dostosowane do warunków klimatu umiarkowanego, który określają następujące ważne wielkości: najwyższa temperatura powietrza  $+45^{\circ}\text{C}$ , najniższa temperatura powietrza  $-25^{\circ}\text{C}$ , zmiana temperatury w ciągu 8 godzin wynosząca  $15^{\circ}\text{C}$  oraz maksymalna wilgotność względna powietrza w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  to 80% [194]. Przekroczenie którejs z tych wartości zwłaszcza w dłuższym okresie czasu, wymaga wykonania silnika dla innej strefy klimatycznej. Zagrożenia klimatyczne to w szczególności: wpływ wilgoci atmosferycznej, działanie rosienia i wpływ działania grzybów pleśniowych [81]. Najczęściej spotykanym zagrożeniem w warunkach krajowych jest wpływ wilgoci atmosferycznej, w szczególności przy jednoczesnym występowaniu temperatury powyżej  $20^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej powyżej 80% (podczas intensywnych opadów, burz, przy gwałtownej zmianie temperatury). Zawilgocenie izolacji może mieć miejsce po zatrzymaniu silnika, gdy jego temperatura obniża się i w silniku powstaje podciśnienie skutkujące dyfuzją wilgoci z otoczenia. Można przeciwdziałać temu zjawisku przez załączanie tak zwanych grzałek postojowych w silniku [220]. Wilgoć zmienia niekorzystnie parametry układu izolacyjnego, obniża jego rezystancję i przyczynia się do jego degradacji. Rozpoznanie zawilgocenia układu izolacyjnego jest ważnym zadaniem diagnostycznym.

Szczególny przypadek zagrożenia układu izolacyjnego wynika ze zjawiska kondensacji pary wodnej na powierzchniach dostępnych w silniku. Występuje ono wtedy, gdy temperatura powietrza wraz z zawartą w nim parą wodną obniża się poniżej tak zwanej temperatury punktu rosy. Poniżej tej temperatury para wodna w powietrzu tworzy kropelki wody, które osiadają na powierzchniach silnika. Kondensowanie wilgoci stwarza warunki do dyfuzji wody w głąb układu izolacyjnego silnika, obniżając znacznie własności dielektryczne [220].

Gdy wilgoć lub para wodna jest obecna na powierzchni stałej materiału izolacyjnego, dochodzi do występowania zjawiska hydrolizy [141]. Materiał izolacyjny traci swoje właściwości dielektryczne i mechaniczne. Właściwości typowych materiałów stosowanych do produkcji układów izolacyjnych, takich jak papier, taśmy bawełniane, materiały celulozowe, włókna szklane i inne, bardzo szybko się pogarszają. Dla przykładu folia polietylenowa może stracić swoją wytrzymałość mechaniczną i dielektryczną w kilka dni, jeśli jest przechowywana w powietrzu o wilgotności względnej 100% [141].

Wpływ zawilgocenia, temperatury i promieniowania na procentową utratę własności dielektrycznych materiałów izolacyjnych przedstawiono na rysunku 2.6 [235]. Zawartość wilgoci znacząco wpływa na ograniczenie własności dielektrycznych układu izolacyjnego – rodzina krzywych w kolorze czerwonym zmienia się w rodzinę krzywych koloru niebieskiego.



Rys. 2.6. Utrata własności dielektrycznych materiału izolacyjnego pod wpływem działania fal elektromagnetycznych, temperatury i zawilgocenia: kolor niebieski – niska wilgotność izolatora, kolor czerwony – materiał zawilgocony [235]

## 2.2.6. Narażenia chemiczne

Maszyny elektryczne, w tym ich uzwojenia i układy izolacyjne, są często narażone na działanie substancji chemicznie aktywnych. Najczęściej są to gazy, które przy równoczesnym działaniu wilgoci są szczególnie niebezpieczne. Wymienić tu można np. amoniak. Zagrożenie chemiczne ma często miejsce przy nieoczekiwanym zalaniu silnika roztworami kwasów, soli, zasad, wody technologicznej. Silniki narażone na takie oddziaływania powinny być specjalnej budowy, materiały izolacyjne należy dobrać specjalnie pod kątem zminimalizowania ewentualnych nieodwracalnych zmian w układzie izolacyjnym [138, 220]. Konieczna w takich wypadkach jest nawet wielokrotna impregnacja uzwojenia specjalnie dobranymi żywicami. Z reguły wyższą odporność chemiczną wykazują materiały izolacyjne mające wyższą klasę ciepłoodporności [141, 220].

Postępująca degradacja chemiczna materiałów izolacyjnych może również wystąpić z powodu różnych procesów, takich jak niezgodność materiałów pod

względem szybkości starzenia się, działania podwyższonej temperatury, czy w obecności pewnych materiałów, np. miedzi. Celuloza dla przykładu rozkłada się znacznie szybciej w obecności śladowych ilości substancji kwaśnych. Dodatkowym niekorzystnym działaniem chemicznym jest wymywanie (wyplukiwanie z rozpuszczalnego składnika) substancji chemicznie czynnych. Przykładem jest tkanina szklana wykonana ze szkła o wysokiej zawartości sodu, która traci swoje właściwości bardzo szybko z powodu wymywania sodu na powierzchni włókien i późniejszego ataku chemicznego silnej zasady, która się gromadzi na powierzchni szkła.

W obecności powietrza lub tlenu, zwłaszcza ozonu, materiały izolacyjne, takie jak gumy i polietylen, ulegają utlenianiu, powodując powstawanie pęknięć powierzchniowych, szczególnie jeśli są narażone na rozciąganie oraz działanie światła. Polietylen również utlenia się w silnym świetle dziennym, chyba że jest chroniony przez nieprzezroczysty wypełniacz.

### **2.2.7. Narażenia wywołane promieniowaniem**

Jest to szczególnie rodzaj narażenia układów izolacyjnych maszyn elektrycznych. Zagadnienie przedstawiono w literaturze [138, 141, 208, 220]. Promieniowanie może być przyczyną jonizacji w dielektrykach. Wpływa negatywnie na ich właściwości elektryczne i mechaniczne.

Promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie mikrofal może być pochłaniane przez materię na dwa różne sposoby. Pierwszym z nich jest zjawisko strat dielektrycznych, głównie na skutek polaryzacji orientacyjnej (dipolowej). Jeśli w materiale są cząsteczki chemiczne będące dipolami, to w wyniku działania pola elektrycznego fali elektromagnetycznej starają się ustawić zgodnie z kierunkiem i zwrotem tego pola. Pole elektryczne przekazuje dipolom energię, która jest następnie rozpraszana w materiale w postaci ciepła. Istotny wpływ promieniowania mikrofalowego na zmianę własności dielektrycznych układu izolacyjnego przedstawiono na rysunku 2.4. Mechanizm polaryzacji orientacyjnej, odpowiada za ogrzewanie tylko tych substancji, których cząsteczki są dipolami, takich jak woda, metanol, DMF, octan etylu, chloroform, chlorek metylenu oraz kwas octowy. Drugi mechanizm pochłaniania promieniowania mikrofalowego opiera się na przewodnictwie jonowym. Gdy w materiale znajdują się jony, zaczynają one przemieszczać się zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego: dodatnie w jedną, a ujemne w przeciwną stronę. Zderzając się przy tym z innymi cząsteczkami, powodują rozprzestrzenianie się energii cieplnej w materiale.

Dużą odpornością na promieniowanie wykazuje mika, podstawowy materiał w stosowanych obecnie i produkowanych nowych maszynach elektrycznych.

### **2.3. Warunki prawidłowej eksploatacji maszyn elektrycznych**

Uwarunkowania dla prawidłowej eksploatacji maszyn elektrycznych dotyczą bardzo wielu zagadnień [39, 41, 42, 44, 45, 46, 208, 220]. Niektóre z nich



mają szczególny charakter. Ich spełnienie jest bardzo ważne i wyraźnie przedłuża czas bezawaryjnej pracy napędu. Wymienić tu należy:

- prawidłowy dobór do wymagań napędzanego urządzenia oraz możliwości zasilania,
- prawidłowy dobór łożysk w napędzie,
- prawidłowy dobór sprzęgła w napędzie,
- właściwie zaprojektowany i wykonany fundament i konstrukcja wsporcza z elementami do mocowania silnika i maszyny napędzanej, dbałość o ich stan techniczny,
- silnik i maszyny napędzane prawidłowo ustawione na fundamencie i konstrukcji wsporczej,
- prawidłowe wyważenie zespołu: silnik + sprzęgło + maszyna napędzana,
- stosowanie właściwej techniki smarowania łożysk w zespole maszyn,
- dbałość o dobry stan izolacji uzwojenia silnika,
- przeprowadzanie remontów tylko wtedy, gdy stan techniczny maszyny wskazuje na ich konieczność: nie powinno się ingerować w sprawnie działającą maszynę; zalecana jest strategia utrzymania maszyn polegająca na eksploatacji zależnej od ich stanu technicznego.

Na czas „życia” maszyn elektrycznych wpływa również jakość projektu oraz jakość wykonania uzwojenia i elementów jego usztywnienia (po wcześniejszej wnikliwej analizie sił elektrodynamicznych działających na uzwojenia w szczególności w strefie czół) [44, 45, 46]. Należy właściwie dobrać kształt czoła cewki w strefie jej wykorbienia, przy przejściu z prostoliniowego wysięgu żłobkowego w główny łuk stożkowy i w strefie główki cewki [46]. Kolejnym niezbędnym elementem jest zapewnienie wymaganej odległości pomiędzy bokami głównych łuków stożkowych sąsiednich półcewek. Półcewki dolnej i górnej warstwy nie mogą przylegać do siebie – oddzielać je powinna przekładka (rys. 2.1). Strefa wykorbienia oraz strefa główki muszą być tak wykonane, aby nie było deformacji i odspojenia izolacji. Bardzo wskazane jest kształtowanie czół cewek stojanów na specjalnie zaprojektowanych szablonach [55, 57]. Szczegółowe zalecenia odnośnie projektowania uzwojenia stojanów silników, w tym jego części czołowej wraz z elementami usztywnienia, można znaleźć w literaturze [44, 45, 55, 57].

Czas pracy maszyn elektrycznych można efektywnie wydłużyć poprzez stosowanie nowoczesnych systemów automatycznej regulacji z funkcją ochrony właściwych warunków pracy. Warunki ochrony pracy silnika należy realizować poprzez pomiar i bieżącą analizę parametrów istotnych z punktu widzenia negatywnych wpływów na stan izolacji uzwojeń. Do najważniejszych wielkości podlegających ochronie należy zaliczyć: temperaturę uzwojeń, napięcie oraz jego jakość, prąd, obciążenie, częstotliwość, temperaturę czynnika chłodzącego i wilgotność względną powietrza [189].

Na rynku istnieje obecnie wiele systemów mających na celu chronić właściwe warunki pracy maszyn elektrycznych [48, 189, 104, 121, 123, 140, 185,

189]. Ich głównym zadaniem jest kontrolować wyżej wymienione parametry i na tej podstawie programowo (automatycznie) zmieniać warunki zasilania, nie dopuszczając do powstania zagrożeń. Autorowi nie są znane systemy ochrony, które mierzyłyby w sposób ciągły emisję *wnz* w izolacji uzwojeń stojana i na podstawie tych pomiarów realizowały program ochrony warunków pracy maszyn elektrycznych.

## 2.4. Metody diagnostyki stanu izolacji uzwojeń

Badania stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych należą do badań podstawowych [25, 26, 27, 44, 45, 79, 141, 202, 203, 220]. Wyniki ich decydują bowiem o jakości izolacji na etapie produkcji, dopuszczeniu maszyny elektrycznej do eksploatacji oraz warunkują bezpieczną eksploatację. Badania izolacji uzwojeń należą jednocześnie do jednych z najtrudniejszych, najdłużej trwających i najbardziej kosztownych [12, 13, 71, 85, 86, 118, 141, 220].

Badania stanu izolacji są wykonywane we wszystkich etapach „życia” maszyn elektrycznych, począwszy od badań stanu izolacji uzwojeń podczas ich produkcji, po ocenę funkcjonalną układów izolacyjnych podczas prób napięciowych izolacji, badań diagnostycznych stanu izolacji wykonywanych poza eksploatacją (*off-line*), aż po badania diagnostyczne stanu izolacji wykonywanych podczas normalnej eksploatacji (*on-line*). Odrębną grupę badań stanowią badania układów izolacji na etapie opracowywania nowych rozwiązań układów izolacyjnych oraz ich właściwości [220, 227, 228, 237, 243].

Badania stanu izolacji uzwojeń w czasie ich produkcji przeprowadza się w dwóch trybach: pełnym lub uproszczonym. Badania pełne oceny jakości izolacji obejmują [12, 35, 36, 42, 64, 103, 220]:

- badania wytrzymałości elektrycznej,
- pomiar współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg } \delta$ ,
- pomiar wyładowań niezupełnych.

Procedura uproszczona obejmuje: badania wytrzymałości elektrycznej oraz pomiar współczynnika strat dielektrycznych [12, 220].

Celem próby napięciowej jest sprawdzenie prawidłowego wykonania układu izolacyjnego maszyny elektrycznej. Pozytywny rezultat próby daje podstawę do stwierdzenia, że maszyna nie stanowi zagrożenia dla użytkownika. Jest to badanie obowiązkowe dla maszyny elektrycznej. Próbę taką musi przejść każdy wyrób elektryczny o napięciu znamionowym większym od 24V [184]. Procedura badawcza jest ściśle określona w normach [158]. Próba napięciowa powinna być poprzedzona wstępnym sprawdzeniem izolacji, czyli: pomiarami rezystancji uzwojenia [158] oraz rezystancji izolacji, współczynnika absorpcji, wskaźnika polaryzacji, ewentualnie pomiarami współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ ,  $\Delta\text{tg}\delta$ , intensywności wyładowań niezupełnych [158]. Wyniki tych badań decydują o jakości izolacji uzwojeń i o możliwości bezpiecznego wykonania próby napięciowej. Próbę napięciową izolacji przeprowadza się wtedy, gdy wstępne sprawdzenie izolacji dało wynik pozytywny [220].

Badanie stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych WN prowadzone poza miejscem eksploatacji (*off-line*) jest podstawowym badaniem określającym stan izolacji. Obserwując od wielu lat sposoby oceny izolacji uzwojeń silników w przemyśle krajowym i śledząc literaturę techniczną poświęconą temu zagadnieniu, autor monografii [220] usystematyzował oraz szczegółowo opisał rodzaje technik stosowanych do oceny stanu izolacji uzwojeń silników indukcyjnych. W publikacji tej można znaleźć następujący podział metod:

- ocena na podstawie pomiarów według norm krajowych, zaleceń branżowych i zakładowych,
- metoda T. Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym,
- wieloparametrowa metoda W. Wiły,
- metoda w oparciu o pomiary PI, C, SV, DD,
- metoda udarów napięciowych,
- metoda rampy wysokonapięciowej, DC Ramp Test,
- metoda spektroskopii niskoczęstotliwościowej,
- ocena na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych.

Zagadnienia omawiające powyższe metody oceny stanu izolacji przedstawiono również w innej literaturze [60, 65, 66, 67, 73, 138, 208, 220] oraz w normach [90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101]. Zważywszy na tematykę niniejszej monografii, zagadnienia te nie będą szerzej omawiane.

W badaniach *on-line* stanu izolacji uzwojeń praktyczne uznanie zdobyła jedynie metoda pomiaru emisji *wnz*, którą opisano w kolejnym podrozdziale [135, 136, 193, 203, 210, 214, 220].

## 2.5. Diagnostyka stanu izolacji w oparciu o pomiar *wnz*

Podczas współczesnych badań diagnostycznych wykonuje się pomiary wyładowań niezupełnych, które można wykrywać, mierzyć i lokalizować różnymi metodami. Wykorzystuje się w tym celu rozmaite efekty i zjawiska fizyczne towarzyszące wyładowaniom. Najważniejszymi spośród nich są [63, 65, 76, 78, 115, 132]:

- występowanie impulsów prądowych i emisja elektromagnetyczna,
- chemiczne przemiany materiałów izolacyjnych,
- udarowe odkształcenia sprężyste i towarzysząca im emisja fal akustycznych.

W zależności od układu izolacyjnego, rodzaju dielektryku i typu wyładowań poszczególne zjawiska występują z różnym nasileniem. Wyładowaniom niezupełnym towarzyszą także [25, 81, 204, 220]:

- promieniowanie świetlne,
- lokalne przyrosty temperatury,
- lokalne zmiany ciśnienia wewnątrz kanałów wyładowań niezupełnych.

### 2.5.1. Mechanizm powstawania wyładowań niezupełnych

Materiały kompozytowe na skutek niedokładnego zhomogenizowania składników mają niejednorodną strukturę objętościową. Wyładowania niezupełne zostają zainicjowane w układach izolacyjnych wysokiego napięcia wówczas, gdy w tworzących je dielektrykach występują wewnętrzne defekty struktury, albo gdy sprzyja im usytuowanie zewnętrznych elektrod tego układu [46].

W układach izolacyjnych występują następujące grupy defektów:

- gazowe inkluzje w dielektryku stałym,
- mikrostrza w gazie lub dielektryku stałym,
- wady powierzchni granicznych między dielektrykiem stałym i gazem.

Wyładowania niezupełne w każdej z tych grup przebiegają nieco inaczej [65, 66, 210, 220].

Wystąpienie *wnz* jest lokalnym wyładowaniem elektrycznym, które odbywa się tylko w części układu elektroizolacyjnego (pod wpływem działania napięcia zapłonu wyładowania) i nie powoduje bezpośrednio utraty przez układ własności izolacyjnych [66]. Może to nastąpić, gdy inkluzja występuje w środku lub gdy jest przyległa do przewodnika [65, 66]. Są one ogólnie uważane za wyładowania lokalne w izolacji i w wielu przypadkach ze znacznym wyprzedzeniem poprzedzają całkowite przebicie izolacji [24, 30, 65, 66, 81, 196, 220]. Ogólnie *wnz* stanowią skutek miejscowej koncentracji naprężeń w izolacji lub na jej powierzchni. Mają zwykle postać impulsów o czasie trwania krótszym od  $1\mu\text{s}$  [84]. Jeżeli lokalne pole elektryczne przekroczy określoną granicę inicjacji wyładowania (np. dla powietrza  $E \geq 3\text{ kV/mm}$  [73, 73, 220]) w obecności elektronu startowego, to formuje się lawina elektronów [84]. Zjawisko to jest ograniczone w przestrzeni i ma charakter przejściowy [66, 81, 220].

Skutkiem oddziaływania *wnz* na układ izolacyjny jest stopniowe jego osłabienie, w szczególności w wyniku kumulowania się uszkodzeń przy niegasnących *wnz* [65, 66, 81, 84]. Jest to składnik starzenia eksploatacyjnego izolacji. Jak wynika z badań [66, 84, 208, 220], *wnz* są głównym objawem uszkodzenia izolacji wywołanego jej zestarzeniem. Z tego powodu detekcja *wnz* izolacji jest ważnym elementem oceny jej stanu [66, 84, 206, 208, 220]. Energia elektronów w *wnz* może osiągać poziom  $10\div 20\text{ eV}$  (energia jonizacji) [84]. Zależnie od rodzaju wiązań w materiale izolacyjnym energia ta może powodować przerwanie wiązań chemicznych, np. w polimerach przerwanie następują powyżej  $5\text{ eV}$ .

Pomimo swej lokalnej natury, *wnz* są zjawiskiem niezwykle złożonym, wykazują zachowania chaotyczne, niestacjonarne [84, 208, 220]. Złożoność tego zjawiska wynika z dużej liczby i różnorodności warunków geometrycznych i materiałowych, w których *wnz* mogą zaistnieć.

### 2.5.2. Wielkości opisujące emisję *wnz*

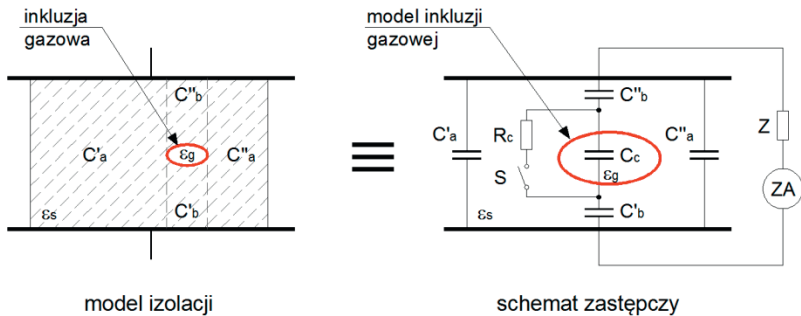
W ostatnim czasie obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania wykorzystywaniem pomiarów *wnz* do diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych WN. Za główną przyczynę należy uznać szybki rozwój techniki cyfrowej,

dzięki której możliwe jest przetwarzanie i analizowanie informacji z pomiarów *wnz* [30, 65, 66, 81, 84, 123, 247].

Wyładowaniom niezupełnym w układzie izolacyjnym towarzyszą różne zjawiska fizyczne, których obserwacja i pomiary mogą być wykorzystane do detekcji *wnz* i następnie do wyznaczenia wartości parametrów opisujących jakość i ilość emisji *wnz*. Zjawiskami tymi są między innymi: występowanie impulsu prądowego, emisja fal elektromagnetycznych, zmiany strat dielektrycznych, reakcje chemiczne, udarowe odkształcenia sprężyste i towarzysząca im emisja fali akustycznej [65, 66, 84, 141, 220].

W zależności od układu izolacyjnego, rodzaju dielektryka oraz typu *wnz*, poszczególne efekty mogą występować z różnym nasileniem. W chwili wystąpienia *wnz*, w jego kanale lub wzdłuż jego drogi następuje gwałtowny ruch ładunków. Ten impuls prądowy jest na ogół bardzo mały, ale może być w specjalny sposób zmierzony [23, 24, 65, 81, 84, 208, 220]. Z impulsem prądowym związane jest pojawienie się fali elektromagnetycznej. Fala elektromagnetyczna rozchodzi się we wszystkich kierunkach, a jej natężenie jest zależne od prądu przepływającego w kanale *wnz*.

Impuls prądowy i emisja fali elektromagnetycznej są tymi zjawiskami, które stanowią podstawę detekcji *wnz* metodami elektrycznymi [65, 66, 81, 84]. Wystąpienie *wnz* wewnątrz układu izolacyjnego może być wykryte przez rejestrację zmian parametrów elektrycznych całego układu, obserwowane na jego zewnętrznych elektrodach. Wyjaśnienie zasad pomiaru przedstawiono w literaturze [65, 66, 81, 84, 208, 220]. Najczęściej rozpatrywany jest schemat zastępczy układu izolacyjnego z pojedynczą małą inkluzją gazową, przedstawiony na rys. 2.7 [65, 220].



Rys. 2.7. Model układu izolacyjnego ze źródłem *wnz* w postaci inkluzji gazowej wraz ze schematem zastępczym [65, 220],

gdzie:

- $\epsilon_s$            przenikalność elektryczna dielektryka izolacji,
- $\epsilon_g$            przenikalność elektryczna inkluzji gazowej,
- $C_c$            pojemność inkluzji gazowej (kawerny),
- $C'_a, C''_a$      pojemności składowe równoległe do źródła *wnz* w układzie izolacyjnym,
- $C'_b, C''_b$      pojemności składowe szeregowe z inkluzją gazową,

$R_C$  zastępcza rezystancja kanału wyładowania w jego źródle,  
 $S$  łącznik sterowany wartością pola elektrycznego w źródle wyładowań.

Natężenie pola elektrycznego w inkluzji gazowej jest większe od natężenia pola w dielektryku izolacji przy założeniu jednorodności materiału izolacyjnego oraz gdy przenikalność elektryczna materiału izolacji jest większa od przenikalności inkluzji gazowej ( $\epsilon_s > \epsilon_g$ ). Pojemności ze schematu zastępczego można zapisać [65, 220]:

$$C_a = C_a' + C_a'' \quad (2.1)$$

$$C_b = \frac{C_b' C_b''}{C_b' + C_b''} \quad (2.2)$$

Jednocześnie ma miejsce nierówność:

$$C_a \gg C_c \gg C_b \quad (2.3)$$

Przyłożone napięcie o wartości przekraczającej napięcie zapłonu  $U_{cz}$  (zwarcie łącznika  $S$ ) do pojemności kawerny  $C_C$  spowoduje rozładowanie się kondensatora  $C_C$  przez oporność  $R_C$ . Opornik  $R_C$  ogranicza amplitudę prądu rozładowania  $i_I(t)$ . Przy małych wymiarach kawerny w izolacji, proces ten zachodzi w czasie około 9÷10s. Wyładowanie rozpoczyna się po przekroczeniu na pojemności  $C_C$  napięcia  $U_{cz}$ , a kończy po zmniejszeniu jego wartości do napięcia gaśnięcia  $U_{cg}$ . W zakładanym schemacie wartości tych napięć są różne dla przeciwnych biegunowości oraz zmienne w każdym kolejnym wyładowaniu [65, 220], czyli:

$$\left( | +U_{cz} | \neq | -U_{cz} | \quad \text{i} \quad | +U_{cg} | \neq | -U_{cg} | \right) \quad (2.4)$$

Różnica napięć zapłonu i gaśnięcia wyznacza zmianę napięcia na pojemności  $C_C$  [65, 141, 220]:

$$\Delta U_C = U_{cz} - U_{cg} \quad (2.5)$$

Powyższa różnica napięć jest proporcjonalna do rzeczywistego ładunku wyładowania  $q_c$  [65,220]:

$$q_c \cong (C_b + C_c) \cdot \Delta U_c \cong C_c \Delta U_c \quad (2.6)$$

Wyładowanie wywołuje zmianę napięcia na elektrodach zewnętrznych [163]:

$$\Delta U_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \Delta U_c \cong \frac{C_b}{(C_a + C_b)} \cdot \frac{q_c}{(C_b + C_c)} \quad (2.7)$$

Wynik wyrażenia (2.7) jest proporcjonalny do rzeczywistego ładunku wyładowania  $q_c$ . Niestety nie można wyznaczyć tego ładunku, bo nieznane są wartości pojemności modelu. Dla potrzeb rozwiązania zależności wprowadzono pojęcie

ładunku pozornego  $q$  [46, 46, 163]. Ładunek pozorny wyładowania odpowiada ładunkowi doprowadzonemu do zewnętrznych elektrod badanego układu, który powoduje takie same skutki (efekty) w zewnętrznym układzie pomiarowym [84, 220]. Wartość ładunku pozornego  $q$  da się wyznaczyć z równania [65, 220]:

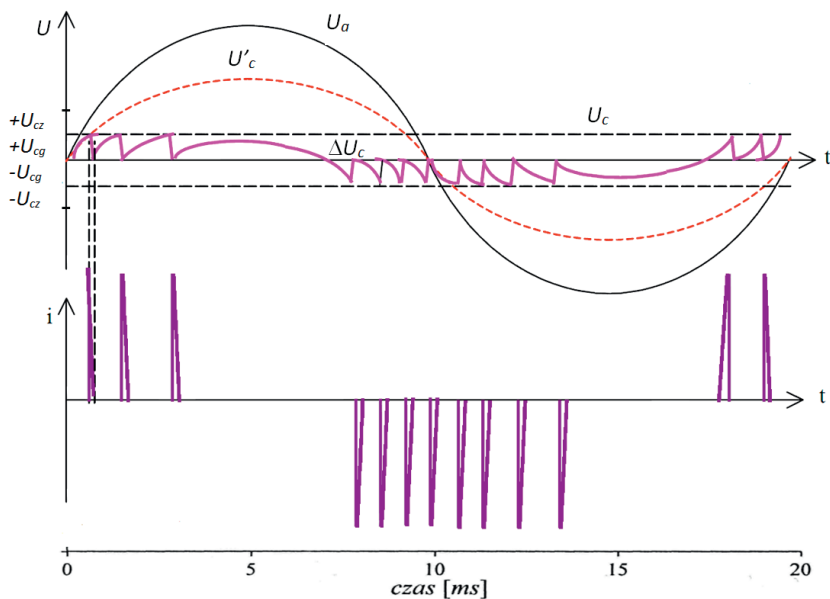
$$q \cong (C_a + C_b) \Delta U_a \quad (2.8)$$

a iloraz ładunku pozornego do ładunku rzeczywistego określa zależność [220]:

$$\frac{q_c}{q} \cong 1 + \frac{C_c}{C_b} \cong \frac{C_c}{C_b} \quad (2.9)$$

Przebiegi napięć na zewnętrznych elektrodach modelowego układu izolacyjnego (z rys. 2.7) przy napięciu przemiennym 50 Hz w pierwszym okresie napięcia probierczego  $U_a$  przedstawiono na rys. 2.8 [65,220]. Założono, że do modelu jest dołączony zewnętrzny układ pomiarowy – układ detekcyjny, w którym są rejestrowane wyładowania. Zagadnienie szczegółowo jest przedstawione w literaturze [65, 66, 81, 84, 141, 220].

Wystąpienie wyładowań powoduje w układzie zmianę pojemności oraz kąta strat dielektrycznych, co jest pomiarowo wykorzystane do diagnostyki stanu izolacji [65, 81, 84, 141, 220].



Rys. 2.8. Przebieg napięć w modelu przy napięciu przemiennym 50 Hz [141],

gdzie:

$U_a$       napięcie na zewnętrznych elektrodach układu – napięcie probiercze,  
 $U'_c$       napięcie na pojemności  $C_c$  przed wystąpieniem wyładowań,



$U''_c$	napięcie na pojemności $C_c$ w obecności wyładowań,
$U_{cz}$	napięcie zapłonu wyładowań,
$U_{cq}$	napięcie gaśnięcia wyładowań,

Zmiana ładunku w inkluzji gazowej podczas wyładowania skutkuje zmianą energii całego układu modelowego [163]. Energię wyładowania w inkluzji gazowej o pojemności  $C_c$  można określić równaniem [66, 220]:

$$\Delta W_c \cong \frac{1}{2} C_c (U_{cz}^2 - U_{cq}^2) \quad (2.10)$$

Zmianę energii całego układu modelowego  $\Delta W$  widzianą na elektrodach opisuje zależność [220]:

$$\Delta W \cong \frac{1}{2} (C_a + C_b) \cdot [U_a^2 - (U_a - \Delta U_a)^2] \quad (2.11)$$

Energia pojedynczego wyładowania  $W_i$  jest iloczynem wartości chwilowej napięcia  $U_i$  na elektrodach układu izolacyjnego w momencie wystąpienia wyładowania oraz odpowiadającego mu ładunku pozornego. Obserwowane na zewnątrz układu impulsy wyładowań mają energię o wartości dodatniej jak i ujemnej [66, 220]. Zagadnienie jest szczegółowo przedstawione w literaturze [66, 220].

Jak do tej pory nie ma polskiej normy dotyczącej *wnz* w izolacji uzwojeń silników. Procedury pomiaru *wnz* wraz z podaniem formuł obliczeniowych można znaleźć w normie międzynarodowej IEEE-1434:2000. Znane światowe firmy produkujące uzwojenia maszyn elektrycznych stosują ponadto własne, fabryczne normy, wprowadzając kryteria dotyczące intensywności *wnz* głównie dla uzwojeń generatorów. Krajowe kryteria diagnozowania układów izolacyjnych prętów generatorów przez pomiar intensywności *wnz* metodą *off-line* opracował *Instytut Energetyki* w Poznaniu [220].

Definicje pojęć związanych z emisją *wnz* zawarte są w normie krajowej PN-EN60270 oraz w normach międzynarodowych IEC 60270:2000 i IEEE-1434. Poniżej wybrano kilka z nich ze względu ich istotność z punktu widzenia prowadzonej analizy. Podstawowymi wielkościami dla *wnz* są:

- ładunek pozorny,  $q$   
Ładunek pozorny impulsu *wnz*, odpowiada ładunkowi, który wstrzyknięty w bardzo krótkim czasie między zaciski badanego obiektu spowodowałby takie samo wskazanie przyrządu pomiarowego jak impuls prądowy *wnz*. Ładunek pozorny jest zwykle wyrażany w pC (pikokulombach) lub nC (nanokulombach) [84]. Ładunek pozorny nie jest równy wielkości ładunku występującego w miejscu wyładowania, którego wartości nie można zmierzyć bezpośrednio,
- częstość powtarzania impulsów,  $n$   
Jest to całkowita liczba impulsów wyładowań w jednostce czasu, mierzona w czasie T:



$$n = \frac{N}{T} \quad (2.12)$$

gdzie:

N            liczba (całkowita) zarejestrowanych wyładowań,  
T            przedział czasu pomiaru (rejestracji).

- średni prąd wyładowań, **I**

$$I = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N |q_i| \quad (2.13)$$

gdzie:

$q_i$             ładunek pozorny pojedynczego wyładowania.

- wskaźnik kwadratowy, **D**

$$D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N q_i^2 \quad (2.14)$$

- moc wyładowań, **P**

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N q_i u_i \quad (2.15)$$

gdzie:

$u_i$             jest wartością chwilową napięcia probierczego w chwili wystąpienia *wnz* o ładunku  $q_i$ .

- napięcie początkowe wyładowań,  **$U_i$**   
Jest to najniższe napięcie, przy którym obserwuje się wyładowania za pomocą układu probierczego, w którym napięcie podawane na badany obiekt jest stopniowo zwiększane od wartości niższej (przy którym nie obserwuje się *wnz*). Napięcie to jest również oznaczane jako  $U_o$
- napięcie gaśnięcia,  **$U_e$**   
Jest to najniższa wartość, przy której obserwuje się wyładowania za pomocą układu probierczego, gdy napięcie przyłożone do obiektu badanego jest stopniowo zmniejszane od wartości wyższej, przy której obserwuje się *wnz*
- kąt fazowy  $\varphi_i$  oraz chwila wystąpienia impulsu wyładowania  $t_i$

$$\varphi_i = 360 \frac{t_i}{T} \quad (2.16)$$

gdzie:

$t_i$             czas mierzony od narastającego przejścia przez wartość 0 napięcia przemienne do wystąpienia wyładowania,  
T            okres napięcia probierczego.

- ładunek maksymalny wyładowań,  **$q_{max}$**

Jest to największy powtarzalny ładunek wyładowań występujący podczas pomiarów.

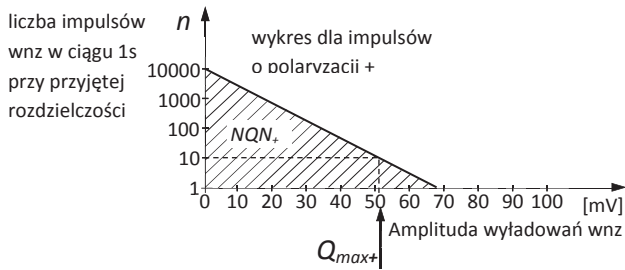
- współczynniki normalizujące:
  - współczynniki  $Q_m$   
Są definiowane jako amplituda  $wnz$  odpowiadająca występowaniu 10 impulsów na sekundę (rys. 2.9). Przy danej polaryzacji impulsów,  $Q_m$  określa jak głęboka jest degradacja izolacji w najgorszym miejscu uzwojenia [1,158]. Wskaźnik  $Q_m$  wyznacza się oddzielnie dla dodatniej i ujemnej polaryzacji impulsów  $Q_{m+}$  i  $Q_{m-}$ . Współczynniki  $Q_m$  są przez niektórych producentów aparatury diagnostycznej oznaczane symbolem  $Q_{max}$ . W dalszej części pracy przyjęto używać oznaczenie  $Q_{max}$ . Gdy zachodzi możliwość kalibracji toru pomiarowego amplitudę  $wnz$  wyraża się w pC. Przy braku możliwości kalibracji amplitudę  $wnz$  wyraża się w mV.
  - współczynniki  $NQN$  (*Normalized Quantity Number*)  
Jest to całkowita aktywność  $wnz$  przy danej polaryzacji impulsów. Określa ją dla danej polaryzacji impulsów całkowita liczba impulsów.  $NQN$  jest proporcjonalna do całkowitej ilości miejsc o pogorszonych właściwościach izolacyjnych, monitorowanych podczas pomiarów [1, 158].  $NQN$  wyznacza się oddzielnie dla dodatniej i ujemnej polaryzacji impulsów:  $NQN+$  i  $NQN-$ .
  - parametr  $PDI$  (*Partial Discharge Intensity*) [220]  
Jest to moc wyładowań, liczona według wzoru (2.14) dla rzeczywistych wartości napięć, jednakowych dla wszystkich impulsów, a nie chwilowych, indywidualnych napięć  $u_i$  (dla każdego ładunku  $q_i$ ). Jednostką  $PDI$  jest mW.
  - ilość impulsów  $n$  w czasie 1s,  
W wielu urządzeniach parametr ten oznacza się przez  $PPS$  (*Pulse Per Second*).

Relacje między wskaźnikami  $Q_{max}$ ,  $NQN$  oraz ilością impulsów  $n$  ( $PPS$ ) przedstawiono na rysunku 2.9. Na rysunku 2.10 podano dodatkowo wzajemną relację między napięciem i polaryzacją impulsów  $wnz$ .

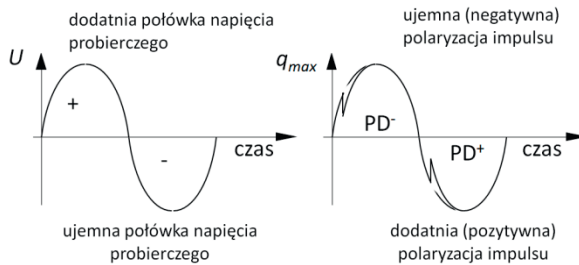
Aparatura diagnostyczna wielu firm zajmujących się pomiarami  $wnz$ , obok wyznaczenia współczynników normalizujących proponuje dodatkowe funkcje użytkowe typu:

- analiza wielkości impulsów  $wnz$ ; jest to dwuwymiarowy wykres, który przedstawia liczbę  $n$  wyładowań  $wnz$  zarejestrowanych w ciągu 1s w funkcji ich amplitudy dla danej polaryzacji impulsów  $wnz$  [1, 220],
- analiza fazy impulsów  $wnz$ ; jest to trójwymiarowy wykres, który przedstawia liczbę wyładowań  $n$   $wnz$  w ciągu 1s w zależności od kąta napięcia zasilania dla danej fazy maszyny oraz w zależności od amplitudy  $wnz$  [mV] dla danej polaryzacji impulsów  $wnz$  [1, 220],
- analiza trendów zmian wymienionych wcześniej wielkości w funkcji czasu przy uwzględnieniu temperatury, wilgotności i obciążenia; należy zauwa-

żyć, że w trakcie pomiarów *wnz* nie mierzy się rzeczywistego lokalnego wyładowania, ale ładunek indukowany tym wyładowaniem na sąsiadujących elektrodach – zaciskach układu pomiarowego (w badaniach przemysłowych przy pomiarach *on-line* jest to zmiana napięcia wyrażona w mV, co oznacza, że mierzy się falę wędrującą od płynącego ładunku do układu pomiarowego [1, 81, 220]).



Rys. 2.9. Wykres *wnz* dla przykładowej maszyny ilustrujący sposób wyznaczania współczynników normalizujących  $Q_{max+}$  i  $NQN_+$  według firmy ADWEL [1, 220]



Rys. 2.10. Wzajemna relacja przebiegu napięcia i polaryzacji ładunków podczas emisji *wnz* [1, 220]

### 2.5.3. Metody pomiaru *wnz*

Poziom *wnz*, częstość ich powtarzania oraz kąt fazowy występowania *wnz* względem przyłożonego napięcia zależą od rodzaju badanej maszyny, materiałów z jakich wykonany jest jej układ izolacyjny, stanu izolacji, rodzaju zastosowanego układu pomiarowego oraz od warunków w jakich odbywa się pomiar, w tym od poziomu zakłóceń towarzyszących pomiarom [65, 66, 81, 84, 133, 134, 182, 220].

W literaturze można znaleźć różne podziały metod pomiaru emisji *wnz* [141, 142, 203, 220, 252]. Zdaniem autora podstawowy podział obejmuje:

- metody bezpośrednie elektryczne za pomocą np. sprzęgaczy pojemnościowych (kondensatory bezwyładowaniowe), przekładników prądowych wysokiej częstotliwości *HFCT* (*High Frequency Current Transformer*) lub *RFCT* (*Radio Frequency Current Transformer*), anten radiowych wysokiej

częstotliwości *SSC (Stator Slot Couplers)*, termorezystorów *RTD* czy cewek Rogowskiego ,

- metody elektromagnetyczne, np. za pomocą sensorów napięcia (*TEV*) i pomiarów radiometrycznych *UHF*,
- metody detekcji akustycznej, np. za pomocą akcelerometrów, czujników ultradźwiękowych i mikrofonów audio,
- metody optyczne, takie jak włókno-optyczne, fotopowielacze,
- metody chemiczne, takie jak analizy rozpuszczonego gazu *DGA (Dissolved Gas Analysis)*,
- metody termiczne, takie jak termografia, pośrednie pomiary temperatury z tak zwanych *hot spotów*.

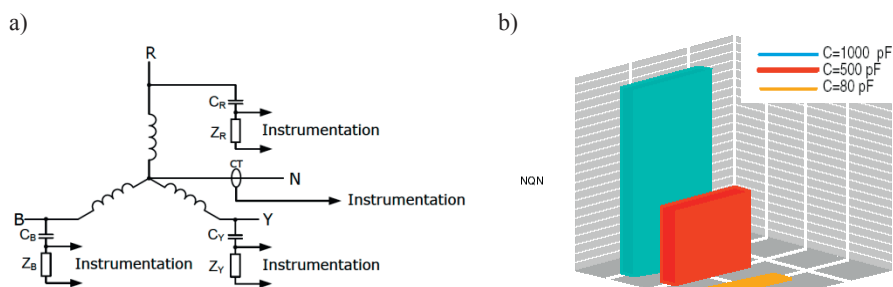
Ze względu na środowisko, w którym działają czujniki do pomiaru *wnz*, celowe jest, aby do pomiarów stosować więcej niż jeden tylko typ czujnika. Zastosowanie dwóch różnych sensorów jest bardzo przydatne w rozróżnianiu prawdziwych impulsów *wnz*, które charakteryzują się bardzo krótkim czasem trwania wyładowania (10–9 ms), niską amplitudą, innymi źródłami hałasów w środowisku oraz występowaniem innych zakłóceń poziomu impulsów. Rekomendowane metody pomiaru emisji *wnz* ze względu na obszar zastosowań przedstawiono w tabeli 2.2. W obszarze maszyn wirujących zalecaną metodą pomiaru *wnz* jest metoda elektryczna z wykorzystaniem sprzęgaczy pojemnościowych [142].

**Tabela 2.2.** Rekomendowane metody pomiaru *wnz* ze względu na obszar zastosowań według [142]

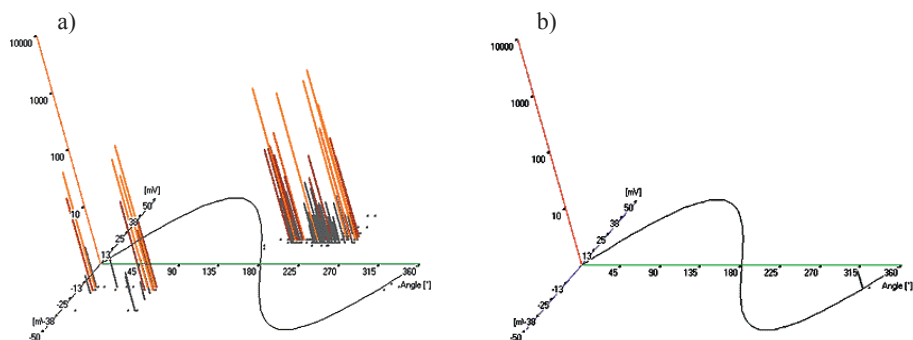
<b>zastosowanie</b>	<b>czujniki</b>	<b>rekomendacja</b>
maszyny wirujące, kable	przekładniki prądowe	zalecane
maszyny wirujące	sprzęgacze pojemnościowe	zalecane
maszyny wirujące, rozdzielnie, kable, szyny	cewki Rogowskiego	zalecane
kable, maszyny wirujące, rozdzielnie	HFCT	wymagane
rozdzielnie i aparatura rozdzielcza	TEV	wymagane
izolowane powietrzem rozdzielnice wysokiego napięcia	UHF	niezalecane
transformatory olejowe, zamknięte rozdzielnice, szyny	akustyczne	zalecane
rozdzielnie z izolacją powietrzną	metody optyczne	zalecane
transformatory olejowe, rozdzielnie z izolacją olejową	DGA	niezalecane

Zalecany dla metody bezpośredniej schemat układu pomiarowego *wnz* w silnikach i generatorach przedstawiono na rysunku 2.11a (według IEC 60270). W układzie tym należy stosować sprzęgacze pojemnościowe zintegrowane, bezwyładowaniowe, epoksydowo-mikowe przeznaczone do pomiarów impulsów wyładowań niezupełnych wysokich częstotliwości pochodzących z urzą-

zeń wysokiego napięcia z przedziału od 3.3 kV do 27 kV. Sprzęgacze należy montować na głównych wyjściach przewodów z silników, generatorów, rozdzielni lub w szrankach zaciskowych transformatorów. Schemat prawidłowego i niedopuszczalnego podłączenia sprzęgaczy pojemnościowych przedstawiono na rysunku 2.13. Czujniki przystosowane są do pracy w pomieszczeniach zamkniętych, jeżeli jednak wymaga tego sytuacja, muszą być umieszczane w specjalnych szafkach. Są nieczułe na zakłócenia pochodzące od innych przyrządów elektrycznych i elektronicznych. Pracują w przedziale częstotliwości od 4÷100 MHz w zależności od pojemności sprzęgacza. Tradycyjnie stosowane w maszynach mają 80pF pojemności.



**Rys. 2.11.** Zalecana metoda pomiaru  $w_{nz}$  w silnikach i generatorach: a) schemat układu pomiarowego według [IEC60270], b) wpływ pojemności sprzęgaczy na jakość pomiaru wskaźnika  $NQN$  (Normalized Quantity Number) [1]

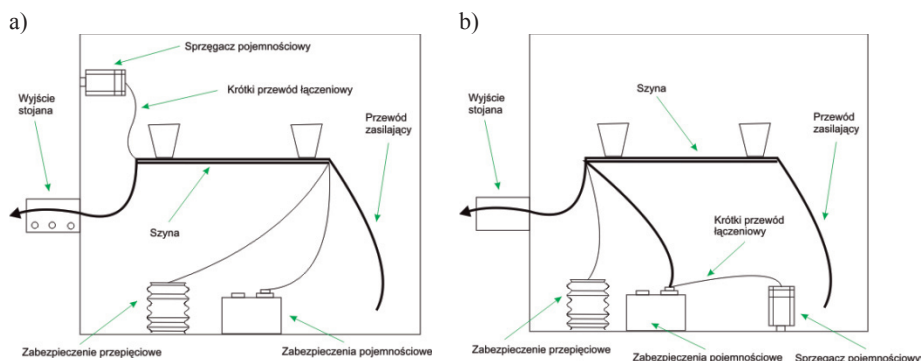


**Rys. 2.12.** Porównanie jakości pomiaru  $w_{nz}$  przy wykorzystaniu sprzęgaczy o pojemności: a) 500pF, b) 80pF [23,24]

Wykrywanie wylądowań z większą dokładnością jest możliwe poprzez zastosowanie sprzęgaczy o większej pojemności. Wzrost dokładności pomiaru w zależności od pojemności czujników przedstawia rysunek 2.11b. Innym potwierdzeniem skuteczności i dokładności sprzęgaczy o większych pojemnościach są wyniki badań przeprowadzonych przez firmę *Adwel* [1,23]. Porównano w niej jakość pomiaru przy użyciu sprzęgaczy o pojemności 500pF i 80pF.

Wyniki porównania pomiaru przedstawia rysunek 2.12. Wszystkie pomiary przeprowadzane były na tej samej maszynie i w takich samych warunkach. Doświadczenie to pokazuje, jaki wpływ na pomiary ma dobór sprzęgaczy pojemnościowych. Użycie czujników o większej pojemności daje większą pewność pomiaru. Barierą do powszechnego stosowania jest jednak bardzo wysoka cena.

Według innych autorów [23, 25, 81, 141, 220] z dobrym skutkiem w metodzie bezpośredniej mogą być stosowane termorezystory RTD, które pełnią w takim układzie pomiarowym funkcję anten częstotliwości radiowych [220]. Termorezystory są montowane wewnątrz uzwojenia maszyn elektrycznych podczas ich produkcji lub remontu dla pomiaru temperatury. Następnie termorezystory podłącza się z zespołami przyłączeniowymi za pomocą specjalnych przewodów. Konstrukcja urządzeń pozwala na podłączenie co najmniej trzech czujników po jednym na fazę. Kalibrację czujników RTD należy przeprowadzać podczas postoju maszyny elektrycznej, natomiast samo przyłączenie czujnika może odbyć się w czasie pracy silnika. „Wstrzykiwanie” impulsów w uzwojenie stojana maszyny przeprowadza się za pomocą folii aluminiowej i odpowiedniego kalibratora [178].



**Rys. 2.13.** Schematy podłączenia sprzęgaczy pojemnościowych: a) prawidłowy, b) nieprawidłowy [61]

Do pomiarów bezpośrednich są również używane anteny radiowe wysokiej częstotliwości SSC, które są ukierunkowanymi antenami radiowymi wysokiej częstotliwości. Używa się ich do wykrywania *wnz* głównie w generatorach. Pokryte są laminatem epoksydowym, który zabezpiecza je przed narażeniami zewnętrznymi. Mogą mierzyć częstotliwości od 100 do 1000 MHz. Ich impedancja wewnętrzna wynosi 50  $\Omega$  przy częstotliwości falowej [103]. Posiadają zdublowane wyjście sygnałowe, dzięki czemu możliwe jest odróżnienie wyładowań zachodzących w szczelinie od wyładowań zachodzących na czołach cewek. Czujniki te mają wymiary przystosowane do umieszczenia ich w szczelinie pomiędzy cewką a stojanem. Są wykonane w postaci pasków o grubości ok. 2 mm i długości ok. 50 cm. Szerokość ich jest uzależniona od szerokości szczeliny [220]. Dzięki czujnikom SSC monitorowane są wyładowania niezu-

pełne w żłobku, w którym się znajduje dany czujnik oraz w okolicach sześciu sąsiednich żłobków [220].

W niektórych układach do pomiaru *wnz* są również stosowane czujniki *RFCT* (*Radio Frequency Current Transformer*). Są to przekształtniki prądowe wysokiej częstotliwości. Służą do wykrywania wyładowań niepełnych w pojedynczych żyłach. Czujniki te odfiltrowują z przebiegu prądu impulsy *wnz* w zakresie częstotliwości od 500 kHz do 50 MHz. Zakłada się je na przewody uziemiające lub sygnałowe, w których napięcie nie przekracza 220 V. Czujniki mogą być zakładane na grubych przewodach oraz w miejscach, w których niemożliwe jest odłączenie przewodu; dzięki swej modułowej budowie dzieli się on na dwie części skręcane ze sobą [220].

#### 2.5.4. Systemy monitorowania on-line *wnz*

Czołowi producenci aparatury do diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych [1, 23, 24, 81, 220] proponują aparaturę do oceny stanu izolacji silników elektrycznych w trybie pracy *on-line*, w wersji stacjonarnej i przenośnej, z wykorzystaniem różnego rodzaju czujników *wnz*. Urządzenia wykorzystujące sprzęgacze pojemnościowe do wykrywania wyładowań niepełnych stosują głównie: kanadyjska firma *Adwel* (obecnie *Iris*), *Iris* oraz *Cutler Hammer* (*Eaton*). Są nimi między innymi: *PDA Premium*, *STB*, *Copa*, *PD Trac*, *InsulGard*. Stosowanie termorezystorów RTD jako czujników detekcji *wnz* to domena głównie firmy *Vibrocenter* (obecnie *Dimrus*) oraz wspomnianej już wcześniej firmy *Catler-Hammer* (obecnie *Eaton*) [1, 23, 24, 81, 190, 191, 220].

Początkowo przedmiotem zainteresowania tych firm były turbogeneratory i hydrogeneratory, a dopiero później silniki WN dużej mocy. W oparciu o literaturę [1, 23, 24, 81, 87, 88, 112, 113, 213, 220] można stwierdzić, że aparatura do diagnostyki stanu izolacji silników elektrycznych *on-line* jest w zakładach przemysłowych powszechnie instalowana. Liczba zainstalowanych systemów systematycznie się zwiększa i szacowana jest na tysiące [81, 84, 238, 239, 240, 241].

#### 2.5.5. Interpretacja wyników pomiarowych

Poprawne prowadzenie pomiarów *wnz* jest trudne [26, 27, 65, 66, 67, 161, 220]. Jednym z głównych powodów są wartości pojemności składowych  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  w modelu układu izolacyjnego (rys. 2.7) [65, 66]. Wyładowania wywołują spadek napięcia  $\Delta U_a$  na badanym układzie wielokrotnie mniejszy od napięcia probierczego  $U_a$  ( $< 10^{-3}$ – $10^{-5}$ ) [66]. Jednocześnie czas trwania pojedynczego *wnz* jest rzędu od 9–10 do 6–10 sekund i zależy od ośrodka, w którym *wnz* zachodzi. Pomiar ładunku pozornego sprowadza się do tak zwanej quasi-integracji sygnału prądowego [66]. Jest to możliwe dzięki szerokiemu widmu generowanemu przez pojedynczy impuls *wnz* – widmo od kilkuset kHz do ponad 1 GHz [66].

Każdy mechanizm uszkodzeń izolacji posiada swoje odbicie w obrazie wyładowań niezupełnych. Dlatego wykrycie tego obrazu może pomóc w określeniu, który rodzaj mechanizmu uszkodzeń jest dominujący [23, 24, 81]. Zestawienie cech charakterystycznych podstawowych mechanizmów uszkodzeń przedstawiono w tabeli 2.3. Podczas praktyki diagnostycznej można spotkać cały szereg innych obserwacji *wnz*, bardzo trudnych w ocenie i które stanowią przedmiot wielu badań wyjaśniających [84,175,177,178,220].

**Tabela 2.3.** Cechy charakterystyczne podstawowych mechanizmów uszkodzeń izolacji [81]

Mechanizm uszkodzeń	Polaryzacja	Efekt obciążeniowy	Efekt temperatury	Umieszczenie impulsów
pogorszenie termiczne	brak dominacji	brak efektu obciążeniowego	ujemny	45° i 225°
zmiany obciążeń	dominacja ujemna	wzrost impulsów ujemnych podczas obciążania	ujemny	45° dominacja ujemna
luźne uzwojenia	dominacja dodatnia	wzrost impulsów dodatnich podczas obciążania	ujemny	225° dominacja dodatnia
wyładowania żłobkowe	dominacja dodatnia	brak efektu obciążeniowego	ujemny	225° dominacja dodatnia
niewłaściwa impregnacja izolacji	brak dominacji	brak efektu obciążeniowego	ujemny	45° i 225°
zanieczyszczenia	brak dominacji	brak efektu obciążeniowego	efekt nieprzewidywalny	15°, 75°, 195°, 255°
niewłaściwe odległości między cewkami	brak dominacji	brak efektu obciążeniowego	efekt nieprzewidywalny	15°, 75°, 195°, 255°
pogorszenie stanu warstwy półprzewodnikowej i stopniującej	dominacja dodatnia	brak efektu obciążeniowego	wzrost impulsów dodatnich z temperaturą	225° dominacja dodatnia

Detekcja sygnałów *wnz*, szczególnie w warunkach przemysłowej eksploatacji, jest związana z takimi problemami jak [67]:

- zakłócenia, które powodują, że stosunek sygnału użytecznego do szumu może mieć małą wartość,
- wpływ kształtu napięcia, ważny przy rejestracji sygnałów wyładowań z rozdzielczością fazową w okresie napięcia probierczego.

Problem drugi może wynikać na przykład z przepięć łączeniowych lub z obecności harmonicznych napięcia zasilającego, przenikających do obwodu napięcia probierczego układu pomiarowego *wnz*. Harmoniczne napięcia probierczego, poprzez modulowanie jego kształtu zmieniają warunki inicjowania wyładowań, wynikające z wartości chwilowych napięcia [67,75].



W literaturze [26, 81, 84, 177, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226] przedstawiony jest pogląd, że sygnały *wnz* zmierzone na badanej maszynie nie muszą być identyczne jak przebiegi rzeczywiste *wnz* maszyny. W ocenie końcowej izolacji decyduje przede wszystkim trend zmian *wnz*. Wyeliminowany lub ograniczony w możliwie największym stopniu powinien być natomiast wpływ zakłóceń na wynik pomiaru. W tym celu przeprowadza się metrologiczne szacowanie poziomu zakłóceń.

Wielu autorów [23, 24, 81, 84, 174, 175, 177, 178, 179, 220, 229, 230] zwraca szczególną uwagę na konieczność uwzględniania przy poprawnej interpretacji wyników pomiarowych wpływu warunków mikroklimatycznych. Wykazują, że obserwowane trendy zmian wskaźników oceniających poziom aktywności *wnz* zmieniają się na tyle istotnie wraz ze zmianą temperatury i wilgotności, że utrudnia to obiektywną ocenę wyników. Temperatura robocza może silnie wpływać na wyniki badania wyładowania niezupełnego. Różne materiały różnie reagują na zmiany temperatury. Zmiany te mogą być nieznaczne w przypadku małych odchyłeń rzędu  $\pm 5^\circ$ , bądź drastyczne, dwukrotne i trzykrotne w przypadku większych rozbieżności wynoszących  $\pm 20^\circ$ . Wykonanie badania PD na maszynie przy takim samym obciążeniu, lecz w różnych temperaturach, np. co najmniej  $\pm 20^\circ$ , może pozwolić na dalsze ustalenie, jakie występują mechanizmy niszczenia. Badania te często określane są mianem prób „na zimno” i „na gorąco” [81].

Być może największe, choć nieprzewidywalne wpływy warunków otoczenia na aktywność *wnz*, to wpływy zmian wilgotności powietrza w otoczeniu maszyn chłodzonych powietrzem. Wilgotność obniża wytrzymałość powietrza na przebicie elektryczne, a przez to powoduje wzrost powierzchniowych wyładowań. Wilgotność wpływa również na elektryczne wyładowanie powierzchniowe (*electrical tracking*), a przez to może powodować okresowe zmniejszenie *wnz*. Zatem, w niektórych sytuacjach *wnz* może zwiększać się, a w innych zmniejszać się wraz ze wzrostem wilgotności względnej otaczającego powietrza. Dowiedziono, że w niektórych sytuacjach wpływ wilgotności powoduje wahania wartości wskaźników oceniających emisję *wnz* aż o 300%. Ponieważ każdy scenariusz jest inny, jest niezwykle ważne, aby podczas badania rejestrować wilgotność otoczenia, tak aby można było należycie ocenić trendy i nie podejmować decyzji na podstawie rosnących trendów, które są spowodowane wpływami wilgotności a nie zmianami stanu uzwojenia. Obecne doświadczenie wskazuje, że wilgotność wpływa głównie na aktywność powierzchniową.

Brak jest obecnie jednoznacznych wytycznych określających sposób pomiaru *wnz* w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych. Podczas pomiarów emisji *wnz* w takich warunkach zmieniają się zarówno parametry zasilania elektrycznego maszyn jak i parametry techniczne układu technologicznego, w którym te maszyny pracują. Zmieniają się również w sposób istotny warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu pracy tych maszyn. Te ostatnie wpływy, jak wskazują różne źródła literaturowe [81, 177, 220, 229, 230], mają bardzo istotny wpływ na jakość dokonywanej oceny diagnostycznej.

Biorąc pod uwagę wykazane powyżej zalety oraz ograniczenia w stosowaniu metody *wnz* w diagnostyce maszyn elektrycznych istotne jest, aby dokonać jakościowej i ilościowej oceny wpływu mikroklimatu na wielkość emisji *wnz* w warunkach przemysłowej eksploatacji. Zdaniem autora badania te powinny być prowadzone dla uzyskania jasnych kryteriów oceny przy interpretacji uzyskiwanych wyników oraz określenia wpływu warunków zmiany temperatury i wilgotności na pogarszanie się stanu technicznego układu izolacyjnego w wyniku zmiennego narażenia jej na emisję *wnz*.

Próbę przybliżenia tych zagadnień stanowi przedstawiony w kolejnych rozdziałach wynik prac badań własnych autora niniejszej monografii.

## **3. ZAKRES BADAŃ WRAZ Z CHARAKTERYSTYKĄ OBIEKTÓW BADAŃ I STOSOWANYCH NARZĘDZI**

### **3.1. Ogólna charakterystyka obszaru i sposobu badań**

Potencjał innowacyjnych technik pomiaru emisji wyładowań niezupełnych, wielkości mikroklimatu oraz pomiarów pomocniczych związanych z wyznaczeniem bilansów energetycznych i masowych w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych sprawił, że autor podjął próbę zintegrowania tych środowisk w celu zgromadzenia wyników pomiarowych umożliwiających dokonanie analizy wpływu wybranych wielkości mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych.

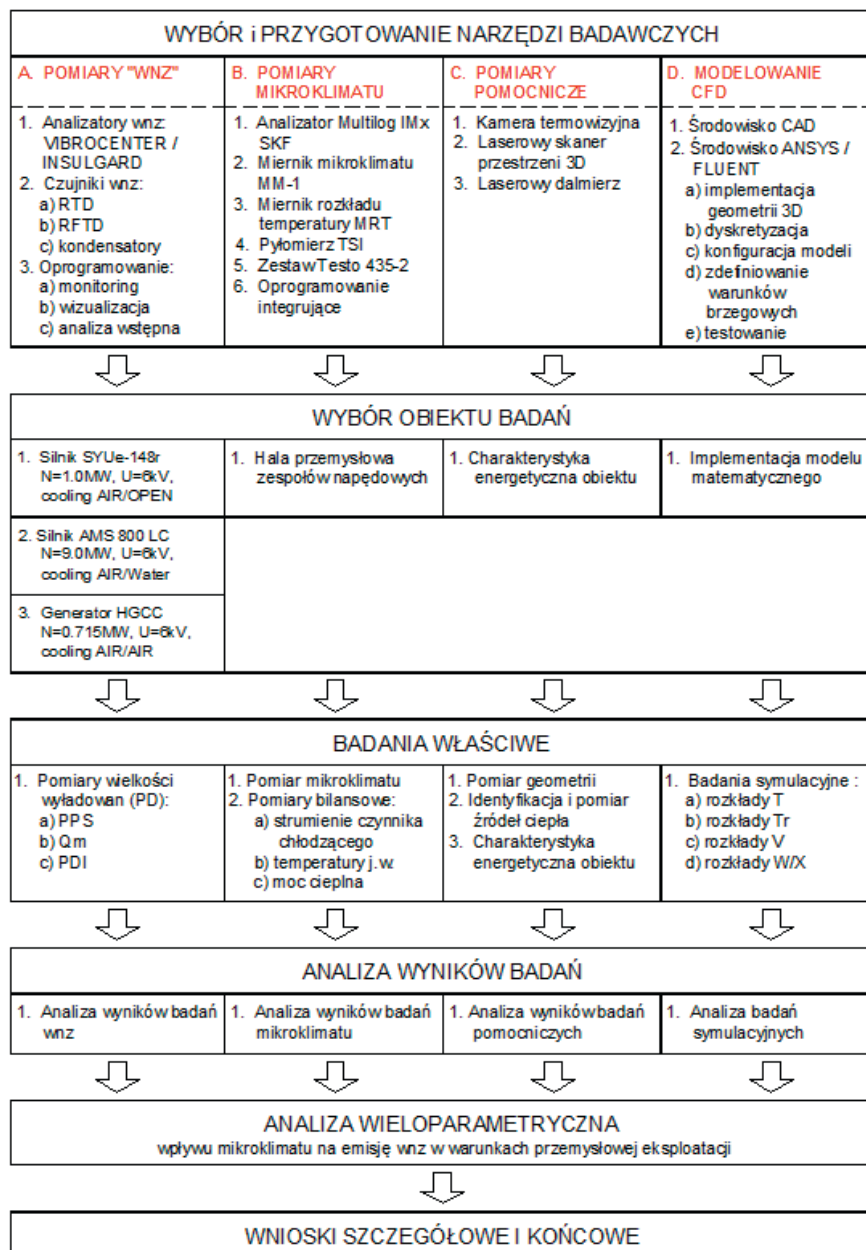
Integracja środowisk pomiarowych ma umożliwić dokonanie porównań badanych wielkości poprzez ich pomiar w tej samej chwili czasowej i w tych samych warunkach oraz zapewnić swobodny dostęp, archiwizację i przetwarzanie zgromadzonych danych w jednym wspólnym środowisku. Dla lepszego zrozumienia przebiegu zjawisk cieplno-przepływowych, jakie towarzyszą pracy maszyn elektrycznych w otaczającym je środowisku, zaplanowano wykorzystać elementy modelowania matematycznego CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pozwalającego na opis tych zjawisk w trójwymiarowej geometrii, której kształt i wymiary są zbliżone do rzeczywistych. W celu wykonania badań z wykorzystaniem tych narzędzi badawczych dokonano wyboru obiektów badań w taki sposób, aby uzyskane wyniki pozwoliły na dokonanie obiektywnej analizy, eliminując do minimum wpływ lokalnych uwarunkowań, przypadkowości oraz cech „osobniczych” badanych maszyn.

Szczegółowy zakres i strukturę badań przedstawiono w tabeli 3.1. Założono, że badania zostaną wykonane na trzech różnych maszynach elektrycznych: dwóch silnikach i jednym generatorze, które charakteryzują się różną konstrukcją, sposobem chłodzenia i warunkami pracy. W otoczeniu wszystkich maszyn zaplanowano montaż czujników do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza. Otoczenie jednego z silników (SE-1) zaplanowano poddać szczegółowej obserwacji poprzez pomiar mikroklimatu, wielkości pomocniczych niezbędnych do bilansowania strumieni energii i masy oraz zamodelowania zjawisk cieplnych i przepływowych. Wybór i przygotowanie narzędzi badawczych przeprowadzono z uwzględnieniem cech badanych obiektów oraz możliwości dostępu do aparatury pomiarowej. Część aparatury została zakupiona specjalnie dla potrzeb realizacji przedmiotowych badań, częściowo korzystano z aparatury w ramach współpracy i dzięki uprzejmości kilku zaprzyjaźnionych przedsiębiorstw.

Badania zaplanowano realizować w długim okresie czasu tak, aby zapewnić obserwowanie trendów w różnych cyklach zmian warunków mikroklimatycznych i obserwując badane maszyny w różnych warunkach ich eksploatacji.

Na bieżąco analizowano wyniki pomiarów celem kontroli poprawności działania układu pomiarowego.

Tabela 3.1. Przyjęty zakres i struktura badań



### 3.2. Charakterystyka obiektów badań

Do badań wybrano trzy różne elektryczne maszyny wirujące wysokiego napięcia, prądu przemiennego, których podstawowe cechy i parametry techniczne przedstawiono w tabeli 3.2. Pierwsza z nich to produkcja firmy *DOLMEL* z Wrocławia (obecnie *DOZAMEL sp. z o.o.*), dwie pozostałe to produkty firmy *ABB* z zakładów ze Szwecji i Szwajcarii.

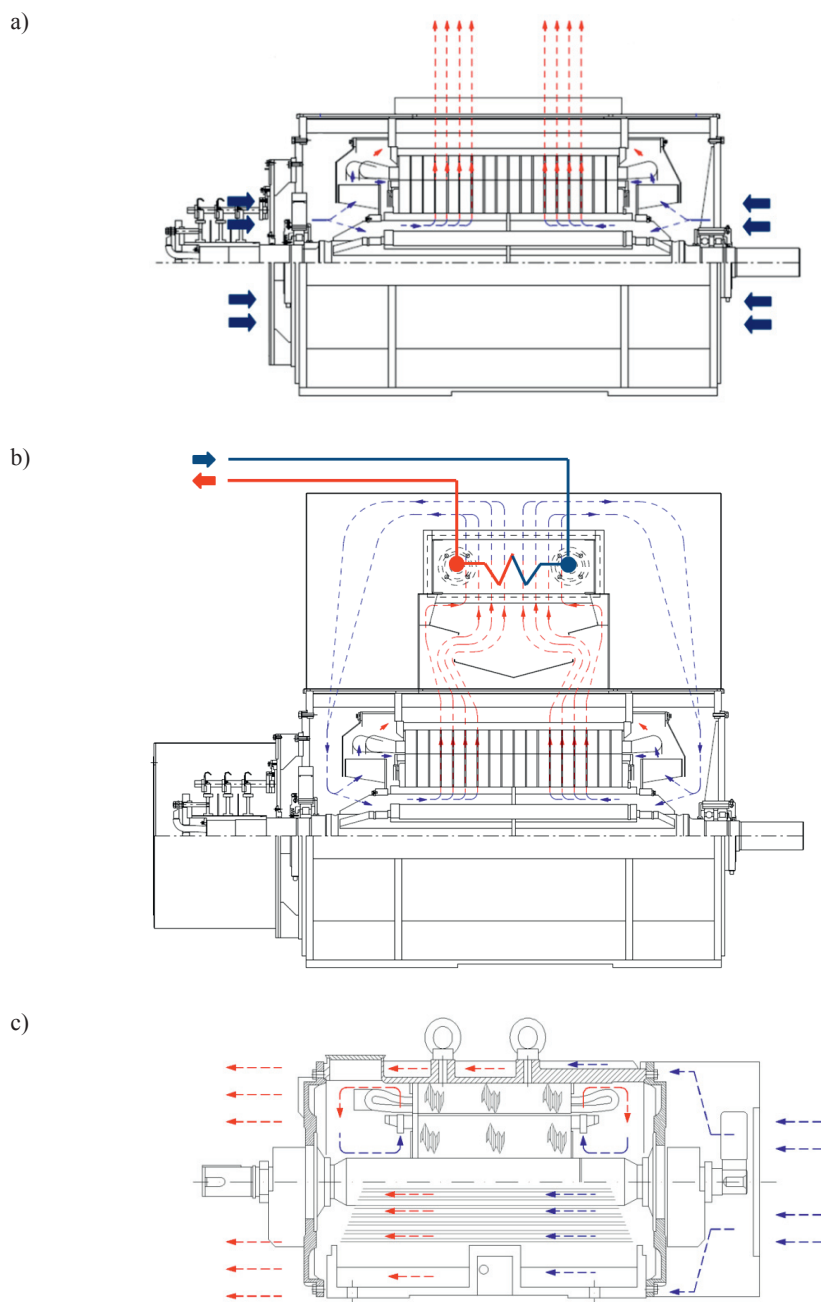
**Tabela 3.2.** Charakterystyka techniczna badanych maszyn [49,50]

Lp.	Parametr	SE-1	SE-2	SE-3
1	przeznaczenie	silnik	silnik	generator
2	typ	SYUe-148r	AMS 800 LC	HXRG 450
3		indukcyjny	indukcyjny	indukcyjny
4	moc znamionowa	1.0 MW	9.0 MW	0.715 MW
5	napięcie	6.0 kV	6.0 kV	6.0 kV
6	prąd	120 A	881 A	68.7 A
7	częstotliwość	50 Hz	50 Hz	50 Hz
8	prędkość obrotowa	738 obr/min	1500 obr/min	3600 obr/min
9	klasa izolacji	B / taśmy mikowe	F / micadur compact ®	F / micadur compact ®
10	technologia wykonania izolacji	<i>Resin-Rich</i>	<i>VPI</i>	<i>VPI</i>
11	konstrukcja obudowy	otwarta	zamknięta	zamknięta
12	chłodzenie	powietrzne	powietrzne / wodne	powietrzne / powietrzne

Badane maszyny charakteryzują się tym samym napięciem i częstotliwością, a różnią się mocą, prądem, obrotami, konstrukcją, klasą izolacji oraz sposobem chłodzenia. Konstrukcje budowy wraz ze schematami chłodzenia badanych maszyn przedstawiono na rysunku 3.1.

Silnik SE-1 to silnik o budowie otwartej chłodzony w układzie osiowo-promieniowym (rys. 3.1a). Powietrze do przewietrzania jest pobierane bezpośrednio z otoczenia hali poprzez otwory w osłonach bocznych i kierowane częściowo między żebra szkieletu wirnika, skąd przez kanał przechodzi do otworów wylotowych, a częściowo przechodzi przez uzwojenia stojana i przez przestrzeń między żebrami i kadłubem. Z silnika powietrze jest kierowane na zewnątrz bezpośrednio do hali. W środowisku pracy silnik ten jest narażony na zanieczyszczanie cząstkami pyłu cementowego. Ogólny widok silnika przedstawiono na rysunku 3.2a.

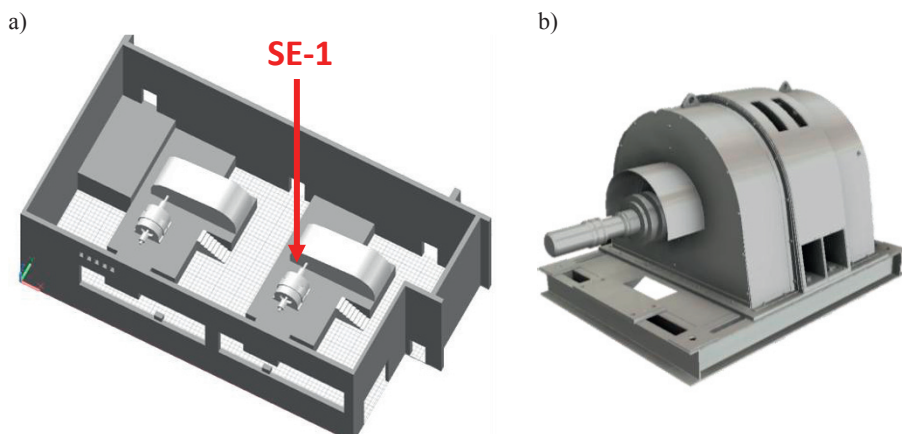
Silnik SE-2 ma konstrukcję zamkniętą z chłodzeniem pośrednim (rys. 3.1b). Pierwszy stopień chłodzenia stanowi powietrze zamknięte w przestrzeni wirnika i stojana, którego sposób przepływu jest identyczny jak w silniku SE-1, a następnie jest kierowane do lamelowego wymiennika ciepła typu powietrze/woda. Woda chłodząca wymiennika przepływa w sposób wymuszony przez pompy i kierowana jest do chłodnicy wentylatorowej, w której następuje rozproszenie energii do otoczenia zewnętrznego.



**Rys. 3.1.** Konstrukcja budowy i schemat systemu chłodzenia badanych silników: a) SE-1, b) SE-2, c) SE-3 (oznaczenia przyjęto zgodnie z tabelą 3.1)

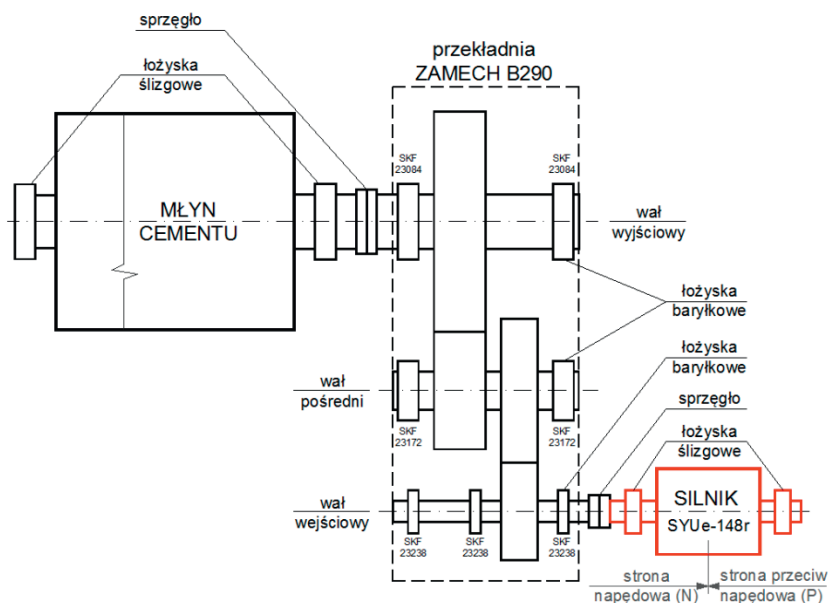
Generator SE-3 ma konstrukcję zamkniętą z pośrednim sposobem chłodzenia w układzie powietrze/powietrze (rys. 3.1c). Odbiór ciepła z powierzchni zewnętrznej korpusu obudowy następuje poprzez wymuszone osiowo omywanie powierzchni zewnętrznych generatora w wyniku pracy wentylatora zamontowanego na wale generatora oraz radiacyjnie z powierzchni korpusu.

Badane maszyny pracują w różnych warunkach otoczenia. Napęd SE-1 pracuje w zamkniętej hali przemysłowej o konstrukcji szkieletowej żelbetowej i ścianach wykonanych w technologii tradycyjnej, murowanych z cegły klinkierowej pełnej. Wymiary hali: 22.9x12x9.4 m, powierzchnia 265.5 m<sup>2</sup> i kubatura 2480 m<sup>3</sup>. Badany silnik wraz z przekładnią mechaniczną stanowi zespół napędowy młyna cementu (rys. 3.2a). W hali zainstalowany jest jeszcze drugi bliźniaczy zespół. Hala jest wyposażona w system wentylacji grawitacyjnej: nawiew przez nieszczelności oraz okresowo poprzez otwierane drzwi, wywiew przez kratki wywiewne na wysokości +7,5 m o łącznej pow. 0,75 m<sup>2</sup> [178, 179]. Dodatkowo, celem wspomagania wentylacji grawitacyjnej w okresie letnim są zamontowane dwa wentylatory nawiewne o wydajności 5500 m<sup>3</sup>/h każdy. Pomieszczenie nie jest wyposażone w instalację grzewczą – ogrzewanie hali następuje poprzez emisję ciepła od pracujących urządzeń.



**Rys. 3.2.** Obiekt badań SE-1: a) topologia hali przemysłowej wraz z lokalizacją zabudowy badanego silnika, b) widok ogólny silnika SYUe-148r

Silnik SE-1 stanowi napęd główny młyna cementu. Moment obrotowy jest przekazywany poprzez dwustopniowy mechaniczny reduktor obrotów (rys. 3.3). Przekładnia połączona jest z silnikiem oraz młynem za pomocą sprzęgieł. Silnik i przekładnia są zamontowane na masywnym fundamencie żelbetowym, który jest wyniesiony ponad poziom posadzki pomieszczenia na wysokość +1,4 m.



Rys. 3.3. Schemat technologiczny układu w jakim pracuje silnik elektryczny SE-1

Drugi z badanych silników SE-2 pracuje w hali maszyn o konstrukcji stalowej i lekkich ścianach osłonowych wykonanych z płyt wielowarstwowych. W hali jest zabudowanych 5 napędów elektrycznych, które napędzają urządzenia sprężarkowe. Hala jest wyposażona w system wentylacji mechanicznej z normowaniem temperatury jedynie w okresie zimowym. W hali jest brak instalacji grzewczej. Wszystkie silniki są chłodzone wodą w układzie zcentralizowanym. Rozpraszanie ciepła następuje w chłodni wentylatorowej zlokalizowanej na zewnątrz budynku.

Kolejny napęd elektryczny SE-3 jest zabudowany i pracuje na zewnątrz budynku. Zabezpieczenie przed oddziaływaniem warunków atmosferycznych stanowi jedynie zadaszenie.

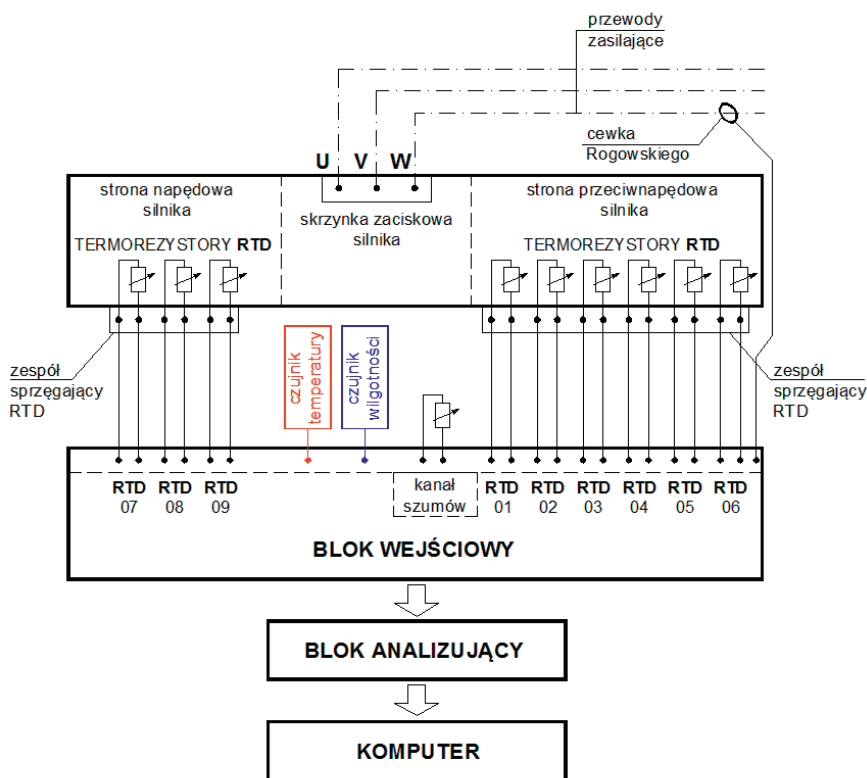
### 3.3. Instalacja do pomiaru *wnz*

#### 3.3.1. Instalacja do pomiaru *wnz* w napędzie SE-1

Instalację do pomiaru emisji *wnz* stanowi system monitoringu *on-line*, w skład którego wchodzi: urządzenie *R500* firmy *Vibrocenter*, 9 czujników *DRTD-3* współpracujących z termorezystorami *Pt100* zamontowanymi w uzwojeniach stojana silnika, 1 czujnik *RFTC* zabudowany na przewodzie neutralnym oraz 1 czujnik temperatury powietrza i 1 czujnik wilgotności względnej powietrza. Urządzenie *R500* posiada ponadto 1 kanał szumów i 2 dodatkowe kanały umożliwiające pomiar natężenia prądu i napięcia. Wszystkie kanały są izolowa-



ne, posiadają zabezpieczenia przepięciowe oraz filtry górnych częstotliwości. Przyrząd *R500* rejestruje impulsy o częstotliwości z zakresu 1MHz ÷ 20MHz [190]. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.4.



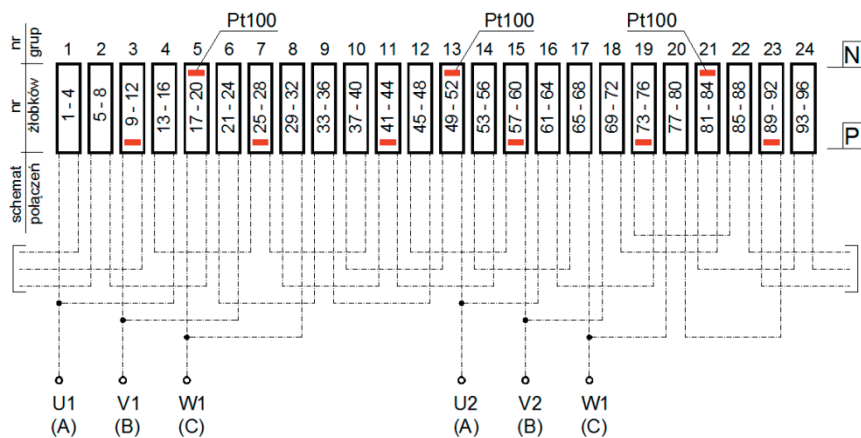
Rys. 3.4. Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego wyładowań niepełnych w silniku SE-1

Termorezystory w układzie pomiarowym pełnią funkcję anten częstotliwości radiowych, które rejestrują wyładowania niepełne i przesyłają sygnał do zespołu antenowego DRTD-3. Zespół ten jest odpowiedzialny za tłumienie i separowanie sygnału *wnz* od zakłóceń [81, 220]. Sygnał w listwie RTD jest również wzmacniany i przesyłany dalej do układu monitorującego wyładowania niepełne [81, 190]. Czujniki DRTD mierzą wyładowania niepełne w zakresie częstotliwości 1÷20 MHz [190].

Badany silnik, podczas okresowego remontu w 2009 roku, został wyposażony w 9 termorezystorów Pt100, które zainstalowano pod klinami w żłobkach stojana [220]. Trzy czujniki zlokalizowano po stronie napędowej i sześć po stronie przeciwnapędowej (rys. 3.3). Lokalizację zabudowy Pt100 graficznie przedstawiono na schemacie uzwojeń stojana (rys. 3.5) oraz na widokach od

strony napędowej i przeciwnapędowej (rys. 3.6). Szczegółowy opis lokalizujący czujniki podano w tabeli 3.3.

Do kontroli i rejestracji wyładowań niepełnych w osobno położonym przewodzie neutralnym wykorzystano czujnik RFCT firmy *Vibrocenter*. Jego wyboru dokonano w oparciu o uwarunkowania określone przez producenta. Zastosowany czujnik charakteryzuje się bardzo dużą czułością na wysokoczęstotliwościowe impulsy wyładowań niepełnych z przedziału od 0,5MHz do 50MHz [81,190].

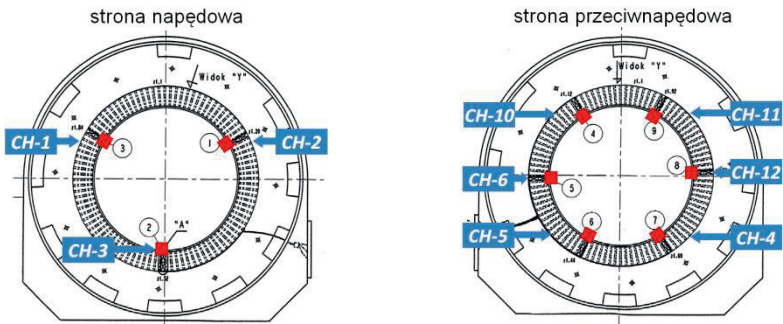


Rys. 3.5. Uproszczony schemat uzwojenia stojana silnika SE-1 wraz z lokalizacją zabudowy termorezystorów Pt100, gdzie: N – strona napędowa, P – strona przeciwnapędowa

Tabela 3.3. Zestawienie, oznaczenia i charakterystyka lokalizacyjna czujników pomiarowych

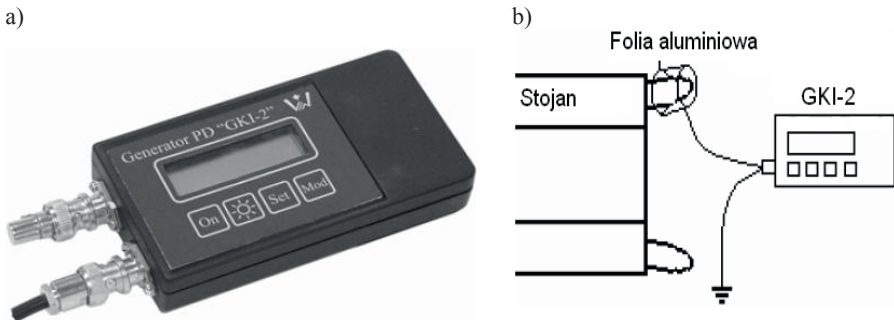
Lp.	Nazwa czujnika	Nr żłobka	Ozn. strony	faza	Ozn. Zaci-sków
1	Pt-100	92	P	C	4
2	Pt-100	76	P	A	5
3	Pt-100	60	P	B	6
4	Pt-100	44	P	C	10
5	Pt-100	28	P	A	11
6	Pt-100	12	P	B	12
7	Pt-100	84	N	B	1
8	Pt-100	52	N	A	2
9	Pt-100	20	N	C	3
10	RFCT-4				7

Zastosowany system pomiarowy pozwala mierzyć następujące parametry wyładowań niepełnych: aktywność wyładowań przy danej polaryzacji impulsów zorientowaną w przebiegu fazowym napięcia, intensywność wyładowań (PDI), amplitudę wyładowań ( $Q_{max}$ ) oraz liczbę impulsów wyładowań mierzona w ciągu 1 sekundy (PPS).

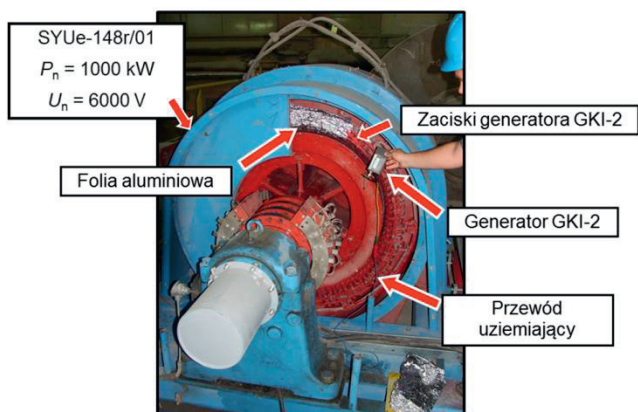


**Rys. 3.6.** Lokalizacja zabudowy czujników Pt100 po stronie napędowej i przeciwnapędowej wraz z przyjętymi oznaczeniami kanałów pomiarowych w urządzeniu R500

Instalacja do pomiaru wyładowań niepełnych została poddana kalibracji zgodnie z wytycznymi firmy *Vibrocenter* [190, 220]. Ustawienie odpowiedniej czułości kanałów wykonano za pomocą kalibratora GKI-2 (rys. 3.7a), który podłączono z uzwojeniami stojana zgodnie ze schematem kalibracji torów pomiarowych przedstawionych na rys. 3.7b. Kalibrację wykonano poprzez nałożenie folii aluminiowej na uzwojenia czołowe stojana, do folii podpinano jeden zacisk generatora GKI-2, a drugi zacisk do przewodu uziemiającego [190, 191, 220]. Przebieg procesu kalibracji przedstawiono na rysunku 3.8. Po podłączeniu kalibratora GKI-2 został wstrzykiwany ładunek o wartości  $3nC$  z częstotliwością  $25\text{ kHz}$  oraz czasem narastania impulsów ok.  $5ns$ . Dzięki wykonanej kalibracji została zmieniona czułość na kanałach pomiarowych z  $10nC/V$  na  $3nC/V$ . Efekt poprawnie wykonanej kalibracji torów pomiarowych przedstawiono na rys. 3.9.

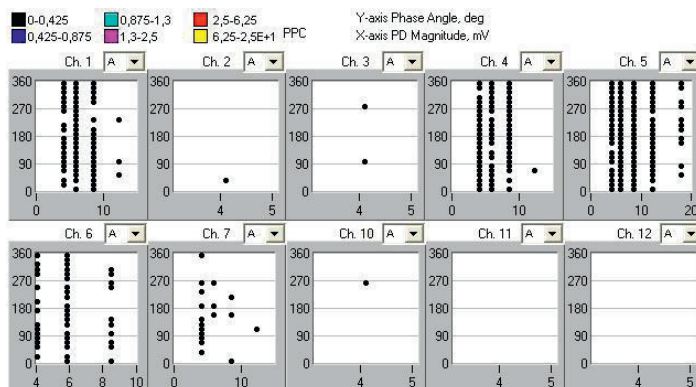


**Rys. 3.7.** Kalibracja torów pomiarowych: a) generator impulsów GKI-2, b) schemat kalibracji torów pomiarowych

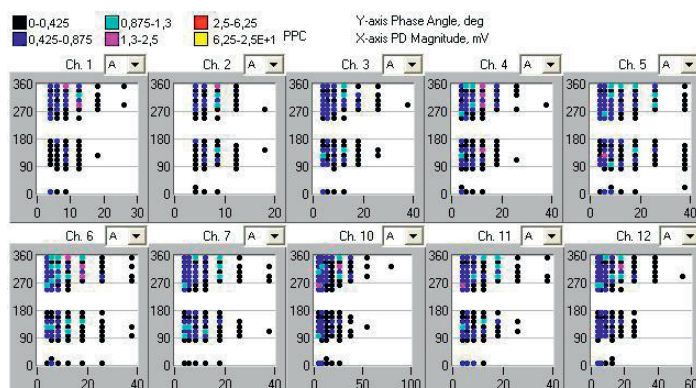


Rys. 3.8. Widok przebiegu kalibracji torów pomiarowych silnika SE-1

a)



b)



Rys. 3.9. Efekt poprawnie przeprowadzonej kalibracji torów pomiarowych: wykresy fazowo-rozdzielcze wykonane: a) przed kalibracją, b) po kalibracji

### 3.3.2. Instalacja do pomiaru *wnz* w napędach SE-2 i SE-3

Do pomiaru emisji *wnz* w napędach SE-2 i SE-3 wykorzystano komercyjny system monitorowania *on-line*, w skład którego wchodzi: urządzenie *INSULGARD* firmy *Eaton*, 3 kondensatory sprzęgające o pojemności 80pF każdy, 6 czujników RTD współpracujących z termorezystorami Pt100 zamontowanymi w uzwojeniach stojanów oraz 1 czujnik temperatury powietrza i 1 czujnik wilgotności względnej powietrza [61]. Urządzenie posiada ponadto 1 kanał szumów i 2 dodatkowe kanały umożliwiające pomiar natężenia prądu i napięcia. Podobnie jak w urządzeniu *R500* wszystkie kanały są izolowane, posiadają zabezpieczenia przepięciowe oraz filtry górnych częstotliwości. Przyrząd rejestruje impulsy o częstotliwości w zakresie 1MHz ÷ 20MHz [61,190]. Ideowy schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.10.

Sygnały z czujników są zapisywane w pamięci podręcznej urządzenia *InsulGard* w postaci pakietów danych. Są również przesyłane sygnałem 4–20mA lub łączem RS485 do systemu nadzorującego. W razie przekroczenia dopuszczalnego poziomu wyłączeń niepełnych układ analizy danych generuje alarm [61,220]. Informacji o aktualnym poziomie mierzonej emisji *wnz* dostarcza układ diod LED zabudowanych bezpośrednio na urządzeniu *InsulGard*. Odpowiedni kolor informuje o statusie. Gdy świeci się dioda koloru zielonego oznacza to poziom normalny, koloru żółtego – stan ostrzegawczy, a czerwonego – alarm. Czulość została ustawiana indywidualnie dla każdego kanału pomiarowego. Ponadto wyświetlacz na urządzeniu informuje o aktualnie wykonywanej funkcji. Jednostka monitorująca stanowi oddzielny sterownik przemysłowy, który może zostać wpięty w system jednostek połączonych w sieć, co jest wykorzystywane do przesyłania danych na większe odległości celem np. analizy przez zespół ekspercki [238, 239, 240, 241].

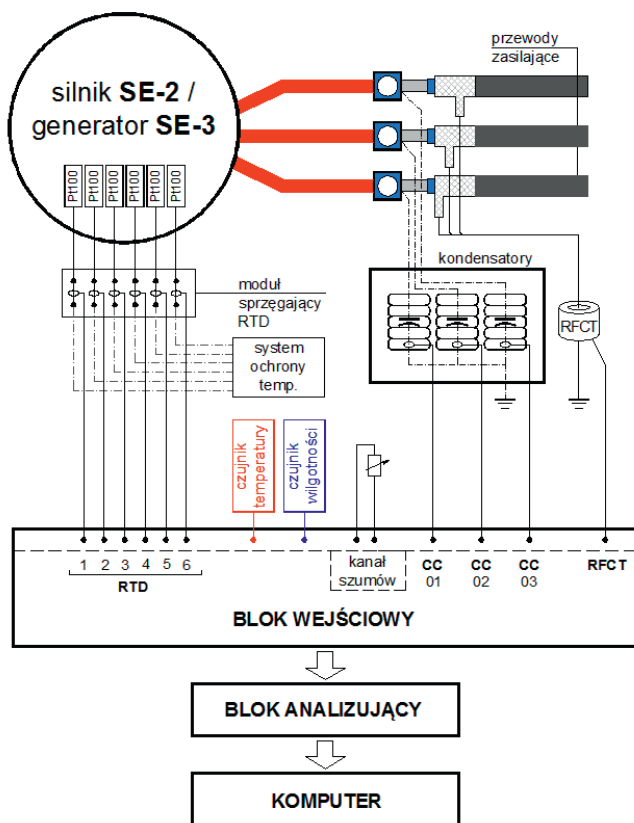
Do analizy danych na komputerze klasy PC służy oprogramowanie *InsulGard*, które umożliwia analizę otrzymanych wyników oraz tworzenie raportów stanu izolacji [61, 220].

Analogicznie jak w przypadku instalacji silnika SE-1 dokonano kalibracji torów pomiarowych poprzez wstrzykiwanie ładunków o wartości 3nC z częstotliwością 25 kHz oraz czasem narastania impulsów ok. 5ns celem dostosowania czułości.

### 3.4. Instalacja do pomiaru drgań mechanicznych i innych wielkości procesowych

Do pomiaru wielkości procesowych niezbędnych dla przeprowadzenia obliczeń bilansu energetycznego oraz drgań własnych badanego silnika wykorzystano wysokiej klasy stacjonarny analizator *SKF Multilog on-line* system *IMx-S*, przeznaczony do diagnostyki ciągłej [200]. Jednostka centralna wyposażona jest w 16 wejść analogowych i 8 cyfrowych z możliwością jednoczesnego pomiaru wszystkich kanałów do częstotliwości 40 kHz. 4 kanały cyfrowe służą do pomiaru wszystkimi standardowymi impulsatorami, zaś kolejne 4 z impulsatorami

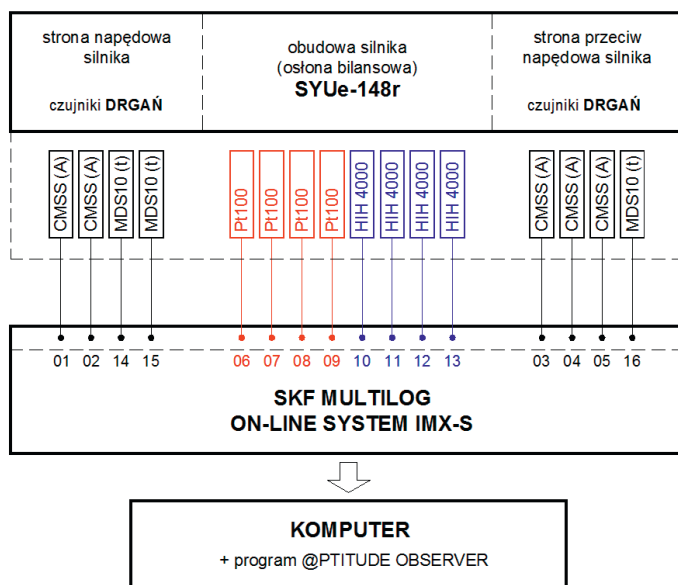
sygnału prostokątnego w zakresie wyzwalania 12-24V. Analizator posiada również indywidualne zasilanie 24V, maksymalnie 40mA/kanał. Każdy z kanałów posiada trzy zaciski przyłączeniowe: P – zasilanie, A – sygnał oraz B – masa. Ponadto każdy z kanałów analogowych jest wyposażony w 6 przełączników miniaturowych DIP (*Dual Inline Package*) pozwalających na ustawianie jednej z dwóch opcji w zależności od badanego sygnału z czujnika [200].



**Rys. 3.10.** Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego wyładowań niepełnych w napędach SE-2 i SE-3

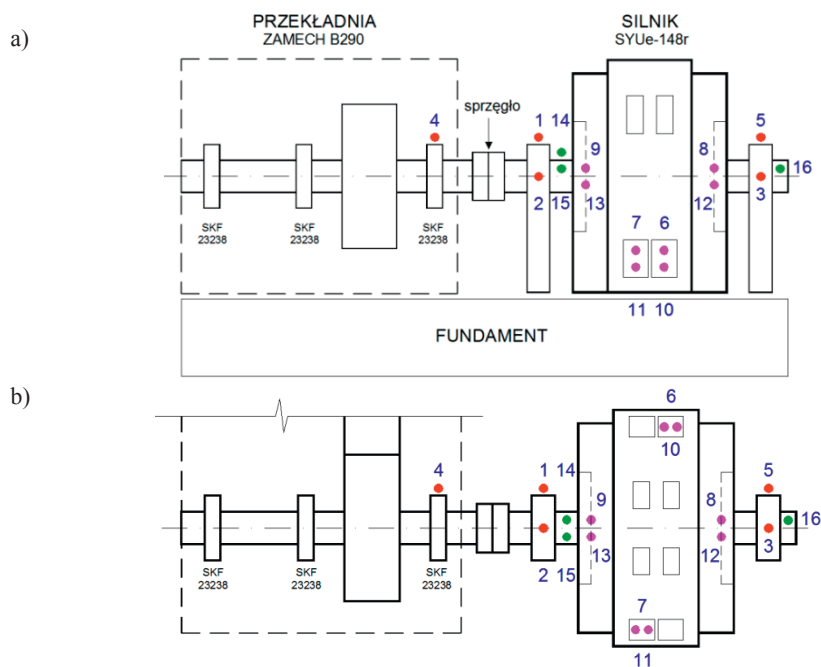
Analizator może współpracować z akcelerometrami typu ICP (ozn. według firmy SKF) o sygnale napięciowym lub prądowym (4–20 mA), B-czujnikiem (wyjście 4–20 mA), z sondą wiroprowadową (-24V) oraz dzielnikiem napięcia. Kanały cyfrowe posiadają po 4 przełączniki miniaturowe (DIP), dzięki którym można mierzyć sygnał z impulsatora dwużyłowego *tacho*, impulsatora trzyżyłowego *tacho* oraz przy zapewnieniu zasilania zewnętrznego impuls 12–24 V i impuls TTL [200].

Dla potrzeb prowadzenia pomiaru drgań własnych oraz wielkości bilansowych badanego silnika SE-1 opisany wyżej analizator wyposażono w 5 akcelerometrów do pomiaru drgań bezwzględnych, 2 czujniki do pomiaru drgań względnych wału *Technicad*, 1 znacznik fazy *Technicad* oraz 4 czujniki temperatury powietrza Pt100 i 4 czujniki do pomiaru wilgotności względnej powietrza HIH-4000. Schemat blokowy instalacji pomiarowej oraz lokalizację czujników wraz z ich charakterystyką przedstawiono na rysunkach 3.11÷3.12 oraz w tabeli 3.5.



**Rys. 3.11.** Schemat blokowy układu pomiarowego: Pt100 – pomiar temperatury, HIH – pomiar wilgotności, CMSS – czujnik drgań bezwzględnych (akcelerometry), MDS10 – czujnik drgań względnych (*technicad*)

Do zarządzania pracą analizatora z poziomu komputera osobistego podczas pracy oraz do dokonywania okresowych ustawień konfiguracyjnych wykorzystano program *@ptitude Observer* [200]. Jest to oprogramowanie służące do monitorowania i analizy danych pomiarowych gromadzonych przez urządzenie. Oprogramowanie pracuje w środowisku graficznym. Komunikacja analizatora *Multilog on-line* z programem *@ptitude Observer* odbywa się za pomocą złącza Ethernet [200].



**Rys. 3.12.** Schemat lokalizacji zabudowy czujników pomiarowych w obrębie badanego silnika SE-1 współpracujących ze stacjonarnym analizatorem *Multilog IMx-S* firmy SKF: a) widok z boku, b) widok z góry

**Tabela 3.4.** Zestawienie, oznaczenia i charakterystyka lokalizacyjna czujników pomiarowych

Lp.	Nazwa czujnika	Nazwa	Ozn. strony	Rodzaj kanału	Nr kanału
1	SKF CMSS-2200	Akcelerometr	N	A	1
2	SKF CMSS-2200	Akcelerometr	N	A	2
3	SKF CMSS-2200	Akcelerometr	P	A	3
4	SKF CMSS-2200	Akcelerometr	P	A	4
5	SKF CMSS-2200	Akcelerometr	P	A	5
6	Pt-100	temperatura	KW-1	A	6
7	Pt-100	temperatura	KW-2	A	7
8	Pt-100	temperatura	KN-1	A	8
9	Pt-100	temperatura	KN-2	A	9
10	HIH-4000	wilgotność	KW-1	A	10
11	HIH-4000	wilgotność	KW-2	A	11
12	HIH-4000	wilgotność	KN-1	A	12
13	HIH-4000	wilgotność	KN-2	A	13
14	MDS10/MDT10	drgania wzgl.	N	A	14
15	MDS10/MDT10	drgania wzgl.	N	A	15
16	MDS10/MDT10	drgania wzgl.	P	A	16

gdzie: N – strona napędowa, P – strona przeciwnapędowa, KN – kanał nawiewny, KW – kanał wywiewny powietrza



### 3.5. Instalacje do pomiaru mikroklimatu

Instalację do pomiaru wybranych wielkości mikroklimatu stanowi przenośny miernik mikroklimatu MM-01, miernik Testo 435-2 oraz miernik rozkładu temperatury MRT-01.

Miernik mikroklimatu MM-01 umożliwia wykonanie pomiarów w cyklu automatycznym następujących parametrów fizycznych: temperatura powietrza, temperatura wilgotna wentylowana, temperatura czarnej kuli, temperatura wilgotna naturalna, prędkość ruchu powietrza. Następnie na ich podstawie wyznacza wskaźniki środowiska termicznego umiarkowanego zgodnie z wymaganiami norm [164, 166, 167, 168, 170, 172, 231]. Mierzone i wyznaczane za pomocą miernika mikroklimatu wielkości środowiska termicznego zestawiono w tabeli 3.4. Wygląd miernika mikroklimatu przedstawiono na rysunku 3.11a.

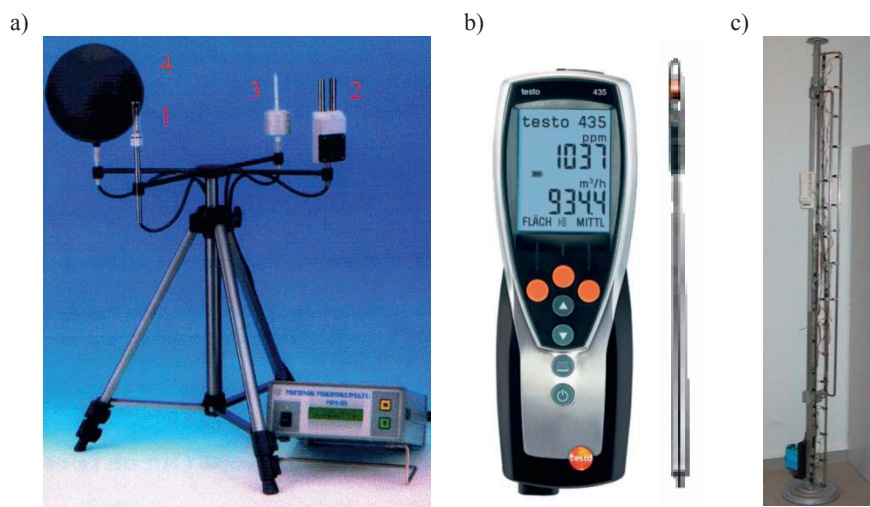
Miernik mikroklimatu MM-01 jest przyrządem zbudowanym w oparciu o mikroprocesor, w którym wszystkie czynności sterujące, pomiarowe i obliczeniowe wykonywane są według programu zawartego w pamięci stałej. Program realizuje określone algorytmy pracy i zasady obliczeń, wyznaczając wskaźniki oceny komfortu cieplnego środowisk umiarkowanych PMV i PPD.

**Tabela 3.4.** Charakterystyka metrologiczna miernika MM-01

Ozn.	Wielkość mierzona	Zakres pomiarowy	Jedn.	Rozdzielczość	Maksymalna niepewność pomiaru
$t_a$	temperatura powietrza	-40...+120	°C	0,1	$\pm 0,2^\circ\text{C}$ (0 ÷ +60°C) $\pm 1,0^\circ\text{C}$ (-40 ÷ +120°C)
$t_h$	temp. wilgotna wentylowana	0...+60	°C	0,1	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
$t_g$	temp. czarnej kuli	-20...+150	°C	0,1	$\pm 0,3^\circ\text{C}$ (-20 ÷ +60°C) $\pm 1,0^\circ\text{C}$ (-20 ÷ +150°C)
$t_w$	temperatura wilgotna naturalna	+5...+50	°C	0,1	$\pm 0,3^\circ\text{C}$
$V$	prędkość ruchu powietrza	0...10	m/s	0,01	$\pm 0,05\text{m/s} + 5\%$
$t_d$	temperatura punktu rosy	0...+50	°C	0,1	$\pm 0,3^\circ\text{C}$
$t_r$	średnia temperatura promieniowania	-40...+150	°C	0,1	$\pm 0,5^\circ\text{C}$ (-40 ÷ +50°C) $\pm 1,0^\circ\text{C}$ (50 ÷ +150°C)
$t_o$	temperatura operacyjna	-30...+50	°C	0,1	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
$RH$	wilgotność względna	5...100	%	0,1	$\pm 3\%RH$
$Pa$	prężność pary wodnej	0,5...10	kPa	0,01	$\pm 0,1\text{kPa}$
$PMV$	średnia ocena komfortu	-3...+3	-	0,01	-
$PPD$	odsetek niezadowolonych	5...100	%	0,1	-

Do pomiaru prędkości powietrza służy sonda termooanemometryczna, która pozwala na osiągnięcie dużej dokładności wskazań niezależnie od kierunku ruchu powietrza. Do pomiaru wszystkich temperatur wykorzystywane są platynowe czujniki termorezystorowe PT100 klasy I pracujące w układzie kompensującym spadki napięcia na przewodach doprowadzających. Do pomiaru wilgotności powietrza miernik wykorzystuje metodę psychrometryczną. Sonda pomiarowa zawiera typowy dla tego rodzaju przyrządów układ dwóch termometrów, z których jeden obleczony jest tkaniną bawełnianą, zwilżaną z jednego końca wodą destylowaną znajdującą się w zbiorniczku o pojemności 5dm<sup>3</sup>. Drugi, swobodny, pełni rolę termometru suchego, a jednocześnie przeznaczony jest do pomiaru temperatury powietrza. Oba termometry osłonięte są chromowanymi rurkami metalowymi chroniącymi je przed wpływem promieniowania cieplnego oraz niekontrolowane omywanie powietrzem zasysanym przez przyległy wentylator [173].

Przyrząd Testo 435-2 służy do oceny jakości powietrza w pomieszczeniu w zakresie temperatury, wilgotności i prędkości powietrza (rys. 3.11b). Posiada pamięć do 10.000 odczytów, oprogramowanie PC do analizy, archiwizacji i dokumentacji danych. Termiczna sonda prędkości z pomiarem temperatury i wilgotności ma średnicę 12 mm i teleskopowy uchwyt (maks. 745 mm). Zakresy pomiarowe: pomiar temperatury -20...+70°C, wilgotności 0...+100%, prędkości 0...+20m/s [175].



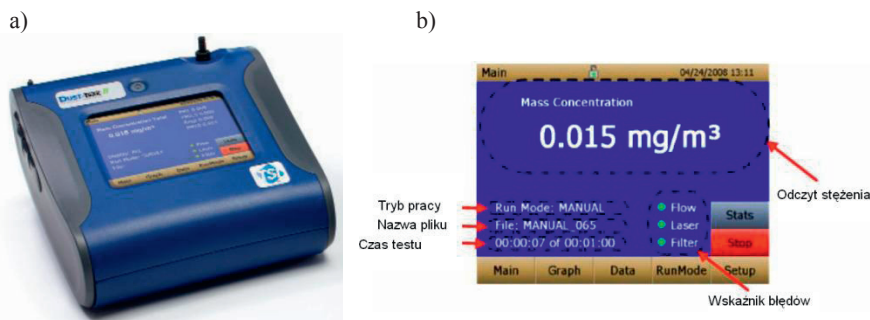
**Rys. 3.11.** Mierniki mikroklimatu: a) MM-01, gdzie: 1 – sonda prędkości ruchu powietrza, 2 – czujnik temperatury powietrza i temperatury wilgotnej, 3 – czujnik temperatury wilgotnej naturalnej, 4 – czujnik temperatury w czarnej kuli; b) Testo 435-2 z sondą wielofunkcyjną, c) MRT-01

Miernik rozkładu temperatury MRT-01 wyposażony jest w 21 czujników temperatury osadzonych na konstrukcji stalowej (rys. 3.11c). Konstrukcja nośna

oraz sposób mocowania czujników temperatury umożliwia zmianę długości przyrządu oraz regulacji odległości między czujnikami. Jako czujniki temperatury wykorzystano diody prostownicze krzemowe małej mocy w obudowie szklanej typu 1N4148. Czujniki zamocowane są w obudowach chroniących je przed wpływem promieniowania cieplnego. Czujniki są zgrupowane w trzech sekcjach pomiarowych. Układ przełączający składa się z sekcji przekaźników kontaktownych sterowanych cyfrowo z komputera poprzez moduły ADAM serii 4000. Czujniki temperatury są wykalibrowane. Kalibracja polegała na wprowadzeniu poprawek korekcyjnych do programu przetwarzającego dane. Przy przetwarzaniu mierzonego spadku napięcia na złączu  $p-n$  program wykorzystuje wprowadzoną wartość spadku napięcia, które odpowiada temperaturze przyjętej za wzorcową oraz współczynnik nachylenia wyznaczony indywidualnie dla każdej diody. Wyznaczenia współczynników korekcyjnych dokonano przy użyciu termostatu LAUDA UB-30. Urządzenie to pozwala na ustalenie temperatury wody w zbiorniku z dokładnością do  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Ostatecznie niepewność standardową typu A miernika MRT-01 wyznaczono na poziomie  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$  [169].

Pomiar zapylenia wykonano za pomocą pyłomierza *DUSTTRAK II 8530* (rys. 3.12). Jest to narzędzie najnowszej generacji zasilane poprzez akumulator jak również z gniazdka sieci. Zasada działania polega na analizie rozproszonego światła poprzez fotometr laserowy, który podaje w czasie rzeczywistym pomiary masy stężenia różnych pyłów w powietrzu. Wykorzystuje on system, w którym powietrze w płaszczu izoluje aerozol przed optyką umieszczoną w osobnej komorze, dzięki temu optyka jest zawsze czysta, co zwiększa niezawodność i utrzymanie zapylenia optyki na niskim poziomie.

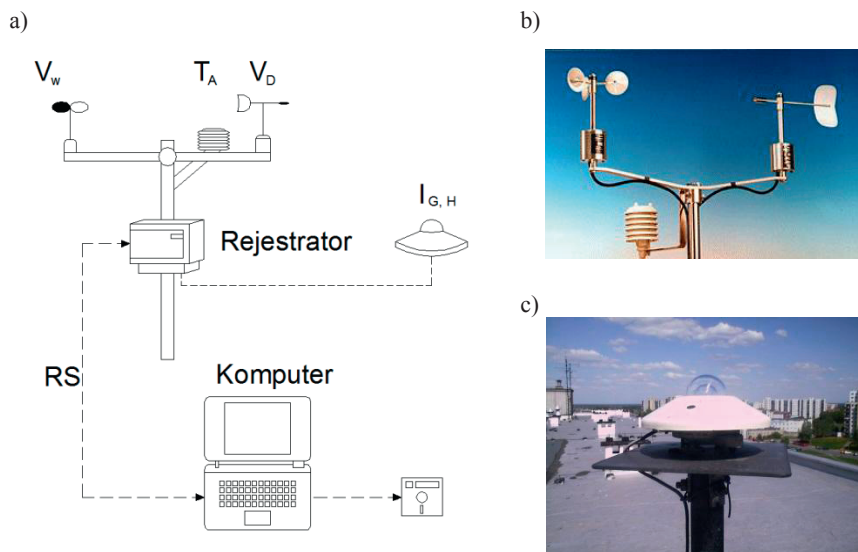
Pyłomierz nadaje się zarówno do czystych pomieszczeń biurowych, jak i miejsc pracy przemysłowych, budowlanych i ochrony środowiska zabytków oraz innych zastosowań zewnętrznych. *DUST TRAK II* monitoruje wartości zanieczyszczeń w powietrzu takie jak kurz, dym, opary i mgły. Głównymi zaletami są: ręczne i programowalne funkcje rejestrowania danych, sterowanie i ustawienia poprzez dotykowy pulpit, zakres stężenia  $0,001$  do  $400 \text{ mg/m}^3$ , wewnętrzne badania jakości powietrza oraz zdalny monitoring.



Rys. 3.12. Pyłomierz *DUST TRAK II 8530*: a) widok ogólny, b) widok ekranu pomiarowego – statystyka bieżącej próby

Do pomiaru wartości zewnętrznych parametrów meteorologicznych wykorzystano zestaw przyrządów obejmujących czujnik temperatury powietrza atmosferycznego  $T_A$ , czujnik kierunku  $V_D$  i prędkości  $V_W$  wiatru oraz czujnik natężenia promieniowania słonecznego sumarycznego na powierzchni poziomej  $I_{G,H}$ . Schemat blokowy oraz wygląd przyrządów pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.13. Czujnik temperatury powietrza atmosferycznego zawiera termistor typu NTC w osłonie i zapewnia dokładność pomiaru 1% w przedziale temperatury  $(-20 \div +50^\circ\text{C})$ . Czujnik kierunku wiatru oparty jest na odczycie rezystancji potencjometru pierścieniowego i umożliwia dokładność pomiaru  $2^\circ$  w zakresie  $0 \div 360^\circ$  dla  $v > 5\text{m/s}$ , przy progowej czułości  $v > 0.6\text{m/s}$ . Czujnik prędkości wiatru pracuje na zasadzie zliczania impulsów zadawanych przez anemometr kubelkowy w odstępach 10-minutowych. Dokładność pomiaru wynosi 1%. Czujnik natężenia promieniowania słonecznego sumarycznego zawiera stos termoelektryczny. Dokładność pomiaru wynosi 3,5% [169].

Wymienione przyrządy są podłączone do automatycznego rejestratora cyfrowego. 12-bitowy przetwornik A/C rejestratora zapewnił podstawową dokładność 0,2% w przedziale temperatury otoczenia  $(-20 \div +60^\circ\text{C})$ . Odczyty gromadzono w pamięci półprzewodnikowej. Zawartość pamięci rejestratora kopiowano do pamięci zewnętrznej komputera przenośnego poprzez złącze szeregowo. Wszystkie czujniki pomiarowe wraz z rejestratorem podczas pomiarów były zlokalizowane na dachu budynku na wysokości około 22 metrów nad poziomem terenu.



**Rys. 3.13.** Stacyjka do pomiarów meteorologicznych: a) schemat zestawu przyrządów do pomiaru wartości parametrów meteorologicznych, b) widok czujnika pomiaru prędkości, kierunku wiatru i temperatury zewnętrznej, c) widok czujnika pomiaru promieniowania słonecznego

### 3.6. Instalacje do pomiarów pomocniczych

Instalację do pomiarów pomocniczych stanowi laserowy skaner przestrzeni *FX 3D*, dalmierz laserowy firmy *Leica* oraz kamera termowizyjna *VarioCAM Head*. Urządzenia wykorzystano do pomiaru geometrii i wymiarów pomieszczenia, w którym pracuje badany silnik SE-1 oraz do zinwentaryzowania występujących w pomieszczeniu źródeł ciepła. Ponadto kamerę termowizyjną wykorzystano do pomiaru rozkładu temperatury na powierzchniach zewnętrznych badanego silnika i współpracującej z nim przekładni mechanicznej. Pomiary dokonywano w różnych warunkach eksploatacyjnych. Uzyskane wyniki wykorzystano do określenia warunków brzegowych oraz weryfikacji wyników modelowania numerycznego zjawisk cieplno-przepływowych.

### 3.7. Modelowanie zjawisk cieplnych i przepływowych

Rozwiązanie licznych problemów związanych ze znajomością i kontrolowaniem pewnych zjawisk cieplnych i przepływowych w pomieszczeniach zamkniętych wymaga wielu badań na obiektach rzeczywistych i na modelach teoretycznych. Obie z wymienionych form badań, w warunkach zróżnicowanych systemów technologicznych, są czasochłonne i wymagają zaangażowania dużych środków finansowych i dysponowania licznym zespołem badawczym. Dzięki rozwojowi modeli matematycznych, metod numerycznych oraz zwiększeniu mocy obliczeniowej współczesnych maszyn cyfrowych, możliwe jest prowadzenie analiz zjawisk cieplno-przepływowych z wykorzystaniem elementów numerycznej mechaniki płynów i wymiany ciepła, znanych pod nazwą CFD (*Computational Fluid Dynamics*) [124, 125, 171, 172].

Najczęściej do opisu przepływu ciepła pomiędzy źródłami ciepła a otoczeniem wykorzystywane są proste modele matematyczne [68, 70, 168, 170]. Cechą charakterystyczną tych modeli są założenia, które pozwalają traktować rozpatrywany układ jako obiekt w przestrzeni jedno- lub dwuwymiarowej. W efekcie tych badań otrzymujemy uśrednione wartości rozpatrywanych wielkości, takich jak temperatura powietrza w pomieszczeniu, temperatura czynnika grzejącego czy strumień ciepła jaki należy dostarczyć do pomieszczenia w celu zapewnienia wymaganej temperatury.

W badaniach komfortu cieplnego wymagana jest znajomość między innymi rozkładów temperatury i prędkości lokalnych powietrza w badanym obszarze oraz rozkładu temperatury na powierzchni przegród budowlanych. W tym celu obiekt badań należy rozpatrywać w odpowiednio zdefiniowanym obszarze. Zagadnienia modelowania zjawisk cieplno-przepływowych w przestrzeni dwu- lub trójwymiarowej jest zadaniem złożonym [169, 170, 171, 174, 176, 186, 188, 195]. Do ich opisu wykorzystuje się modele oparte na równaniach ciągłości przepływu, równaniu ruchu oraz równaniu transportu energii. Przykłady zastosowania takich modeli w analizie zjawisk cieplno-przepływowych w zamkniętych obszarach można znaleźć między innymi w pracach [15, 47, 58, 68, 70, 106, 124, 125, 130, 137, 145, 146, 154, 156, 169, 174]. Każdy z rozpatrzonych

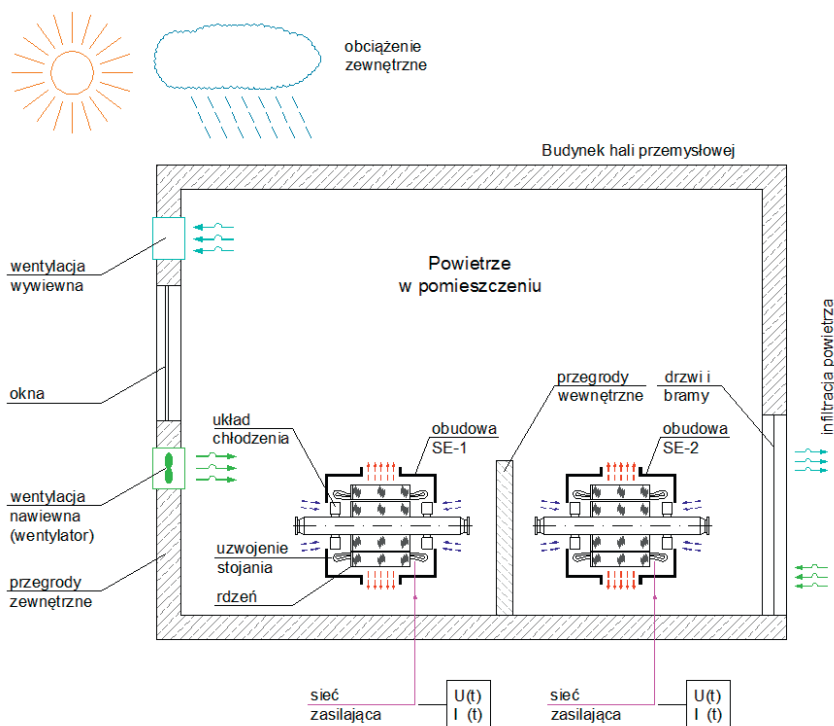
w nich przypadków jest inny pod względem rozpatrywanej geometrii oraz rodzaju prowadzonej analizy.

Przypadki modelowania zjawisk cieplno-przepływowych obejmujących wymianę ciepła w przestrzeni trójwymiarowej można znaleźć w publikacjach [137, 169, 170, 174, 195]. Tu również wykorzystuje się ogólne równania hydro- i termodynamiki. W pracach tych rozpatruje się proste geometrie, w których definiuje się przegrody jako idealne izolatory lub ściany o zdefiniowanych warunkach brzegowych. W niektórych z tych publikacji rozpatruje się również wentylację pomieszczenia. Cytowane publikacje zawierają fragmentaryczne wyniki badań, ilustrujące raczej możliwości metod obliczeniowych niż próbę rozwiązania konkretnych problemów.

## 4. MODEL ZJAWISK CIEPLNO-PRZEPLYWOWYCH ŚRODOWISKA PRACY MASZYN ELEKTRYCZNYCH

### 4.1. Koncepcja opisu zjawisk

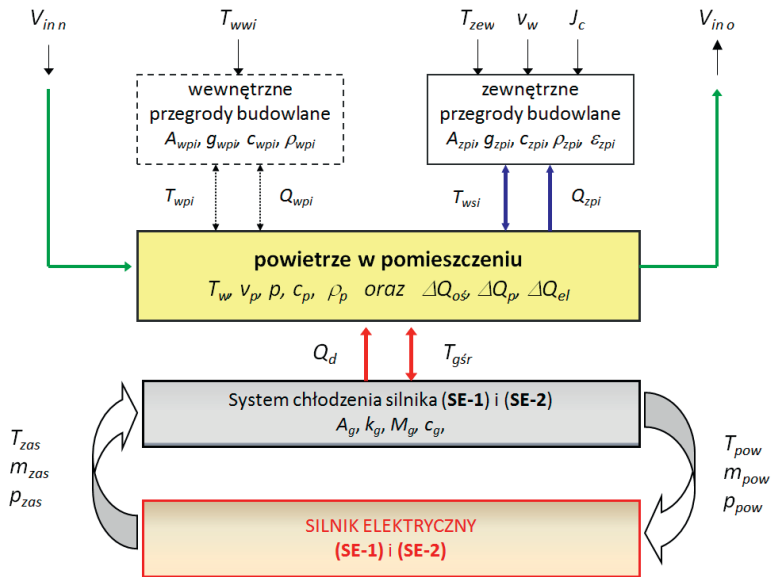
Do opisu zjawisk fizycznych zachodzących w pomieszczeniu pracujących maszyn elektrycznych konieczne jest sformułowanie modelu matematycznego opisującego wymianę ciepła na drodze przewodzenia, konwekcji i promieniowania z uwzględnieniem ośrodka, w którym następuje wymiana ciepła. Ideowy schemat koncepcji opisu zjawisk przedstawiono na rysunku 4.1. Schemat opisujący strukturę wymiany ciepła i masy w badanym pomieszczeniu przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.1. Przyjęty schemat ideowy struktury modelu zjawisk cieplnych i przepływowych

Zjawiska cieplno-przepływowe opisano równaniami: ciągłości przepływu, ruchu, transportu energii dla przepływów jedno- i wielofazowych przy uwzględnieniu zjawiska promieniowania, które opisuje równanie transportu promieniowania. Model matematyczny umożliwia rozpatrywanie zjawisk cieplno-przepływowych w trójwymiarowej przestrzeni geometrycznej badanego pomieszczenia.





**Rys. 4.2.** Schemat struktury wymiany ciepła i masy w pomieszczeniu:  $T_{zew}$  – temperatura zewnętrzna,  $v_w$  – prędkość wiatru,  $J_c$  – natężenie promieniowania słonecznego,  $V_{inn}$ ,  $V_{ino}$  – infiltracja powietrza (napływ i odpływ),  $T_{wsi}$  – temperatura powierzchni przegrody zewnętrznej,  $Q_{zpi}$  – straty lub zyski ciepła przez przegrody zewnętrzne,  $Q_d$  – strumień ciepła doprowadzony przez silnik,  $T_{zas}$ ,  $T_{pow}$  – temperatura czynnika chłodzącego,  $m_{zas} = m_{pow} = m_g$  – strumień powietrza chłodzącego,  $p_{zas}$ ,  $p_{pow}$  – ciśnienie, SE-1 i SE-2 – silniki elektryczne

## 4.2. Model zjawisk cieplnych i przepływowych

### 4.2.1. Wymiana ciepła na drodze konwekcji

Zjawisko przepływu ciepła w przestrzeni pomieszczenia związane jest z ruchem powietrza przenoszącym ciepło pomiędzy przegrodami o różnych temperaturach oraz z wymianą energii zachodzącą w powietrzu.

Poruszające się powietrze podlega zasadzie zachowania ilości substancji wyrażonej równaniem ciągłości [108, 205, 218, 244, 245]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

Ruch płynu lepkiego, nieściśliwego w zakresie przepływów laminarnych dla prostych modeli można opisać równaniami *Naviera-Stokesa* [205]. W pomieszczeniu pracujących maszyn elektrycznych przy powierzchniach ciał wymieniających ciepło występują różnice temperatur powodujące zmianę gęstości powietrza. Powstałe różnice gęstości powodują powstanie sił wyporu [6, 68, 112, 125]. Przy konwekcji swobodnej, jak i wymuszonej zmiana gęstości płynu wywołana temperaturą z reguły nie wpływa znacząco na zmianę prędkości przepływu powietrza [6, 68, 169, 108, 205, 244]. Ze względu na charakter prowa-



dzionej analizy autor uznał za zasadne uwzględnić jednak te zależności. Założono, że siła ciężkości będzie działała zgodnie z kierunkiem wyznaczonym przez oś z przyjętego układu współrzędnych oraz że siła wyporu będzie proporcjonalna do wartości iloczynu ( $\rho \cdot g$ ). Wówczas zmiany gęstości ( $\rho - \rho_o$ ) w funkcji zmiany temperatury ( $T - T_o$ ) zależą od wartości współczynnika rozszerzalności objętościowej  $\beta$ :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T_o} \quad (4.2)$$

Wykorzystując równanie stanu gazu doskonałego wyrażenie  $(\rho_o - \rho)$  po przekształceniach zastąpiono wyrażeniem *Boussinesqa*:

$$\rho_o - \rho = \rho \beta (T - T_o) \quad (4.3)$$

Wyrażenie to jest słuszne dla małej różnicy temperatury płynu, ponieważ współczynnik rozszerzalności objętościowej jest funkcją temperatury. Warunek ten określa się zależnością [6]:

$$\frac{|\delta \rho|}{\rho_o} = \frac{|\rho - \rho_o|}{\rho_o} = \beta (T - T_o) \ll 1 \quad (4.4)$$

Wprowadzając wyrażenie (4.3) do równania pędu otrzymuje się równanie, które uwzględnia zmianę gęstości płynu wynikającą ze zmiany temperatury:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - g_i \rho \beta (T - T_o) \quad (4.5)$$

Pełny opis matematyczny zjawiska konwekcji oprócz równania ciągłości i równań ruchu obejmuje równanie transportu energii. Równanie to otrzymuje się przez zastosowanie I zasady termodynamiki i ma postać [108,205,244]:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{Dp}{Dt} + \Phi + q_v \quad (4.6)$$

Ze względu na małą lepkość powietrza pominięto dysypację energii ( $\Phi=0$ ) [6, 68, 112]. Z uwagi na niewielkie prędkości powietrza pominięto również pochodną substancjalną ciśnienia ( $\Delta p / \Delta t = 0$ ). Równanie (4.6) upraszcza się więc do postaci:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q_v \quad (4.7)$$

W warunkach ustalonej wymiany ciepła konwekcję swobodną w pomieszczeniu opisano układem równań, które w postaci unormowanej przyjmują postać [6, 68]:

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (4.8)$$

$$\sqrt{\frac{Ra}{Pr}} \left( u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^{*2}} + \sqrt{\frac{Ra}{Pr}} T^* e_i \quad (4.9)$$

$$\sqrt{Ra Pr} \left( u_j^* \frac{\partial T^*}{\partial x_j^*} \right) = \frac{\partial^2 T^*}{\partial x_j^{*2}} \quad (4.10)$$

W powyższych równaniach  $e_i$  jest różne od zera jedynie na kierunku działania sił ciężkości (kierunek osi  $z$ ).

Układ równań (4.8) ÷ (4.10) w postaci unormowanej można również zapisać w postaci [6,68]:

$$u^* = \frac{u}{U}, \quad T^* = \frac{(T - T_o)}{\Delta T}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad p^* = \frac{pL}{\mu U} \quad (4.11)$$

gdzie  $L$  jest charakterystycznym wymiarem liniowym,  $\Delta T$  różnicą temperatur na początku zjawiska, natomiast  $U$  jest charakterystyczną prędkością płynu definiowaną jako [6, 68]:

$$U = \frac{a}{L} \sqrt{Ra Pr} \quad (4.12)$$

Współczynnikami równań różniczkowych (4.9) i (4.10) są liczby kryterialne.  $Pr$  jest liczbą kryterialną *Prandtla* wyrażoną zależnością

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (4.13)$$

natomiast  $Ra$  jest liczbą kryterialną *Rayleigha*, którą wyraża iloczyn liczby *Prandtla* i liczby *Granshofa*. Liczba *Granshofa* jest charakterystyczna dla konwekcji swobodnej i wyraża się ją zależnością:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_o)L^3}{\nu^2} \quad (4.14)$$

W powyższym równaniu przyjęto, że temperatura powierzchni ścianki  $T_s$  jest inna od temperatury płynu  $T_o$  poza warstwą przyścienną.

Zakres stosowalności modelu laminarnego w analizie zjawisk ciepłno-przepływowych jest zależny od temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, od właściwości izolacyjnych przegród budowlanych biorących udział w wymianie ciepła oraz od charakteru źródeł ciepła i przepływu, jakie

znajdują się w badanym pomieszczeniu. W celu oceny przydatności tego modelu przeprowadzono obliczenia sprawdzające. Dla ich potrzeb przyjęto własności fizyczne powietrza odpowiadające średnim temperaturom powietrza w badanym pomieszczeniu, a następnie wyznaczono wartości liczb kryterialnych określających rodzaj ruchu w kilku charakterystycznych miejscach badanego pomieszczenia. Z przeprowadzonych obliczeń wstępnych wynika, że konwekcyjna wymiana ciepła w pomieszczeniu wywołuje naturalny ruch powietrza kwalifikowany przez różne źródła [83, 93] do przepływu z pogranicza przepływu laminarnego i turbulentnego. Niektóre dane doświadczalne wskazują, że pierwsze wiry w warstwie przyściennej w pobliżu ściany pionowej pojawiają się, gdy liczba *Grashofa* wynosi  $4 \cdot 10^8$ , a według propozycji *Michiejewa* [6, 69, 108, 205] z przepływem laminarnym mamy do czynienia, jeśli liczba *Rayleigha* zawiera się w przedziale  $10^{-3} < Ra < 2 \cdot 10^7$  [83]. Biorąc pod uwagę powyższe wnioski uznano, że model należy rozszerzyć również o opis dla przepływów turbulentnych.

W przypadku przepływu turbulentnego ruch cząstek powietrza jest nieuporządkowany i chaotyczny. Prędkość ruchu cząstek ulega zmianom w czasie, zarówno pod względem wielkości, jak i kierunku. Do opisu matematycznego przepływu turbulentnego, wartości chwilowe prędkości  $u$ , temperatury  $T$  oraz ciśnienia  $p$  zapisuje się jako sumę wartości średniej i pulsacyjnej [6, 205]:

$$\eta = \bar{\eta} + \eta' \quad (4.15)$$

Średnie wartości poszczególnych wielkości definiuje się zależnością:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \eta dt \quad (4.16)$$

Powyższe zapisy skutkują tym, że równanie ciągłości (4.1) zachowuje swoją ważność dla przepływów turbulentnych, lecz wymaga korekty. Przy pominięciu członów zawierających względne fluktuacje i po wprowadzeniu średnich wartości prędkości przyjmuje postać [6, 68, 108, 205]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.17)$$

Po podstawieniu wartości chwilowych poszczególnych zmiennych do równania *Naviera-Stokesa* i przeprowadzeniu operacji uśredniania otrzymano:

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] - g_i \rho \beta (T - T_o) \quad (4.18)$$

Powyższe równanie opisujące ruch ośrodka płynnego nosi nazwę równań *Reynoldsa* i różni się od równań *Naviera-Stokesa* wyrażeniami zawierającymi korelację składowych pulsacyjnych prędkości. Wyrażenia te są miarą dodatkowych naprężeń w płynie występujących wskutek pulsacji prędkości [6, 68].

Do wyznaczenia naprężeń turbulentnych zastosowano hipotezę *Boussinesqua*, na podstawie której wartości naprężenia zależą od składowych tensora prędkości deformacji ruchu uśrednionego oraz od tak zwanej lepkości turbulentnej  $\mu_t$ . Koncepcję tę wyraża zależność [6, 68, 145, 169]:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4.19)$$

Po uwzględnieniu powyższej hipotezy równanie (4.18) przyjmuje postać:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{ef} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial \rho k}{\partial x_i} - g_i \rho \beta (T - T_o) \quad (4.20)$$

w którym współczynnik  $\mu_{ef}$  jest sumą współczynników lepkości laminarnej i turbulentnej

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (4.21)$$

i nazywany jest współczynnikiem lepkości efektywnej.

Modele turbulencji budowane w oparciu o hipotezę *Boussinesqua* wymagają wyznaczenia wartości lepkości turbulentnej  $\mu_t$ . Biorąc pod uwagę swoje wcześniejsze doświadczenia, w tym względzie [129, 130, 134], autor przyjął za najkorzystniejszy dwurównaniowy model turbulencji, którego podstawą jest równanie transportu kinetycznej energii turbulencji  $k$ , definiowanej jako [6, 68]:

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u_i u_i)} \quad (4.22)$$

oraz równanie dyssypacji kinetycznej energii turbulencji  $\varepsilon$ , definiowanej jako:

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} \quad (4.23)$$

Obecnie jest stosowanych kilka modeli wykorzystujących powyższe zależności (4.22 i 4.23), które potocznie noszą nazwę *modeli k-ε*. Z pośród nich do dalszych zastosowań przyjęto model turbulencji *Realizable k-ε* [6, 68, 145, 109, 196] ze względu na składnik związany z obecnością siły wyporu, który został uwzględniony również w równaniach ruchu. W modelu *Realizable k-ε* rozkłady kinetycznej energii turbulencji  $k$  i dyssypacji kinetycznej energii turbulencji  $\varepsilon$  uzyskuje się z równań [6, 145, 242]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (4.25)$$

Po rozwiązaniu równań (4.24) i (4.25) lepkość turbulentna  $\mu_t$  będzie obliczana z zależności [6]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.26)$$

W skład modelu turbulencji, opisanego równaniami (4.24) ÷ (4.26), wchodzi zestaw stałych współczynników liczbowych  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ , które są przyjmowane na podstawie doświadczeń. Do obliczeń przyjęto następujące wartości stałych modelu *Realizable k-ε* [6]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (4.27)$$

Składnik  $G_k$  w równaniu (4.24) ujmuje wpływ pracy naprężeń stycznych ruchu uśrednionego na generację energii kinetycznej turbulencji i jest wyznaczany z zależności [6, 145, 242]:

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.28)$$

natomiast składnik  $G_b$  opisuje wpływ działania sił wyporności płynu na generację energii kinetycznej turbulencji [6, 242] i jest wykorzystywany w następującej postaci:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4.29)$$

O generacji dyssypacji energii kinetycznej w równaniu (4.25) decyduje współczynnik  $C_{3\varepsilon}$ , który przyjmowano z zakresu wartości od 0 do 1 [6, 145].

Podobnie jak w przypadku równań ruchu należy przeprowadzić modyfikację równań transportu energii dla ruchu turbulentnego. Po wprowadzeniu do równania (4.7) chwilowych wartości temperatury i prędkości oraz po uwzględnieniu reguły uśredniania iloczynu [6, 205, 244], w modelu korzysta się z równania o postaci:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \rho c_p \left( \frac{\partial \overline{u_i T'}}{\partial x_i} \right) \quad (4.30)$$

Powyższe równanie różni się od równania (4.7) dodatkowym składnikiem uwzględniającym turbulентne przenoszenie ciepła [6, 68, 244]. Po wprowadzeniu współczynnika turbulენტnego przenoszenia ciepła  $\lambda_t$ :

$$\rho c_p \overline{u_i T'} = -\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.31)$$

wyznaczanego z turbulენტnej liczby *Prandtla*:

$$Pr_t = \frac{c_p \mu_t}{\lambda_t} \quad (4.32)$$

otrzymuje się ostateczną postać równania transportu energii dla przepływów turbulენტnych:

$$\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4.33)$$

Przy rozwiązywaniu powyższego równania przyjęto, że  $Pr_t = 0.85$  [6,242].

Powyższe równania (4.18), (4.20), (4.24), (4.25) i (4.33) ze względu na podobieństwo ich budowy można zapisać w jednolitej, uogólnionej formie zachowawczej, przy wyodrębnieniu członów konwekcyjnych, dyfuzyjnych i źródłowych. Dla uproszczenia zapisu, uproszczono zapis symbolu uśrednienia (górną poziomą kreską nad wielkościami uśrednionymi w czasie). W efekcie uzyskano [169]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (4.34)$$

gdzie wielkość  $\phi$  jest uogólnioną zmienną zależną,  $\Gamma_\phi$  – współczynnikiem transportu dyfuzyjnego, a człon źródłowy  $S_\phi$  ujmuje wszystkie pozostałe – oprócz konwekcyjnych i dyfuzyjnych – składniki równań różniczkowych. Współczynniki  $\Gamma_\phi$  i  $S_\phi$  są zależne od zmiennej  $\phi$  i określone są dla każdego z równań zgodnie z tabelą 4.1.

**Tabela 4.1.** Współczynniki równania (4.34)

Lp.	Równanie	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
1.	ciągłości	$1$	$0$	$0$
2.	ruchu	$u_i$	$\mu_{ef}$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{ef} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial z} - g_i \rho (T - T_o)$
3.	kinetycznej energii turbulencji	$k$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + G_b - \rho \epsilon$

Lp.	Równanie	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
4.	dyssypacji kinetycznej energii turbulencji	$\varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$-\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b$
5.	transportu energii	$T$	$\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$	0

Uwaga: W przyjętym układzie współrzędnych składnik  $g_i \rho (T - T_0)$  jest różny od zera tylko dla kierunku osi  $z$  ( $g_z \neq 0$ )

#### 4.2.2. Wymiana ciepła na drodze promieniowania

W pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych dochodzi do zróżnicowania temperatur na powierzchniach ciał stałych, co prowadzi do wymiany ciepła na drodze promieniowania. Biorą w niej udział wszystkie powierzchnie przegród budowlanych oraz powierzchnie obudowy silnika, przekładni mechanicznej itp. Powierzchnie przegród budowlanych tworzą przestrzenny układ zamknięty. Wymiana ciepła przez promieniowanie wiąże się w takim układzie z obliczeniem współczynników konfiguracji kątowej między powierzchniami. Współczynnik konfiguracji elementarnej powierzchni  $i$  oraz powierzchni  $j$  zgodnie z rysunkiem 4.3 wynosi [197, 244, 248]:

$$\varphi_{i,j} = \frac{1}{\pi A_j} \int \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{r^2} dA_j \quad (4.35)$$

Współczynnik konfiguracji powierzchni  $i$  oraz powierzchni  $j$  jest równy:

$$\Phi_{i,j} = \frac{1}{A_i \pi} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{r^2} dA_j dA_i \quad (4.36)$$

Intensywność promieniowania danego ciała jest pochodną gęstości strumienia energii promienistej według kąta bryłowego  $\Omega$ :

$$J_c = \frac{\partial e_i}{\partial \Omega} \quad (4.37)$$

Gęstość strumienia energii promienistej zgodnie z prawem *Stefana-Boltzmann*a wynosi [6, 205, 244]:

$$e_i = \varepsilon_i \sigma T^4 \quad (4.38)$$

Gęstość strumienia ciepła oddawanego przez ciało na drodze promieniowania jest różnicą pomiędzy gęstością strumienia energii promienistej  $e_i$  pochodzącej

z danej powierzchni a jasnością powierzchni  $f_j$  pomniejszoną o zaabsorbowane ciepło:

$$q_{s,i} = e_i - \varepsilon_i \sum_{j=1}^{i \max} \Phi_{i,j} f_j \quad (4.39)$$

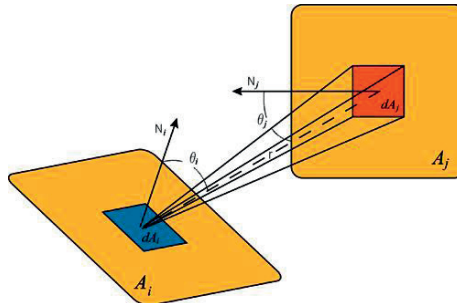
Jasność powierzchni  $F_i$  jest sumą strumienia energii promienistej i energii promieniowania pochodząca od powierzchni  $j$  i odbitej od powierzchni  $i$ :

$$F_i = f_i A_i = E_i + \sum_{j=1}^{i \max} (1 - \varepsilon_i) \Phi_{j,i} f_j A_j \quad (4.40)$$

Gęstość jasności danej powierzchni opisuje układ równań:

$$f_i = e_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^{i \max} \Phi_{j,i} f_j \quad (4.41)$$

Powyższy układ daje się rozwiązać wówczas, kiedy znamy temperatury i współczynniki emisyjności powierzchni wszystkich powierzchni.



Rys. 4.3. Schemat do obliczania współczynników konfiguracji [6]

W pomieszczeniu pracujących maszyn elektrycznych ośrodkiem wypełniającym jest powietrze atmosferyczne, w skład którego wchodzi gaz o symetrycznej budowie cząstek (takie jak  $O_2$  i  $N_2$ ) oraz gaz o budowie cząstek niesymetrycznych (jak  $CO_2$  czy  $H_2O$ ). Odpowiednio, pierwsze z nich są praktycznie przepuszczalne dla energii promieniowania w rozpatrywanym zakresie temperatur, natomiast drugie z nich mogą pochłaniać i wysyłać pewne ilości energii promieniowania. Powietrze w pomieszczeniach przemysłowych najczęściej jest zanieczyszczone pyłem, którego drobne cząstki są unoszone i tworzą z nim tak zwany aerozol. Zwiększony udział cząstek stałych w powietrzu powoduje, że biorą one również udział w wymianie ciepła na drodze promieniowania.

Do opisu intensywności promieniowania w dowolnym punkcie absorbującego, emitującego i rozpraszającego ośrodka stosuje się tak zwane równanie



transportu promieniowania (*Radiative Transfer Equation*, w skrócie *RTE*). W odróżnieniu od innych sposobów przenoszenia ciepła, rządzonech przez równania różniczkowe, równanie przenoszenia promieniowania jest równaniem różniczkowo-całkowym, które w ogólnej formie ma postać [6, 197]:

$$\frac{dJ_c(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)J_c(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} J_c(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (4.42)$$

Składnik  $a + \sigma_s$  wyraża, tak zwaną gęstość optyczną lub współczynnik tłumienia ośrodka (przeźroczystość ośrodka), w którym następuje przekazywanie promieniowania. Indeks refrakcyjny  $n$  ma znaczenie w przypadku ośrodka półprzezroczystego. Wielkość  $\sigma_s$  wyraża współczynnik rozpraszania promieniowania w ośrodku,  $\vec{r}$  to wektor położenia a  $\vec{s}$  jest wektorem kierunkowym promieniowania.

Rzeczywisty udział dwutlenku węgla w powietrzu jest wypadkową udziału tego gazu w zewnętrznym powietrzu atmosferycznym, źródeł tego gazu znajdujących się w pomieszczeniu, ilości wydychanej przez osoby znajdujące się w pomieszczeniu oraz strumienia powietrza wentylacyjnego. Średnio jego udział w objętości pomieszczenia wynosi od 0,04 nawet do 0,5% [169].

Ilość pary wodnej w powietrzu zależy od wilgotności względnej i od temperatury. Wilgotność względna powietrza w pomieszczeniach jest zazwyczaj większa od wilgotności powietrza zewnętrznego. W trakcie typowego użytkowania pomieszczeń zawiera się ona w przedziale od 20 do 75% [166, 169]. Źródłem wilgoci w pomieszczeniach technicznych mogą być urządzenia, proces technologiczny oraz ludzie. W średnim zakresie temperatur między 10 a 20°C i przy ciśnieniu atmosferycznym 1000 hPa średnia zawartość pary wodnej zawiera się między 5,20 a 13,16 gramów na kilogram powietrza suchego, co stanowi średnio udział procentowy rzędu 0,8%.

Z przeprowadzonej charakterystyki wynika, że większościowy udział w powietrzu mają gazy o budowie symetrycznej. Stanowią one około 99% całej objętości. Pozostałą część powietrza stanowią gazy absorbujące i emitujące promieniowanie cieplne. Udział powietrza w wymianie ciepła na drodze promieniowania jest zwiększany, gdy zwiększa się zapylenie. Przyjmuje się, że wszystkie powierzchnie ciał tworzących pomieszczenie odpowiadają właściwościom ciał szarych. Współczynniki absorpcji i emisyjności są wówczas sobie równe i dla typowych powierzchni przegród budowlanych i powierzchni grzewczych zawierają się między 0,90 a 0,98.

Do opisu zjawiska wymiany ciepła przez promieniowanie wykorzystuje się obecnie kilka różnych metod matematycznych [6, 169, 197, 205, 244, 245, 248]. Różnią się one stopniem dokładności opisu zjawiska, wprowadzają często daleko idące uproszczenia i wymagają przyjmowania kolejnych dodatkowych założeń pomocniczych. Biorąc pod uwagę zakres zmienności właściwości powietrza w pomieszczeniach przemysłowych oraz możliwości posiadanego sprzętu komputerowego do analizy zjawisk cieplnych i przepływowych w pomieszczeniu

pracujących maszyn elektrycznych przyjęto model P1 [146, 248]. Przy wykorzystaniu tego modelu założono, że powietrze w pomieszczeniu nie jest w pełni przezroczyste. Wartość współczynnika absorpcji powietrza wyznaczono z zależności [106]:

$$(a + \sigma_s)L = 0.01 \quad (4.43)$$

gdzie:  $L$  jest grubością optyczną. Pominięto rozpraszanie promieniowania w powietrzu ( $\sigma_s = 0$ ) oraz założono jednocześnie, że powierzchnie przegród budowlanych tworzą zamknięty układ o długości boku ponad 3,5 m. Wówczas wartość zastępczego współczynnika absorpcji wyznaczono na 0,003.

Całkowitą wartość energii, jaką niesie ze sobą promieniowanie ciepłe, w dowolnym punkcie obszaru badanego pomieszczenia określa się jako [248]:

$$G = \int_{\Omega=4\pi} J_c d\Omega \quad (4.44)$$

Gęstość strumienia ciepła oddawanego przez dane ciało na drodze promieniowania w modelu P1 wyznacza się z zależności [146,248]:

$$q_r = -\frac{1}{3a} \left( \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial y} \right) \quad (4.45)$$

Pomijając udział wewnętrznych źródeł promieniowania równanie transportu promieniowania przyjmuje postać [248]:

$$-\left( \frac{\partial q_r}{\partial x} + \frac{\partial q_r}{\partial y} + \frac{\partial q_r}{\partial z} \right) = aG - 4a\sigma T^4 \quad (4.46)$$

Powyższe wyrażenie wprowadza się do równania transportu energii (4.42) jako składnik opisujący wewnętrzne źródła ciepła  $q_v$ , w celu wyliczenia całkowitej energii promieniowania pochodzącej z dowolnego źródła ciepła.

Dla potrzeb przeprowadzenia dokładnej analizy zjawisk cieplnych w pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych ważne jest, aby dokonać charakterystyki wnętrza pomieszczenia pod względem oddziaływania powierzchni wewnętrznych o różnych temperaturach. Do tego celu służy parametr zwany średnią temperaturą promieniowania. Wyraża on całkowitą energię niesioną przez promieniowanie w dowolnym punkcie rozpatrywanego obszaru pomieszczenia i wyznacza się z zależności [6,146]:

$$T_r = \left( \frac{G}{4\sigma} \right)^{1/4} \quad (4.47)$$

### 4.2.3. Przepływy wielofazowe

W analizowanym układzie możliwy jest przepływ powietrza zawierającego zanieczyszczenia pyłowe. Model gazu należy wówczas wzbogacić o model

przepływów dwufazowych lub w przypadku różnych zanieczyszczeń również wielofazowych.

Obecnie w komputerowej mechanice płynów stosowane są dwie metody rozwiązywania przepływów wielofazowych, a mianowicie *Eulera-Lagrange'a* i *Eulera-Eulera* [6,176]. W pierwszej z nich faza płynna traktowana jest jako ośrodek ciągły i opisywana za pomocą czasowo-uśrednionych równań *Naviera-Stokea*, a rozwiązania dla fazy rozproszonej bazują na wyznaczeniu torów dużej liczby cząsteczek w obliczonym polu prędkości. Pomiędzy fazą ciągłą i rozproszoną może zachodzić wymiana masy, pędu i energii. Podstawowe założenie obowiązujące w tym modelu dotyczy małego udziału objętościowego fazy rozproszonej. W procesie obliczeniowym trajektorie cząsteczek wyznaczone są dla określonej liczby kroków.

Model *Euler-Euler* jest modelem, w którym przepływ poszczególnych faz jest modelowany niezależnie, z uwzględnieniem interakcji między tymi fazami, z możliwością zdefiniowania jednej z faz jako fazy granularnej lub upakowanego złoża cząstek. Liczba faz, jaka może być określona, jest ograniczona jedynie wymaganiami sprzętowymi komputera. Model *Euler-Euler* wymusza pewne ograniczenia. Do najważniejszych należy zaliczyć to, że: nie może być zastosowany model przepływu *Reynoldsa*; śledzenie cząstek jest możliwe tylko dla tych cząstek, które współdziałają z główną fazą; nie mogą być modelowane procesy przemian fazowych (topienia i krzepnięcia ciała) oraz że nie może być zadawany strumień przepływu określony przez prędkość przepływu masy; opis zagadnienia określany jest poprzez zadanie spadku ciśnienia.

W rozpatrywanym układzie pomieszczenia, koncentracja fazy rozproszonej miejscami może mieć różny poziom. Zakładając, że poziom tej koncentracji nie będzie w żadnym miejscu badanego pomieszczenia przekraczał kilku procent, do obliczeń uwzględniających przepływy dwufazowe przyjęto wykorzystać model *Eulera-Lagrange'a*. Wykorzystanie tego modelu pozwala na śledzenie pojedynczych cząstek, przy koncentracji do kilkunastu procent [6,176]. Według tej metody zasymulowano trajektorie promieni wodzących cząstek ciała stałego poprzez przybliżone całkowanie sił działających na cząstki poruszające się z określoną prędkością. W obliczeniach będą uwzględnione: siła bezwładności, siła wyporu, siła odśrodkowa i siły podnoszenia *Saffmana* i *Magnusa*.

## 4.3. Implementacja modelu

### 4.3.1. Założenia i uproszczenia

W analizowanym pomieszczeniu rozpatruje się przepływ ciepła od jego źródła, za które uznano pracujący silnik wraz z przekładnią mechaniczną, poprzez powietrze wypełniające pomieszczenie oraz zewnętrzne przegrody budowlane do otoczenia. Pracujący silnik wraz z przekładnią w warunkach rzeczywistych emituje ciepło przy zmieniających się warunkach zewnętrznych, ze znaną charakterystyką cieplną. Charakterystyka ta została wyznaczona eksperymentalnie na drodze pomiarów. Procesowi ogrzewania powietrza w pomieszczeniu

towarzyszą oddziaływania warunków zewnętrznych, takich jak temperatura powietrza zewnętrznego i prędkość wiatru. Do pomieszczenia, w wyniku różnicy ciśnień spowodowanej działaniem wiatru oraz różnicą temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, dopływa określony strumień powietrza zewnętrznego wyrażany krotnością wymian powietrza. Napływające powietrze o temperaturze zewnętrznej miesza się z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniu zmieniając jego temperaturę. Zgodnie z zasadą zachowania ciągłości przepływu, powietrze o pewnej temperaturze musi zostać z tego pomieszczenia odprowadzone poprzez kratki wentylacyjne i otwory w przegrodach budowlanych.

Zakłada się, że pomiędzy przegrodami o różnych temperaturach następuje wymiana ciepła przez promieniowanie. Przepływ ciepła ma charakter przestrzenny, co wywołuje niejednorodny rozkład temperatury w pomieszczeniu oraz występowanie konwekcyjnych ruchów powietrza.

Wprowadza się następujące ogólne założenia i uproszczenia:

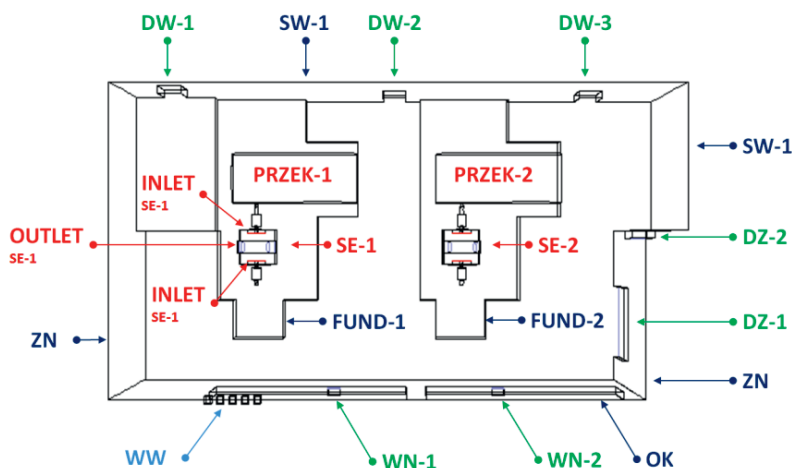
- rozpatrywane jest przestrzenne pomieszczenie budowlane oddzielone od otoczenia zastępczymi przegrodami budowlanymi,
- w pomieszczeniu występują następujące przegrody budowlane zewnętrzne: ściany, podłoga, stropodach, okna i drzwi oraz przegrody wewnętrzne: ściany i drzwi,
- wymiana ciepła z otoczeniem występuje tylko przez przegrody budowlane zewnętrzne,
- w pomieszczeniu są zlokalizowane wewnętrzne źródła ciepła: dwa zespoły napędowe składające się z silników elektrycznych i przekładni mechanicznych w kształtach i wymiarach zbliżonych do rzeczywistych,
- dopływ powietrza z otoczenia następuje poprzez kratki nawiewne oraz szczeliny przy drzwiach zewnętrznych i wewnętrznych,
- odpływ powietrza z pomieszczenia występuje poprzez kratki wentylacyjne wywiewne i częściowo również przez niektóre drzwi,
- w pomieszczeniu nie uwzględnia się obecności ludzi,
- w pomieszczeniu nie uwzględnia się dodatkowych elementów wyposażenia wewnątrz,
- rozpatruje się ustaloną wymianę ciepła dla zadanych warunków otoczenia i pracy instalacji technologicznej,
- zakłada się stałą wilgotność powietrza,
- w wymianie ciepła wewnątrz pomieszczenia nie uwzględnia się zysków ciepła od promieniowania słonecznego.

Rzeczywiste przegrody budowlane dla celów komputerowej implementacji zastępuje się przegrodami zastępczymi. Wielowarstwową strukturę ściany zewnętrznej upraszcza się do przegrody jednorodnej jednowarstwowej, której współczynnik przenikania ciepła jest taki sam jak przegrody rzeczywistej. Okna i drzwi składające się z nieregularnych kształtów i wykonane z różnych materia-

łów (ramy, ościeżnice, szyby również) zastępuje się jednorodną przegrodą płaską. Właściwości przegród zastępczych przedstawiono w tabeli 4.2.

### 4.3.2. Obszar obliczeniowy

Dla potrzeb implementacji opracowano model przestrzenny odpowiadający wymiarom i geometrii badanego pomieszczenia. Pomiar kształtu i charakterystycznych wymiarów przeprowadzono wykorzystując laserowy skaner przestrzeni oraz dalmierz laserowy. Model pomieszczenia wykonano w środowisku *AutoCAD* i *Inventor*. W programach tych zamodelowano wszystkie obiekty graficzne. W następnej kolejności wygenerowano model odpowiadający przestrzeni wewnętrznej pomieszczenia wypełnionej powietrzem. Dokonano tego przy użyciu funkcji *Boole'a* – dostępnych w programie *AutoCAD*. Tak przygotowaną geometrię wyeksportowano do programu *Ansys*. W jednym z modułów programu zwanym *Ansys-Meshing* poszczególnym obiektom nadano nazwy i indywidualne cechy w modelu. Schemat obszaru obliczeniowego wraz z zestawieniem wyodrębnionych obiektów i ich cech przedstawiono na rysunku 4.4 i w tabeli 4.2.



Rys. 4.4. Schemat obszaru obliczeniowego z oznaczeniem elementów biorących udział w wymianie ciepła i masy badanego obiektu

### 4.3.3. Warunki brzegowe

W obliczeniach przyjęto następujące warunki brzegowe:

- na powierzchniach przegród nie biorących udziału w wymianie ciepła zadaje się warunek *Neumanna*, dla którego strumień wymienianego z otoczeniem strumień ciepła równy jest zero ( $q=0$ ),
- na przegrodach biorących udział w wymianie ciepła (ściany zewnętrzne, okna, drzwi, stropodach, obudowa silnika i przekładni mechanicznej) zadaje

się warunek *Dirichleta*, w którym zakłada się, że znana jest funkcja opisująca wartości danego parametru na granicy obszaru obliczeniowego. I tak:

- a) dla przegród budowlanych zewnętrznych przyjęto, że:
- znana jest temperatura na zewnątrz pomieszczenia  $T_{zew}$ ,
  - znany jest współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha_e$  na powierzchni zewnętrznej przegród budowlanych, przy średniej prędkości wiatru,
  - znany jest współczynnik przewodzenia ciepła przez przegrodę jednorodną,
  - znany jest współczynnik emisyjności  $\varepsilon$  materiału przegrody;
- b) dla ścian obudowy silnika:
- znana jest temperatura na powierzchni zewnętrznej silnika  $T_{se}$  (wykorzystano zdjęcia termowizyjne),
  - znany jest współczynnik emisyjności  $\varepsilon$  materiału obudowy;
- c) dla ścian obudowy przekładni:
- znana jest temperatura na powierzchni zewnętrznej przekładni  $T_{me}$  (wykorzystano zdjęcia termowizyjne),
  - znany jest współczynnik emisyjności  $\varepsilon$  materiału obudowy;
- na wszystkich ściankach ciał stałych składowe wektorów prędkości są równe zero  $u_x = u_y = u_z = 0$ ,
  - na powierzchniach typu *inlet* i *outlet*, tzn. na powierzchniach, przez które przepływa powietrze, przyjmuje się znaną stałą wartość jego prędkości, odpowiadającą średniej wartości prędkości uzyskanej na drodze pomiarów wykonanych dla obiektu rzeczywistego w danych warunkach zewnętrznych.

**Tabela 4.2.** Charakterystyka elementów modelu

Lp.	Oznaczenie w modelu	Rodzaj przegrody	Nazwa szczegółowa	A m <sup>2</sup>	U W/m <sup>2</sup> K
1.	wall_SD	wall	stropodach	256,50	3,18
2.	wall_ZN	wall	ściana zewnętrzna	294,97	2,54
3.	wall_OK	wall	okna	29,75	5,79
4.	outlet_WW_1	outlet-vent	wentylacja wywiewna	0,75	
5.	inlet_WN_1	velocity-inlet	wentylacja nawiewna 1	0,25	
6.	inlet_WN_2	velocity-inlet	wentylacja nawiewna 2	0,25	
7.	inlet_DZ_1	velocity-inlet	drzwi zewnętrzne 1	9,60	5,88
8.	inlet_DZ_2	velocity-inlet	drzwi zewnętrzne 2	2,20	5,88
9.	wall_SW_1	wall	ściana wewnętrzna 1	162,36	1,67
10.	wall-SW_2	wall	nawiewniki		
11.	wall_P	wall	posadzka	256,50	0,18
12.	inlet_DW_1	velocity-inlet	drzwi wewnętrzne 1	2,20	3,84
13.	inlet_DW_2	velocity-inlet	drzwi wewnętrzne 2	2,20	3,84
14.	inlet_DW_3	velocity-inlet	drzwi wewnętrzne 3	2,20	3,84
15.	wall_FUND_1	wall	fundament SE-1	110,18	
16.	wall_FUND_2	wall	fundament SE-2	84,98	
17.	wall_PRZEK_1	wall	przekładnia SE-1	69,70	
18.	wall_PRZEK_2	wall	przekładnia SE-2	69,70	
19.	inlet_SE_1	outlet-vent	wlot do SE-1	0,48	
20.	outlet_SE_1	velocity-inlet	wylot z SE-1	0,32	

Lp.	Oznaczenie w modelu	Rodzaj przegrody	Nazwa szczegółowa	A m <sup>2</sup>	U W/m <sup>2</sup> K
21.	wall_SE_1	wall	obudowa SE-1	10,00	
22.	inlet_SE_2	outlet-vent	wylot z SE-2	0,48	
23.	outlet_SE_2	velocity-inlet	wlot do SE-2	0,32	
24.	wall_SE_2	wall	obudowa SE-2	10,00	

#### 4.3.3.1. Warunki brzegowe dla równań ruchu

Składowe styczne wektora prędkości w punktach bezpośrednio przyległych do ścianki obliczono w oparciu o tak zwane logarytmiczne prawo ścianki, spójne ze sformułowanym modelem turbulencji [6, 68, 245]:

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad (4.48)$$

gdzie:

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{(1/4)} k_P^{(1/2)}}{\tau_w / \rho} \quad (4.49)$$

oraz

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{(1/4)} k_P^{(1/2)} y_P}{\mu} \quad (4.50)$$

gdzie  $y_p$  oznacza odległość punktu siatki od ścianki.

Zależność logarytmiczna (4.47) jest słuszna, gdy wartość parametru  $y^*$  zawiera się w zakresie od 30 do 60. W prowadzonych obliczeniach przyjęto szerszy zakres stosowalności zależności logarytmicznej, a mianowicie już od 11.225. Gdy wartość parametru  $y^*$  jest mniejsza od 11.225, wtedy prędkość płynu w punkcie przy ściance oblicza się z zależności [6]:

$$U^* = y^* \quad (4.51)$$

zakładając liniowy rozkład prędkości w podwarstwie laminarnej.

#### 4.3.3.2. Warunki brzegowe dla modelu turbulencji

W punktach przyległych powierzchni wszystkich przegród przyjęto następujący warunek brzegowy:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (4.52)$$

Składnik  $G_k$  w równaniu (4.24) oraz wartość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji w punktach przyległych do ścianki oblicza się z zależności [6, 68, 244]:

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_\mu^{(1/4)} k_P^{(1/2)} y_P} \quad (4.53)$$

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{(3/4)} k_P^{(3/2)}}{\kappa y_P} \quad (4.54)$$

gdzie  $\tau_w$  oznacza naprężenia styczne na ścianie.

#### 4.3.3.3. Warunki brzegowe dla równania transportu energii

Dla równania transportu energii przyjęto warunki brzegowe w punktach przyległych do ścianki, spójnie ze stosowanym modelem turbulencji [6,68]:

$$T^* \equiv \frac{(T_w - T_P) \rho c_p C_\mu^{(1/4)} k_P^{(1/2)}}{\dot{q}} \quad (4.55)$$

$$= \begin{cases} \Pr y^* & (y^* < y_T^*) \\ \Pr_t \left[ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) + P \right] & (y^* > y_T^*) \end{cases}$$

Wartość P oblicza się z zależności *Jayatileke* [2, 48]:

$$P = 9.24 \left[ \left( \frac{\sigma}{\sigma_t} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[ 1 + 0.28 e^{-0.007(\sigma/\sigma_t)} \right] \quad (4.56)$$

Wielkość  $y_T^*$  oznacza grubość bezwymiarowej temperaturowej warstwy przyściennej [145,244].

#### 4.3.3.4. Warunki brzegowe dla przegród zewnętrznych

Podczas ustalonej wymiany ciepła natężenie strumienia ciepłego jest proporcjonalne do gradientu temperatury. Zagadnienie to wiąże się z wyznaczeniem rozkładu temperatury we wszystkich punktach rozpatrywanych przegród. Po przyjęciu jednokierunkowego przepływu ciepła dla przegród płaskich gęstość strumienia ma postać:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (4.57)$$

gdzie:  $n$  oznacza kierunek normalny do ścianki. W przypadku wymiany ciepła do otoczenia na zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych współczynnik przyjmowania ciepła  $\alpha_e$  określa się z zależności [167]:



$$\alpha_e = 4 + 4v_w \quad (4.58)$$

gdzie  $v_w$  oznacza prędkość wiatru. Wartość oporu przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegród zewnętrznych wyznaczono zgodnie z [165, 167], przy założeniu prędkości wiatru 4 m/s.

Gęstość strumienia strat ciepła przez zewnętrzne przegrody budowlane lokalnie oblicza się z zależności:

$$q = k_{lok} (T_{wlok} - T_{zew}), \quad (4.59)$$

gdzie współczynnik przenikania ciepła jest określany wzorem:

$$k_{lok} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ilok}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (4.60)$$

Znając lokalne wartości współczynników przejmowania ciepła po wewnętrznej stronie zewnętrznych przegród budowlanych, określa się również średni współczynnik przejmowania dla danej przegrody zewnętrznej z zależności:

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \alpha_{lok} dA \quad (4.61)$$

#### 4.3.3.5. Warunki brzegowe na powierzchniach grzewczych

Źródłem ciepła w pomieszczeniu w warunkach rzeczywistych jest pracujący silnik i przekładnia mechaniczna, których temperatury ścianek zmieniają się w zależności obciążenia oraz od temperatury zewnętrznej.

Do obliczeń numerycznych przyjmowane są wartości temperatur oddzielnie wyznaczone dla obudowy silnika i oddzielnie dla obudowy przekładni. Temperatury brzegowe wyznaczono na podstawie pomiarów kamerą termowizyjną, które wykonywano w ustalonych warunkach pracy silnika i przy różnych temperaturach powietrza zewnętrznego. Pomiarów powtarzano wielokrotnie celem wyznaczenia charakterystyki wartości średnich (rys. 4.5).

#### 4.3.3.6. Warunki brzegowe dla promieniowania

W celu określenia warunków brzegowych dla rozwiązania równania (4.46) wyznacza się następujący iloczyn skalarny:

$$q_r \cdot \vec{n} = -\frac{1}{3a} \left( \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} \right) \cdot \vec{n} \quad (4.62)$$

$$q_{r,w} = -\frac{1}{3a} \frac{\partial G}{\partial n}$$

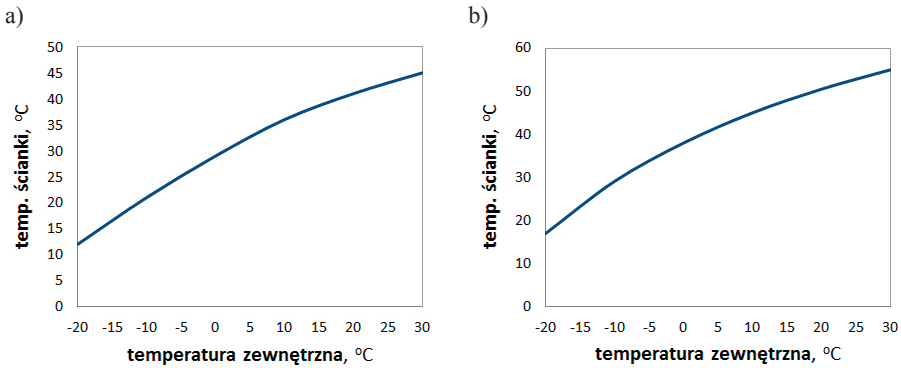
Ogólny warunek brzegowy dla promieniowania na ściankach wyraża zależność [146, 248]:

$$J_w(\vec{r}, \vec{s}) = f_w(\vec{r}, \vec{s}) \quad (4.63)$$

$$f_w(\vec{r}, \vec{s}) = \varepsilon_w \frac{\sigma T_w^4}{\pi} + \rho_w J_c(\vec{r}, -\vec{s}) \quad (4.64)$$

Po uwzględnieniu warunku brzegowego *Marshaka* [6, 146, 248], który eliminuje zależności kątowe, oraz opisując współczynnik odbicia  $\rho_w$  jak dla ciała szarego, dla którego zachodzi zależność  $\rho_w = 1 - \varepsilon_w$ , przekazywany na drodze promieniowania strumień ciepła wyznacza się z następującego równania:

$$q_{r,w} = -\frac{\varepsilon_w}{2(2 - \varepsilon_w)} (4\sigma T_w^4 - G_w) \quad (4.65)$$



Rys. 4.5. Wpływ temperatury zewnętrznej na temperaturę powierzchni: a) obudowy silnika SE-1, b) obudowy przekładni silnika SE-1

#### 4.3.4. Metodyka obliczeń

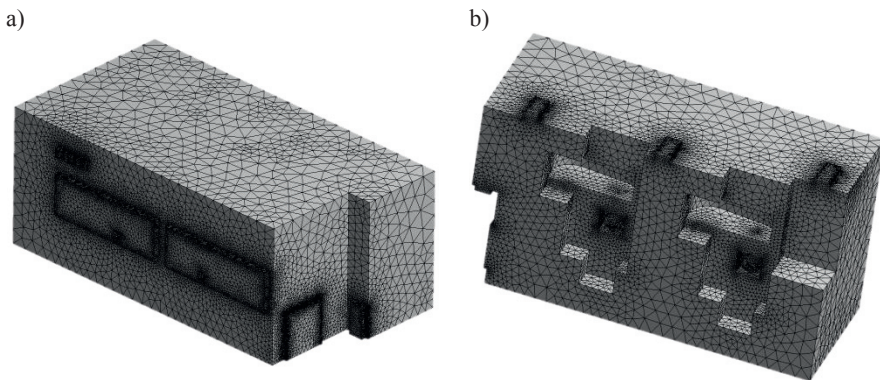
Przyjęty dla potrzeb analizy układ równań różniczkowych cząstkowych jest nieliniowy. Poszczególne równania są ze sobą sprzężone i ze względu na niewiadome tworzą układ zamknięty. Taki układ równań rozwiązuje się metodami przybliżonymi. W rozwiązywaniu zagadnień cieplnych i przepływowych najszersze zastosowanie znalazły: metoda bilansów elementarnych, metoda elementów skończonych, metoda objętości skończonych oraz metoda elementów brzegowych [6, 116, 144, 218].

Do rozwiązania zagadnień obejmujących cel i zakres niniejszej pracy wykorzystano metodę objętości skończonych [6,144].

#### 4.3.4.1. Dyskretyzacja równań i zarys metodyki numerycznej

W celu numerycznego rozwiązania układu równań obszar obliczeniowy poddaje się dyskretyzacji. Istota dyskretyzacji w przyjętej metodzie numerycznej polega na podzieleniu rozpatrywanego obszaru obliczeniowego na skończoną ilość objętości [6].

Przy tworzeniu siatki zastosowano siatkę typu czworościennego (*triangular*). W celu zwiększenia dokładności obliczeń numerycznych w obszarach intensywnej wymiany ciepła i masy, tj. w obszarach przyległych do obudowy silnika, przekładni, przegród budowlanych, okien, itd. wprowadzono odpowiednie zagęszczenie siatki. Następnie sprawdzono poprawność wygenerowanej struktury siatki pod względem zachowania jednorodnego kształtu i proporcji wymiarowych [6, 68, 144]. Sposób dyskretyzacji obszaru obliczeniowego przedstawiono na rysunku 4.6.



**Rys. 4.6.** Widok dyskretyzacji obszaru obliczeniowego: a) widok izometryczny elewacji frontowych pomieszczenia, b) widok izometryczny obiektów wewnętrznych

Dyskretną aproksymację zmiennych występujących w równaniach modelu przeprowadzono zgodnie z przyjętą metodą numeryczną [6,144]. W stosowanej metodzie numerycznej wszystkie informacje o wartości funkcji  $\phi$  są przechowywane w środku każdej komórki elementarnej. Znając wartości w środku określa się kolejno wartości w środku każdej ze ścian komórki elementarnej. Dla zapewnienia stabilności schematu różnicowego, łączny udział członów konwekcyjnych i dyfuzyjnych obliczany jest zgodnie z zasadą schematu hybrydowego, łączącego własności schematu typu różnica centralna oraz schematu typu różnica jednostronna orientowana pod prąd.

#### 4.3.4.2. Charakterystyka programu obliczeniowego

Zaprezentowany powyżej model matematyczny zaimplementowano w środowisku *ANSYS*. Jest to oprogramowanie wspomagające obliczenia inżynierskie (*Computer Aided Engineering*) w zakresie komputerowej mechaniki płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*) oraz obliczeń strukturalnych prowadzonych między innymi metodami: elementów skończonych MES (ang. *FEM*, *finite-element method*) czy objętości skończonych MOS (ang. *FVM*, *Finite Volume Method*) [2, 4, 7].

Program *ANSYS* ma budowę modułową. Główną część programu stanowi platforma *Workbench* (WB), w której konfiguruje się strukturę projektu obliczeniowego. W połączeniu z integracją ze środowiskiem WB użytkownik może przechodzić kolejne etapy prowadzenia symulacji w poszczególnych modułach [2, 3, 5]:

- *DesignModeler* budowa i przygotowanie badanej geometrii modelu. Moduł umożliwia współpracę z programami z obszaru komputerowego wspomagania projektowania CAD (ang. *Computer Aided Design*) oraz komputerowego wspomagania prac inżynierskich CAE (ang. *Computer Aided Engineering*),
- *ANSYS Meshing* dyskretyzacja numeryczna modelu (budowa siatki) oraz wstępne przypisywanie typów materiałów oraz typów warunków brzegowych,
- *ANSYS-Preprocessor* definicja modelu – wybór i konfiguracja odpowiednich równań wraz ze zdefiniowaniem właściwości używanych materiałów i warunków brzegowych,
- *ANSYS-Solver* moduł rozwiązujący,
- *ANSYS-Postprocessor* końcowa obróbka i prezentacja wyników obliczeń.

W pełnym pakiecie *ANSYS* dostępnych jest kilka narzędzi do szczegółowego określenia własności materiałów, określenia warunków brzegowych oraz do realizacji obliczeń (*Preprocessor*). W zależności od zakresu prowadzonych obliczeń i analiz można skorzystać między innymi z modułu [2, 3, 4]:

- *Fluent* – komputerowa mechanika płynów z elementami wymiany ciepła. Moduł oferuje zestawy modeli fizycznych i materiałowych z zakresu przepływów laminarnych i turbulentnych oraz przewodzenia, konwekcji i promieniowania cieplnego. Program wykorzystuje metodę objętości skończonych do rozwiązywania statycznych i zmiennych w czasie stanów,
- *CFX* – komputerowa mechanika płynów z elementami wymiany ciepła i reakcji chemicznych,
- *Maxwell* – narzędzie do modelowania zagadnień związanych z polem elektromagnetycznym umożliwiającym projektowanie i analizowanie dwu- i trójwymiarowych układów elektromagnetycznych i elektrycznych takich jak: silniki, siłowniki, transformatory, czujniki, cewki i wiele innych. Pro-

gram *Maxwell* wykorzystuje metodę elementów skończonych do rozwiązywania statycznych i zmiennych w czasie pól elektromagnetycznych i elektrycznych,

- *Mechanical* – narzędzie do analizy strukturalnej liniowej i nieliniowej oraz analizy dynamicznej z zakresu mechaniki i wytrzymałości materiałów.

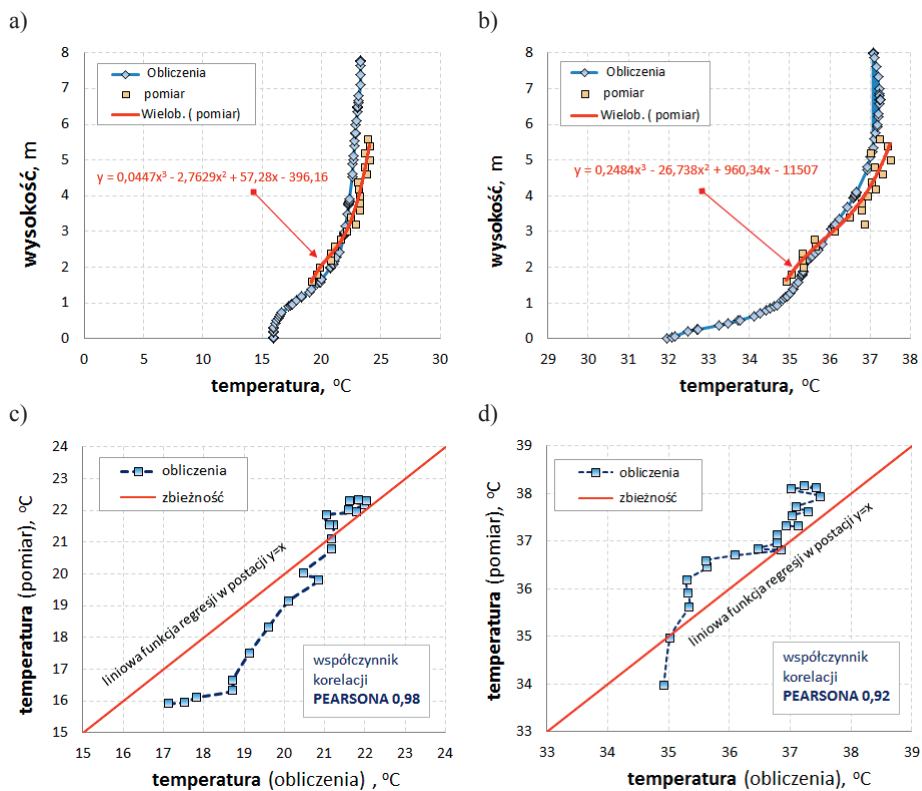
Do realizacji badań symulacyjnych zjawisk cieplnych i przepływowych w pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych w zakresie: konfiguracji i zdefiniowania modeli obliczeniowych, zdefiniowania stosowanych materiałów, doboru warunków brzegowych, wykonania obliczeń iteracyjnych oraz analizy uzyskanych wyników wybrano moduł pod nazwą *Fluent*. Całość prac obliczeniowych zrealizowano w programie *ANSYS-Fluent* w wersji 13, wykorzystując do tego celu komputer z procesorem *Intel Core2 Quad Q9400 2.66GHz* i pamięcią RAM 16GB pracującym w systemie 64-bitowym.

Moduł *Fluent* w swoim algorytmie obliczeniowym wykorzystuje metodę objętości skończonych MOS. Metoda ta została opracowana do rozwiązywania zagadnień, w których zasada zachowania ciągłości zmiennej pola w rozpatrywanym obszarze nie musi być spełniona. W przeciwieństwie do MES metoda objętości skończonych opiera się na analizie zachowania zmiennej pola wewnątrz komórek siatki, a nie w węzłach siatki. W metodzie MOS korzysta się z szacowania wartości całki wewnątrz komórek siatki lub jej wartości średniej – wartość całki podzielona przez objętość komórki. Wyznaczone wartości zmiennej pola są następnie aktualizowane w kolejnych krokach czasowych, korzystając z funkcji strumienia, który przepływa przez komórki. Podstawowym problemem metody MOS jest poprawna definicja funkcji strumienia tak, aby stanowiła ona poprawne przybliżenie strumienia rzeczywistego, korzystając jedynie z wyznaczonych wartości średnich w komórkach siatki [119, 120,117].

#### **4.4. Testowanie poprawności działania modelu i weryfikacja eksperymentalna**

Najlepszą oceną jakości modelu matematycznego jest sprawdzenie uzyskanych wyników obliczeń z wynikami eksperymentu pomiarowego [6,169].

Dla potrzeb weryfikacji eksperymentalnej przeprowadzono szereg pomiarów pionowego rozkładu temperatury w wybranym miejscu hali ( $x=6m$ ,  $y=4m$ ,  $z=<1.4\div 5.6m>$ ). Pomiary prowadzono przy zmiennych temperaturach powietrza zewnętrznego. Następnie wyznaczono uśrednione rozkłady przy danej temperaturze zewnętrznej. W kolejnym kroku wykonano obliczenia numeryczne przyjmując warunki brzegowe zbliżone do panujących podczas pomiarów. Porównanie obliczeń numerycznych z wynikami eksperymentu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.7. Jakość obliczeń oceniono ilościowo, porównując oba rozkłady (rys. 6.7a i 6.7b) oraz jakościowo, wyznaczając współczynniki korelacji między wynikami pomiaru i obliczeń (rys. 6.7c i 6.7d). Na podstawie oceny obu parametrów uznano zbieżność za zadawalającą.



Rys. 4.7. Weryfikacja eksperymentalna wyników symulacji na przykładzie pionowego rozkładu temperatury powietrza przy: a)  $T_{zew}=0^{\circ}C$ , b)  $T_{zew}=20^{\circ}C$  oraz korelacje między wynikami dla: c)  $T_{zew}=0^{\circ}C$ , d)  $T_{zew}=20^{\circ}C$

## 5. WYNIKI POMIARÓW I BADAŃ SYMULACYJNYCH

### 5.1. Informacja ogólna

Badania eksperymentalne prowadzono jednocześnie w trzech obiektach: SE-1, SE-2 i SE-3. Pomiary realizowano w warunkach normalnej eksploatacji, monitorując emisję *wnz*, badając wybrane wielkości mikroklimatu oraz wykonując pomiary wstępne, bilansowe i pomocnicze przy wykorzystaniu instalacji pomiarowych opisanych w rozdziale 3.

Pomiar emisji *wnz* obejmował pomiar wielkości niezbędnych do wyznaczenia charakterystycznych wskaźników aktywności wyładowań niezupełnych, tj. intensywności (*PPS*), amplitudy ( $Q_{max}$ ) oraz mocy wyładowań (*PDI*). Na podstawie wyznaczonych wartości wskaźników emisji *wnz* dokonano oceny wpływu wybranych wielkości mikroklimatu na emisję *wnz* (rozdział 6).

Wielkościami mikroklimatu, które mierzono i wyznaczano podczas badań własnych były: temperatura powietrza ( $t_a$ ), temperatura wilgotna wentylowana ( $t_h$ ), temperatura czarnej kuli ( $t_g$ ), temperatura wilgotna naturalna ( $t_w$ ), średnia temperatura promieniowania ( $t_r$ ), temperatura punktu rosy ( $t_d$ ), temperatura odczuwalna ( $t_o$ ), prędkość ruchu powietrza ( $v$ ), wilgotność względna (*RH*), zawartość wilgoci w powietrzu wilgotnym (*X*), prężność pary wodnej ( $p_a$ ) oraz stężenie pyłu przemysłowego w powietrzu ( $s_p$ ).

Ze względu na brak możliwości pomiaru wszystkich wymienionych wyżej parametrów mikroklimatu we wszystkich trzech obiektach badań jednocześnie, głównie ze względu na możliwości aparaturowe, ilość wielkości mikroklimatu uwzględnianych w dalszych analizach ograniczono do: temperatury powietrza, wilgotności względnej i zawartości wilgoci w powietrzu. Jedynie przy omawianiu środowiska pracy silnika SE-1 zamieszczono przykładowe przebiegi pomiaru wielkości mikroklimatu w szerszym zakresie.

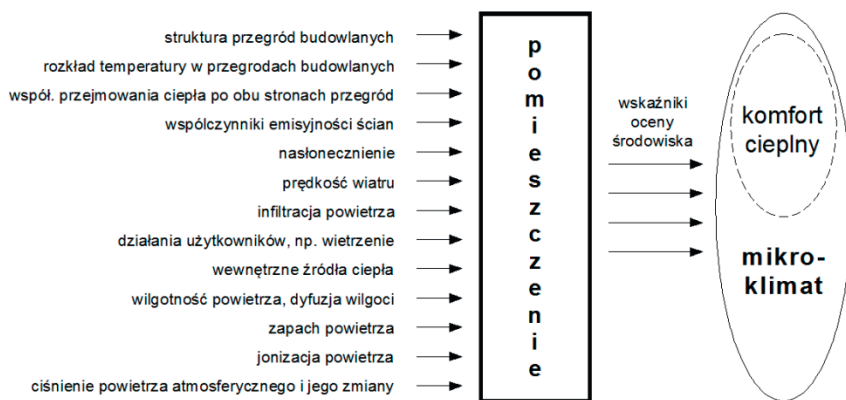
Pomiar wielkości procesowych niezbędnych dla dokonania obliczeń bilansów cieplnych obejmuje pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza w kanałach doprowadzających i odprowadzających powietrze w układzie chłodzenia silnika SE-1. Ponadto okresowo mierzono rozkład pola prędkości w kanałach celem wyznaczenia strumienia przepływu powietrza.

Badania symulacyjne obejmują opis zjawisk cieplno-przepływowych, jakie kształtowane są w hali badanego silnika SE-1. Badania symulacyjne ograniczono jedynie dla obszaru, geometrii i warunków pracy obiektu SE-1. Przyjęte ograniczenie wynika przede wszystkim z faktu, iż przebieg zjawisk cieplnych i przepływowych kształtujących się w pomieszczeniu pracy silnika SE-1 ma bezpośredni wpływ na jakość pracy układu chłodzenia tego silnika ze względu na otwartą budowę.



## 5.2. Metodyka oceny parametrów mikroklimatu

Każde pomieszczenie stanowi skomplikowany obiekt, w którym następuje wymiana ciepła i masy [110, 169, 173, 231]. Na tę wymianę wpływa między innymi: obecność wewnętrznych źródeł ciepła, wilgoci i zanieczyszczeń; ich ruch; temperatura powierzchni i przegród; struktura i właściwości fizyczno-chemiczne przegród budowlanych; współczynniki przyjmowania ciepła i emisyjności ścian; temperatura powietrza wewnątrz i na zewnątrz pomieszczenia; nasłonecznienie i prędkość wiatru; różnica ciśnień i wilgotności powietrza wywołująca na przykład zjawisko infiltracji (rys. 5.1). Nie bez znaczenia są również działania użytkowników polegające na okresowym przewietrzaniu pomieszczeń [169, 173].



Rys. 5.1. Czynniki wpływające na warunki mikroklimatu i komfortu cieplnego

Wynikiem wymiany ciepła i masy w pomieszczeniu jest stan warunków komfortu cieplnego lub w szerszym ujęciu mikroklimat. Na komfort cieplny ma wpływ zespół parametrów fizycznych związanych z pomieszczeniem, takich jak: temperatura powietrza, temperatura promieniowania, prędkość względna powietrza, ciśnienie cząstkowe pary wodnej i wilgotność względna powietrza. W przypadku maszyn elektrycznych ocenie podlega ponadto zapewnienie temperatury i wilgotności w dopuszczalnym zakresie określonym przez producenta. Badany silnik SE-1 powinien pracować w środowisku, w którym temperatura otoczenia nie powinna przekraczać 40°C, a wilgotność względna powinna zawierać się w przedziale 20÷70% [49, 50]. Ponadto silnik nie powinien pracować w środowisku zapyłonym.

Głównym obszarem kształtowania się mikroklimatu jest powietrze wilgotne wypełniające badane pomieszczenie. Powietrze wilgotne jest jednorodną mieszaniną powietrza suchego oraz zawartej w nim pary wodnej, a także – w pewnych określonych warunkach – wilgoci w postaci mgły wodnej (szadź,



szron) [143]. Parametry termodynamiczne powietrza wilgotnego odnoszą się do określonej ilości powietrza suchego ze względu na to, że stan skupienia powietrza suchego nie ulega zmianie podczas przemian mikroklimatycznych [143]. W powietrzu wilgotnym w sprzyjających warunkach występują zmiany stanu skupienia pary wodnej w nim zawartej, np. w wyniku obniżenia temperatury para wodna wytrąca się w postaci mgły, rosy lub szronu.

Do opisu parametrów termodynamicznych powietrza wilgotnego wykorzystuje się dwa wskaźniki opisujące udział pary wodnej w powietrzu wilgotnym.

Pierwszy z nich określa masową zawartość wilgoci w powietrzu wilgotnym jako stosunek wilgoci odniesiony do masy suchego powietrza. Wskaźnik ten najczęściej nosi nazwę udziału wilgoci lub inaczej zawartości wilgoci, względnie również wilgotności bezwzględnej. W literaturze najczęściej oznacza się przez  $x$  [69,143]:

$$x = \frac{m_w}{m_g} \left[ \frac{\text{gramów wilgoci w dowolnej postaci}}{\text{1kg powietrza suchego}} \right] \quad (5.1)$$

Drugi wskaźnik oceny zawartości wilgoci w powietrzu wilgotnym to wilgotność względna. Parametr ten przyjęto ze względu na jego szerokie rozpowszechnienie wśród kadry technicznej odpowiedzialnej za dozór i eksploatację maszyn elektrycznych. Do jej wyznaczenia należy powietrze suche traktować jako gaz jednorodny (jednoskładnikowy), zakładając jednocześnie, że jego skład w atmosferze ziemskiej nie ulega zmianie (azot, tlen, CO<sub>2</sub>, argon, hel, wodór). Ponadto należy założyć, że stan gazów wchodzących w skład powietrza suchego jest odległy od ich stanów krytycznych, co pozwala na przyjęcie założenia, że własności tego gazu są bardzo zbliżone do własności gazu doskonałego [143]. Ponadto do opisu mieszaniny powietrza z parą wodną należy przyjąć poprawność obowiązywania prawa *Daltona* [69, 143, 244], które zakłada, że każdy składnik mieszaniny gazów zachowuje się tak, jakby samodzielnie zajmował objętość, w której się znajduje. Wówczas ciśnienie powietrza wilgotnego wyznacza się jako sumę ciśnień cząstkowych powietrza suchego i pary wodnej. W powietrzu wilgotnym może występować tylko ograniczona ilość wilgoci w postaci pary wodnej. Przy danym ciśnieniu powietrza wilgotnego i jego temperaturze odpowiadająca mu zawartość wilgoci w postaci pary wodnej wynosi  $x_n$ . W stanie nasycenia przy zawartości pary  $x_n$  ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu wilgotnym wynosi  $p_{w,n}$ . Stosunek ciśnień cząstkowych nosi nazwę *wilgotności względnej*, której wartości mieszczą się w granicach od 0 do 1. Wilgotność względną powietrza (RH) przy tym samym ciśnieniu całkowitym i tej samej temperaturze można również wyrazić jako stosunek gęstości pary wodnej zawartej w powietrzu wilgotnym do maksymalnej gęstości pary wodnej w stanie nasycenia. W zastosowaniach technicznych wilgotność względną powietrza można wyrazić następującym zapisem [69]:

$$\varphi = \frac{p_w}{p_{w,n}} \cong \left( \frac{\rho_w}{\rho_{w,n}} \right)_{p,T} \leq 1 \quad (\varphi \in \langle 0 \div 100\% \rangle) \quad (5.2)$$

Przy bilansach cieplnych powietrza wilgotnego przyjęto posługiwać się entalpią właściwą oraz temperaturą przy znanym ciśnieniu atmosferycznym powietrza. Wówczas wyznaczano prężność pary nasyconej w funkcji temperatury według zależności [EN ISO 13788:2001]:

$$p_{sat} = 610 \cdot e^{\frac{17.269T}{273.5+T}} \quad \text{dla } T \geq 0^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

$$p_{sat} = 610 \cdot e^{\frac{21.875T}{265.5+T}} \quad \text{dla } T < 0^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

Na tej podstawie określano zawartość wilgoci w powietrzu z uwzględnieniem mierzonej wilgotności względnej [69,143]:

$$w = 0.622 \frac{\varphi \cdot p_{sat}}{p - \varphi \cdot p_{sat}} \quad (5.5)$$

gdzie:

- $\varphi$  wilgotność względna powietrza,
- $p$  ciśnienie powietrza wilgotnego, w przybliżeniu atmosferyczne,
- $p_{sat}$  ciśnienie nasycenia pary wodnej.

W badaniach bilansowych rozważano również możliwość jakościowego i ilościowego wyznaczania strumienia wilgoci doprowadzanego lub odprowadzanego w strumieniu powietrza wentylacyjnego w systemie chłodzenia i przewietrzenia silnika oraz hali przemysłowej. Przyrost lub ubytek wilgoci wyznaczano z następującej zależności:

$$\Delta w = 0.622 \cdot \left[ \frac{\varphi_1 p_{sat1}}{p - \varphi_1 p_{sat1}} - \frac{\varphi_2 p_{sat2}}{p - \varphi_2 p_{sat2}} \right] \quad (5.6)$$

gdzie:

- 1, 2 indeksy parametrów powietrza mierzone odpowiednio na osłonie bilansowej badanego obiektu

Do określania i analizowania parametrów termodynamicznych powietrza wilgotnego w różnych warunkach eksploatacji badanych obiektów wykorzystano wykresy powietrza wilgotnego. W Europie przyjął się powszechnie wykres w układzie dwóch współrzędnych: entalpia – zawartość wilgoci  $h-x$ , zwany wykresem *Moliera*. Podstawą sporządzania tego wykresu jest wzór do obliczania entalpii właściwej powietrza wilgotnego, z którego należy korzystać przy założeniu, że ciśnienie powietrza wilgotnego jest równe ciśnieniu atmosferycznemu i że się nie zmienia w czasie. Wówczas dwa termiczne parametry stanu wystarczają do termodynamicznego (kalorycznego) określania stanu powietrza

na płaszczyźnie [143]. Dla  $x \leq x_n$  entalpię właściwą powietrza wilgotnego  $h_{1+x}$  oblicza się dla przyjętej temperatury  $t$  przez podstawienie do wzoru [143]:

$$h = h_{1+x} = c_{p,g} \cdot t + (c_{p,w} \cdot t + r_o) \cdot x \quad (5.7)$$

Wówczas przy ustalonym ciśnieniu całkowitym powietrza otrzymuje się dwa zbiory wartości dla zbioru temperatur  $t=0$  i  $t=t_l$ . Dzięki wykresowi *Moliera* w obszarze powietrza nienasyconego łatwe jest identyfikowanie stanów powietrza za pomocą trzech stosunkowo łatwo mierzalnych parametrów, tj. ciśnienia atmosferycznego  $p_{atm}$ , temperatury  $t$  i wilgotności względnej  $\varphi$ .

W USA i krajach anglojęzycznych rozpowszechnione jest stosowanie wykresu psychometrycznego we współrzędnych: temperatura  $t$  – zawartość wilgoci  $x$ , który nosi nazwę wykresu *Carriera*. Różni się on od wykresu *Moliera* głównie tym, że wskaźnik kierunkowy przemiany określa się stosunkiem strumienia ciepła jawnego do strumienia ciepła całkowitego. Podziałka wskaźnika kierunkowego zmienia się od wartości 1 do 0, a każda prosta równoległa do  $x=const$  ma wskaźnik kierunkowy wynoszący 1. Natomiast każda prosta równoległa do temperatury suchego termometru charakteryzuje się wskaźnikiem kierunkowym równym 0.

Dla potrzeb prowadzenia analiz w niniejszym opracowaniu zdecydowano się korzystać z wykresu *Carriera*, lecz w odwróconym układzie współrzędnych. Oś odciętych reprezentuje wartości udziału wilgoci  $x$  w powietrzu wilgotnym, a oś rzędnych temperaturę  $t$ . Dzięki temu uzyskano wykres zbliżony kształtem do wykresu *Moliera* z tą różnicą, że na osi rzędnych są poziome linie temperatury  $t$ . Dla poprawy czytelności prezentowanych wyników zrezygnowano z nanoszenia na wykresy dodatkowych rodzin krzywych reprezentujących np. izolinie: entalpii właściwej, ciśnienia cząstkowego pary wodnej, gęstości powietrza, wskaźnika kierunkowego przemian powietrza czy izolinie temperatury suchego i mokrego termometru.

### 5.3. Warunki przemysłowej eksploatacji silnika SE-1

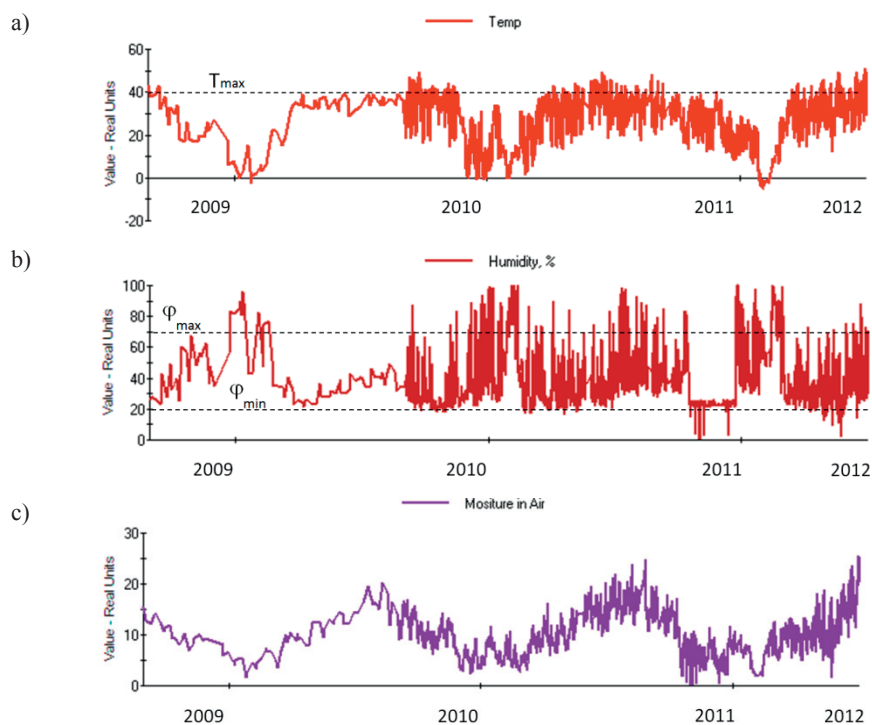
#### 5.3.1. Mikroklimat, badania bilansowe

W warunkach przemysłowej eksploatacji silnik SE-1 pracuje w środowisku o zmiennych parametrach, co przedstawiono na wykresach zamieszczonych na rys. 5.2÷5.8. Przedstawiają one przebiegi zmian badanych parametrów w czasie, rozkład badanych wielkości mikroklimatu na wykresie psychometrycznym oraz histogramy wybranych badanych wielkości uporządkowanych względem różnych kryteriów.

Na rysunku 5.2 przedstawiono wyniki pomiaru temperatury  $t$ , wilgotności względnej  $\varphi$  (*RH*) oraz zawartości wilgoci w powietrzu  $x$ , które wykonano na przestrzeni trzech lat. Z pomiarów tych wynika, że zmiany mierzonych w pomieszczeniu parametrów ulegają okresowo intensywnym zmianom. W okresie letnim i przejściowym obserwuje się okresowy wzrost temperatury powietrza powyżej 40°C, czyli powyżej temperatury określonej przez producenta silnika

jako dopuszczalnej (rys. 5.2a). W rozpatrywanym okresie ponad 8% czasu silnik pracował w podwyższonych warunkach termicznych. W lipcu i sierpniu przekroczenie to osiąga wartość ponad  $10^{\circ}\text{C}$ . W okresie zimowym temperatura wewnątrz badanej hali spada poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ , stwarzając zagrożenie przemarzania zewnętrznych i wewnętrznych przegród budowlanych. W tych temperaturach eksploatacja maszyn również wiąże się z dodatkowym obciążeniem związanym np. z powstaniem naprężeń w materiałach z tworzyw sztucznych, w tym w materiałach izolacyjnych uzwojeń badanego silnika.

Obserwowany zakres zmienności mierzonej wilgotności względnej powietrza wskazuje, że bardzo rzadko występuje zagrożenie występowania zbyt niskiej wilgotności, tj. poniżej 20%, w pomieszczeniu pracy silnika SE-1 (rys. 5.2b). Natomiast bardzo często pracujący silnik jest narażony na pracę w środowisku, w którym wilgotność względna powietrza przekracza wartość określoną przez producenta jako dopuszczalną (powyżej 70%). Te okresowe wzrosty wilgotności względnej zdarzają się zarówno w okresie zimowym jak i letnim, co stanowi łącznie ponad 10% czasu pracy badanego silnika.

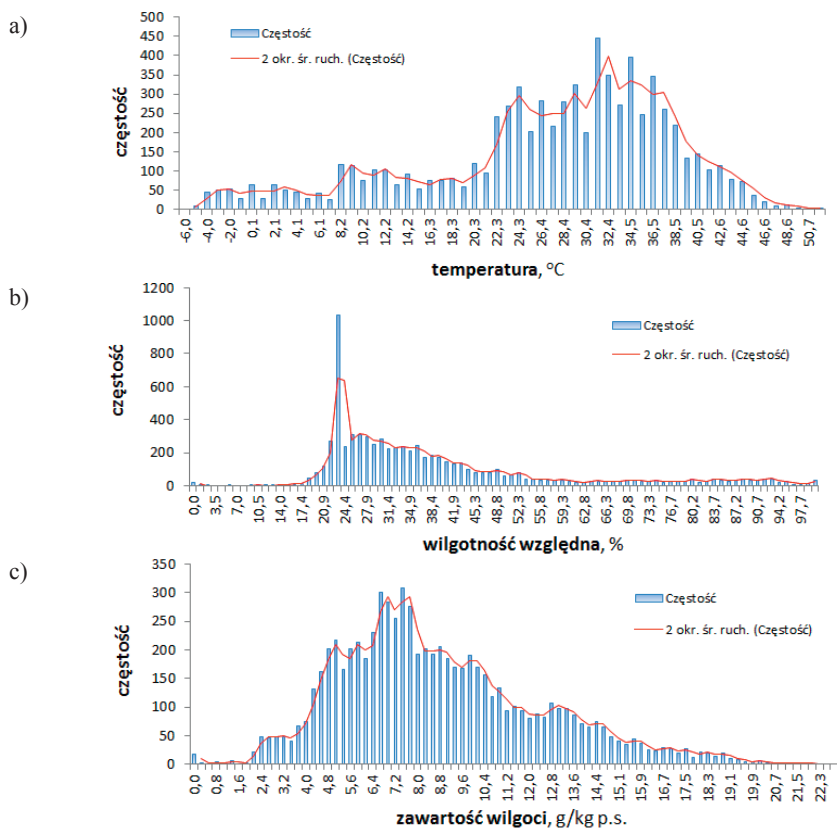


**Rys. 5.2.** Warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu pracy silnika SE-1 na przestrzeni trzech lat: a) temperatura w  $^{\circ}\text{C}$ , b) wilgotność względna w %, c) zawartość wilgoci w  $\text{mg}/\text{kg p.s.}$

Prezentowany na rysunku 5.2c przebieg zmian zawartości wilgoci w powietrzu wskazuje na duży zakres zmienności, bo od 2 do 22  $\text{g}/\text{kg ps}$ . Kształt linii

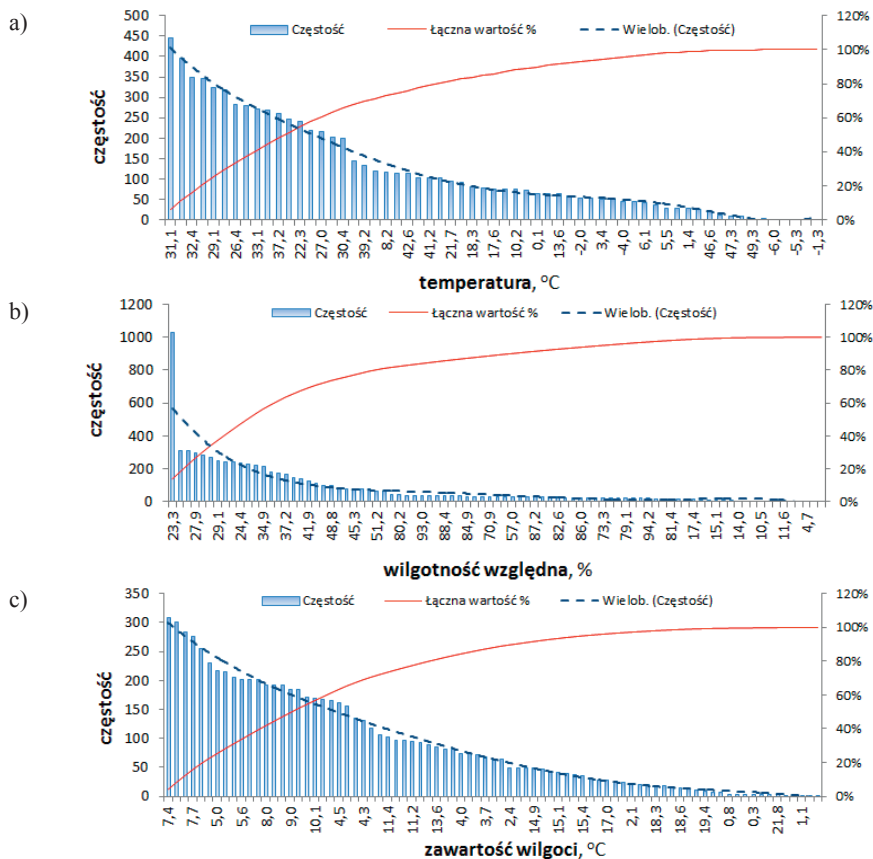
zmian udziału wilgoci w powietrzu wskazuje na dużą korelację między wilgotnością bezwzględną a porą roku. Największy udział wilgoci w powietrzu wilgotnym występuje w okresach letnich, a najmniejszy w okresie zimnym.

Na rysunkach 5.3÷5.4 przedstawiono przebiegi histogramów dla rozpatrywanych zbiorów danych pomiarowych. Na osi odciętych przedstawiono przedziały klasowe danych pomiarowych, natomiast na osi rzędnych – liczebność analizowanych parametrów mikroklimatu. Wysokość obliczonych słupków histogramów odpowiada liczebności poszczególnych klas (częstość występowania). Kształt przebiegu histogramu przedstawiono w dwóch wariantach. Pierwszy przedstawia gęstość rozkładu mierzonych wielkości wraz z wartością średnią ruchomą wyznaczoną dla okresu równego 2 (rys. 5.3). Drugi przedstawia kształt wynikający z zastosowania algorytmu sortowania *Pareto*, dzięki któremu uporządkowano zbiór danych względem częstości ich występowania (rys. 5.4). Dodatkowo przedstawiono na jego tle przebieg funkcji opisującej łączny udział procentowy badanej wielkości.



**Rys. 5.3.** Histogram i przebiegi funkcji gęstości wybranych wielkości mikroklimatu zgromadzonych w okresie 28.08.2009 r. – 31.01.2012 r., pomieszczenie pracy silnika SE-1:

a) temperatura, b) wilgotność względna, c) zawartość wilgoci w powietrzu



**Rys. 5.4.** Uporządkowany wykres występowania wybranych wielkości mikroklimatu w pomieszczeniu pracy silnika SE-1: a) temperatura, b) wilgotność względna, c) zawartość wilgoci w powietrzu, dane zgromadzone w okresie 28.08.2009 r. – 31.01.2012 r.

Uzyskane wartości zarejestrowanych parametrów, przedstawione na rys. 5.3 i 5.4, odpowiadają łącznie pełnemu okresowi prowadzonych badań, tj. okresowi z trzech lat (zbiór danych to 7410 pomiarów dla każdej badanej wielkości). Zestawienie wartości miar położenia i zmienności mierzonych parametrów mikroklimatu, w rozbiciu na okres zimowy i letni z uwzględnieniem warunków panujących w poszczególnych powtarzalnych okresach, przedstawiono oddzielnie oraz łącznie w tabelach 5.1 i 5.2. Podane w nich wartości miar położenia (średnia arytmetyczna, geometryczna i harmoniczna oraz mediana i moda) wskazują, że w okresie zimowym występują większe zróżnicowania temperatury powietrza i wilgotności względnej powietrza aniżeli w okresie letnim. Jest to wynik między innymi wpływu zróżnicowanych zewnętrznych warunków klimatycznych oraz intensywnego sposobu przewietrzania hali w tym okresie (praca przerywana wentylatorów, otwieranie drzwi i bram). Zróżnicowanie udziału

wilgoci w powietrzu największe jest natomiast w okresach letnich (ponad 15 g/kgps). Duże zróżnicowanie między wartościami średnimi, medianą (wartość środkowa) oraz dominantą (modą) świadczy o nieuporządkowanym przebiegu gęstości występowania badanych wielkości oraz o zbyt małej ilości branych pod uwagę badanych okresów.

**Tabela 5.1.** Zestawienie wartości miar położenia mierzonych parametrów – **okres letni**

zmienna	jedn.	okres pomiar.	średnia arytmetyczna	średnia geometryczna	średnia harmoniczna	mediana	moda	wartość min.	wartość maks.
<b>t</b>	°C	2009 r.	37,4	36,8	36,1	38,0	34,0		
		2010 r.	36,0	35,2	34,3	37,0	34,0		
		2011 r.	34,0	33,5	33,0	33,0	34,0		
		razem	34,7	34,2	33,6	35,0	34,0	17,0	52,0
<b>RH</b>	%	2009 r.	29,3	27,8	26,5	26,1	25,5		
		2010 r.	38,0	35,7	33,8	34,1	47,9		
		2011 r.	43,6	41,9	40,5	40,8	40,0		
		razem	41,1	39,0	37,1	38,7	40,0	17,0	98,6
<b>X</b>	g/kgps	2009 r.	11,3	11,2	11,0	11,0	10,8		
		2010 r.	13,5	13,3	13,0	13,4	14,3		
		2011 r.	14,3	14,0	13,8	13,8	13,1		
		razem	13,8	13,6	13,3	13,5	13,1	7,1	22,9

**Tabela 5.2.** Zestawienie wartości miar położenia mierzonych parametrów – **okres zimowy**

zmienna	jedn.	okres pomiar.	średnia arytmetyczna	średnia geometryczna	średnia harmoniczna	mediana	moda	wartość min.	wartość maks.
<b>t</b>	°C	2009 r.	7,5	-	-	4,0	2,0		
		2010 r.	16,1	-	-	13,0	11,0		
		2011 r.	18,0	-	-	22,0	23,0		
		razem	17,1	-	-	20,0	23,0	-6,0	37,0
<b>RH</b>	%	2009 r.	68,9	63,9	57,7	73,4	94,2		
		2010 r.	51,4	45,5	40,1	48,0	28,9		
		2011 r.	49,6	44,5	40,2	40,3	27,4		
		razem	56,9	51,8	41,0	41,7	34,0	14,6	100,0
<b>X</b>	g/kgps	2009 r.	6,1	6,0	5,8	6,3	7,8		
		2010 r.	6,1	5,8	5,5	6,2	3,7		
		2011 r.	6,8	6,6	6,3	6,7	9,7		
		razem	6,3	6,1	5,8	6,4	8,4	1,1	10,3

**Tabela 5.3.** Statystyka opisowa badanych zbiorów danych

oceniany parametr	<b>t</b>	<b>RH</b>	<b>X</b>	<b>t</b>	<b>RH</b>	<b>X</b>
okres pomiarowy (łącznie 3 lata)	lato	lato	lato	zima	zima	zima
średnia	34,74	41,07	13,84	12,96	54,67	6,13
błąd standardowy	0,17	0,40	0,08	0,29	0,61	0,04
mediana	35,00	38,70	13,49	12,00	50,10	6,28
tryb	34,00	40,00	13,11	22,00	100,00	8,41
odchylenie standardowe	6,08	14,42	2,76	10,32	21,78	1,46
wariancja próbki	36,95	208,02	7,61	106,41	474,17	2,12
kurtozą	0,02	3,43	-0,27	-1,21	-0,95	0,45
skośność	-0,23	1,62	0,40	-0,08	0,46	-0,36
zakres	35,00	81,60	15,76	43,00	85,40	9,17
minimum	17,00	17,00	7,10	-6,00	14,60	1,10
maksimum	52,00	98,60	22,86	37,00	100,00	10,27
poziom ufności (95,0%)	0,33	0,79	0,15	0,56	1,19	0,08



Charakterystykę opisową, opartą na standardowych parametrach statystycznych dla danych z zakresu wejściowego, przedstawiono w tabeli 5.3. Podane w niej wskaźniki dostarczają informacje o głównej tendencji i zmienności danych analizowanych zbiorów danych pomiarowych. Analizy danych dokonano, korzystając z pakietu *Analysis ToolPak* wchodzącego w skład programu *Microsoft Excel 2010*. Podane wartości wariancji i odchylenia standardowego charakteryzują rozproszenie i miarę szerokości rozproszenia wartości od wartości średniej. Im wartość odchylenia standardowego jest mniejsza, tym występuje więcej liczb bliskich wartości średniej. Większa wartość odchylenia świadczy o bardziej równomiernym rozkładzie (więcej jest skrajnych wyników). Kurtoza charakteryzuje względną szczytowość lub płaskość rozkładu w porównaniu z rozkładem normalnym. Dodatnia kurtoza oznacza rozkład o stosunkowo dużej szczytowości. Ujemna kurtoza oznacza rozkład stosunkowo płaski [25, 107, 122, 184].

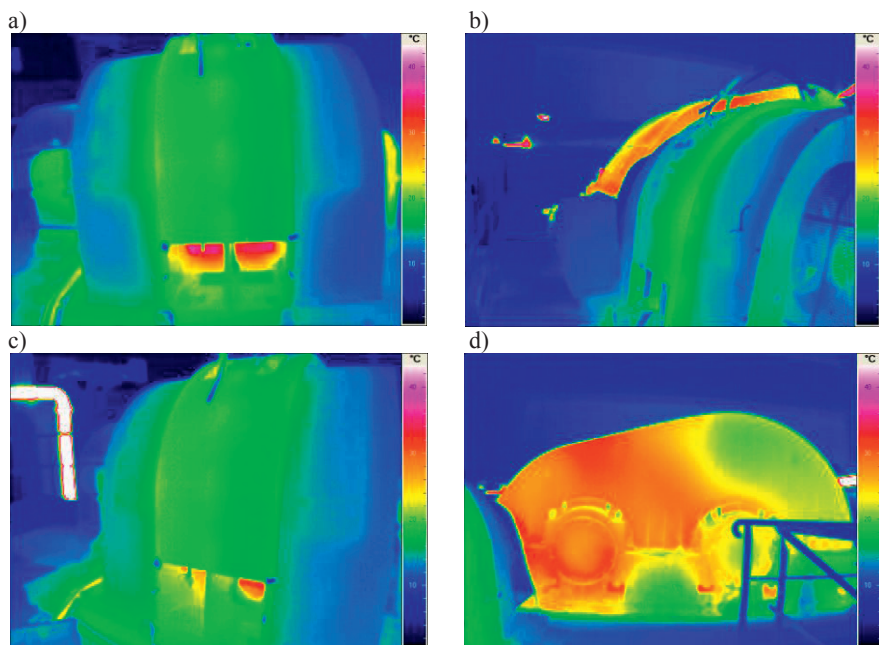
Prezentowane do tej pory wyniki pomiarów wielkości środowiskowych przedstawiano indywidualnie (odrębnie). Do oceny warunków panujących w pomieszczeniu pracującego silnika SE-1 lepsze wydaje się prezentowanie wyników pomiarowych na wykresach psychometrycznych. Na rysunku 5.5. przedstawiono wyniki pomiaru temperatury, wilgotności względnej i wyznaczonej na drodze obliczeniowej zawartości wilgoci w powietrzu przy założeniu stałego ciśnienia atmosferycznego na poziomie 1000 hPa. Kolorem niebieskim zaznaczono punkty odpowiadające pomiarom wykonanym w okresach zimowych, a kolorem czerwonym pomiary wykonane w okresach letnich. Uzyskany na wykresie szeroki rozkład punktów wskazuje jednoznacznie o występowaniu w badanym pomieszczeniu bardzo zróżnicowanych warunków mikroklimatycznych. Latem silnik narażony jest na pracę w środowisku dosyć umiarkowanym, zarówno pod względem temperatury, wilgotności i udziału wilgoci w powietrzu. Zimą w badanym pomieszczeniu występują okresowo bardzo niekorzystne warunki mikroklimatyczne (obszar poniżej linii nasycenia  $\varphi=100\%$ ). W tym okresie występuje wytrącanie się wilgoci z powietrza wilgotnego do postaci ciekłej. Przy spadku temperatury poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  mgła przeobraża się w szadź. W tym okresie na elementach charakteryzujących się wysoką pojemnością cieplną (głównie stalowe elementy konstrukcji maszyn i urządzeń) dochodzi do zjawiska kondensacji pary wodnej, a następnie jej zamarzania (obładzania).

Niesprzyjające warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu występują w wyniku występowania niekorzystnych warunków klimatycznych na zewnątrz budynku oraz braku ogrzewania wewnątrz. Jedynym źródłem ciepła w pomieszczeniu są jego zyski od pracujących urządzeń i instalacji technologicznych, ale wówczas kiedy pracują (rys. 5.6). Niekorzystne warunki mikroklimatyczne występują zatem w okresach przestoju linii technologicznej młyna cementu lub bezpośrednio zaraz po jego uruchomieniu.





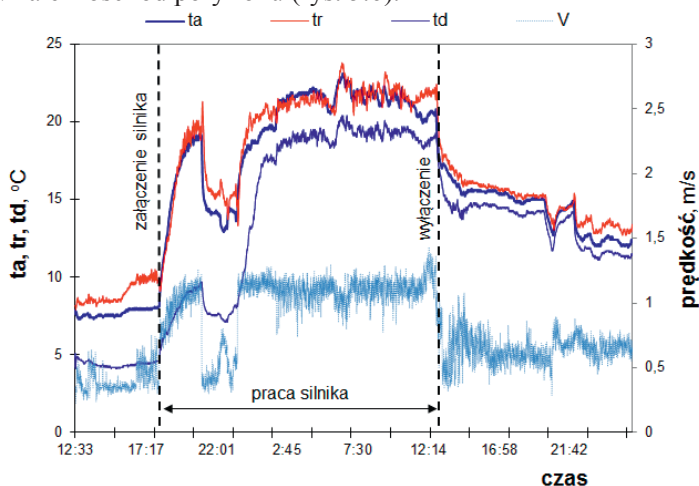
Rys. 5.5. Rozkład warunków mikroklimatycznych jakie panują w pomieszczeniu pracy silnika SE-1 na wykresie psychrometrycznym w układzie prostokątnym  $x-t$ , dane zgromadzone w okresie 28.08.2009 r. – 31.01.2012 r.



Rys. 5.6. Występujące w pomieszczeniu pracy silnika SE-1 źródła ciepła: a) silnik, b) elementy instalacji technologicznych, c) rurociąg technologiczny, d) przekładnia mechaniczna

Moment uruchomienia silnika wpływa na szybki wzrost temperatur w pomieszczeniu (rys. 5.7). W ciągu 60 minut od momentu włączenia wzrost temperatury powietrza, promieniowania i odczuwalnej osiąga ponad  $10^{\circ}\text{C}$ , a temperatury punktu rosy o  $5^{\circ}\text{C}$ . W tym czasie wzrasta również średnia prędkość powietrza od 0,3 do ponad 1,5 m/s. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza następuje spadek jego wilgotności względnej. Świadczy to o braku źródeł wilgoci w pomieszczeniu. Otwarcie przez obsługę drzwi wywołuje gwałtowny spadek temperatur i prędkości powietrza, natomiast wzrost wilgotności względnej. Po zamknięciu drzwi ponownie rosną mierzone temperatury i prędkość powietrza. Przebieg zmian temperatury punktu rosy wskazuje, że nie występuje zagrożenie wykraplania się wilgoci, ponieważ temperatura powietrza jest wyższa średnio o  $3\div 4^{\circ}\text{C}$ . Różnica między temperaturą powietrza i punktu rosy wyraźnie spada do poziomu  $1,5\div 2^{\circ}\text{C}$  podczas stygnięcia silnika po jego wyłączeniu.

Nagrzewaniu powietrza towarzyszy wzrost temperatury promieniowania, czyli parametru charakteryzującego całkowitą energię niesioną przez promieniowanie termiczne otaczających powierzchni. Często bywa tak, że jest ona większa od temperatury powietrza nawet o  $2\div 3^{\circ}\text{C}$ , głównie za sprawą promieniowania powierzchni zewnętrznych silnika i innych powierzchniowych źródeł ciepła. W badanym pomieszczeniu jest to również przekładnia mechaniczna, rurociągi transportujące gorącą wodę oraz elementy instalacji technologicznych. Podczas pomiarów kamerą termowizyjną okazało się, że najintensywniejszym źródłem ciepła, oprócz badanego silnika, jest współpracująca z nim przekładnia mechaniczna. Na jej powierzchni temperatura kształtuje się na poziomie  $35\div 55^{\circ}\text{C}$  w zależności od pory roku (rys. 5.6).



Rys. 5.7. Zmiana parametrów mikroklimatu, gdzie:  $t_a$ ,  $t_r$ ,  $t_d$  – odpowiednio temperatura powietrza, promieniowania i punktu rosy,  $v$  – prędkość powietrza

Przyrost temperatury powietrza w pomieszczeniu podczas pracy silnika elektrycznego jest funkcją liniową jego strat [43, 114, 147, 246]:

$$T_u = \sum \Delta P \cdot const \quad (5.8)$$

Powyższe stwierdzenie jest prawdziwe przy założeniu stałej wartości współczynnika przejmowania ciepła ( $\alpha=const$ ), co odpowiada z kolei przyjęciu założenia o niezmiennych się warunkach chłodzenia silnika podczas jego pracy. Całkowite straty w silniku pochodzą z uzwojeń stojana i wirnika  $\Delta P_{Cu}$ , strat powstających w obwodzie magnetycznym  $\Delta P_{Fe}$ , strat mechanicznych  $\Delta P_m$  oraz strat dodatkowych  $\Delta P_{dod}$ . Sumę powyższych strat można zapisać w postaci [43,114]:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{dod} \quad (5.9)$$

Poszczególne straty są zależne od wielu parametrów [43,114]. Najczęściej w literaturze przedstawia się je jako [114]:

$$\Delta P_{Cu} = I^2 \cdot const \quad (5.10)$$

$$\Delta P_{Fe} = B^2 \cdot f^{1,3} \cdot const \quad (5.11)$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{tarcia} + \Delta P_{went} \quad (5.12)$$

$$\Delta P_{tarcia} = n \cdot const \quad (5.13)$$

$$\Delta P_{went} = n^3 \cdot const \quad (5.14)$$

$$\Delta P_{psz} = I \cdot const \quad (5.15)$$

gdzie:

- $I$  prąd płynący w obwodzie głównym silnika,
- $B$  indukcja magnetyczna,
- $f$  częstotliwość magnesowania obwodu magnetycznego,
- $n$  prędkość obrotowa.

Przykłady innych metod wyznaczania strat w silnikach indukcyjnych wysokiego napięcia, które bazują na modelach przepływu mocy w silniku są podane między innymi w normach: JEC, IEC 60034-2:2000, IEEE Standard 112-1996, IEC 61972: 2002 [43,114,147,148,149]. Obliczenie sprawności silnika w oparciu o szacunek strat w silnikach według tych metod pozwala uzyskać sprawności różniące się między sobą na poziomie 1–2,5% dla dużych silników indukcyjnych [43].

W warunkach przemysłowej eksploatacji silników do oceny wielkości emisji ciepła można stosować również metody bezpośrednie lub bilansowe. Metoda bezpośrednia polega na pomiarze mocy pobieranej na zasilaniu badanego silnika oraz pomiarze mocy mechanicznej mierzonej na wale napędowym [IEC60034-2]. Metoda bilansowa pozwala wyznaczyć strumień ciepła, jaki emituje silnik do otoczenia na drodze bilansu cieplnego czynnika chłodzącego silnik. Polega ona na pomiarze strumienia przepływającego przez silnik czynnika chłodzącego (np.

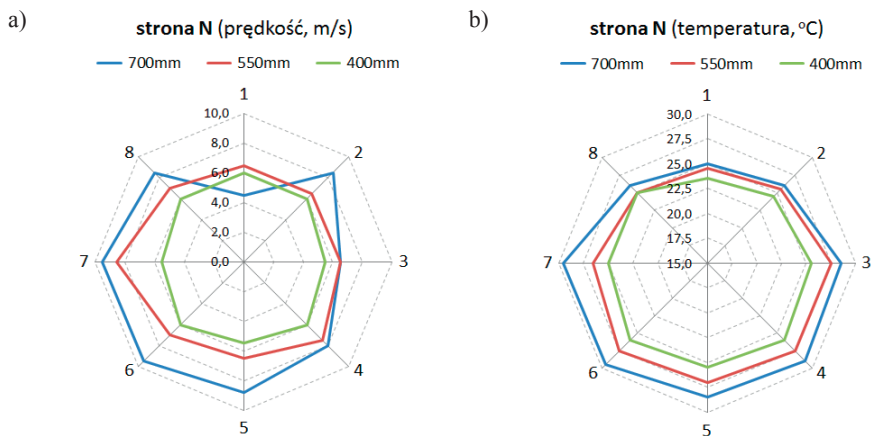
powietrza) oraz na pomiarach właściwości termodynamicznych czynnika, tj. temperatury, ciśnienia, a w przypadku powietrza wilgotnego również wilgotności względnej. Pomiarów dokonuje się na kanałach doprowadzających i odprowadzających czynnik chłodzący, tzn. są one wykonywane w osłonie bilansowej badanego silnika [10,152,157,168].

Biorąc pod uwagę możliwości szacowania wielkości emisji ciepła silników w oparciu o wyżej opisane metody, do badań własnych przyjęto wykorzystać metodę bilansów cieplnych uzupełnioną o pomiar rozkładu temperatury na powierzchni obudowy badanego silnika (opis instalacji pomiarowej w rozdziale 3).

Pomiarów strumienia przepływającego powietrza przez badany silnik dokonywano okresowo, wyznaczając rozkłady lokalne prędkości w wybranych punktach przekrojów kanałów wentylacyjnych silnika z zachowaniem w tym względzie wymagań norm [ISO 3354, ISO7194, PN/M-42336]. Znając prędkości lokalne wyznaczono wartości prędkości średnich poprzez określenie sumy iloczynów skończonych wycinków powierzchni przekrojów i odpowiadających danemu wycinkowi prędkości lokalnych, a następnie odnosząc to do całkowitej powierzchni kanału.

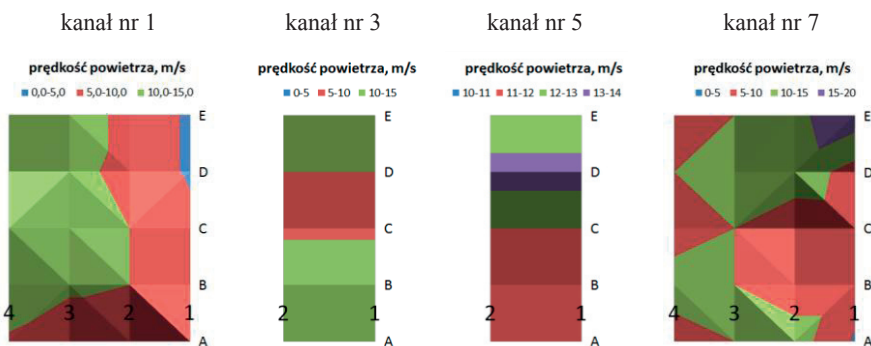
Przykładowe wyniki pomiaru prędkości lokalnych oraz temperatur w wybranych punktach kanałów doprowadzających i odprowadzających powietrze z badanego silnika przedstawiono na rysunkach 5.8 i 5.9 oraz w tabeli 5.4. Z uzyskanych pomiarów oraz ich analizy wynika, że łączny strumień przewietrzający silnik zawierał się między 13,5 i 14 tys. m<sup>3</sup>/h i wykazywał w kolejnych okresach pomiarowych dużą powtarzalność. Zaobserwowano ponadto, że występuje dość wyraźne zróżnicowanie między mierzonymi prędkościami lokalnymi w obrębie każdego z badanych kanałów. Te różnice sięgają nawet 10 m/s. Wyznaczone prędkości średnie dla poszczególnych kanałów charakteryzują się również zróżnicowaniem prędkości. Te różnice są już jednak dużo niższe i sięgają maksymalnie 2,5–3°C. Konsekwencją zróżnicowania średnich prędkości w poszczególnych kanałach wentylacyjnych jest różnica w wielkości strumienia powietrza przewietrzającego silnik. W tabeli 5.4 wykazano, że różnica między strumieniem chłodzącym część napędową (N) i przeciwnapędową (P) wynosi około 19%. Konsekwencją tego stanu jest niesymetryczne chłodzenie silnika, a to z kolei prowadzi do sytuacji, kiedy uzwojenia elektryczne po stronie przeciwnapędowej silnika są narażone na pracę w gorszych warunkach termicznych.

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki pomiarów, ich analizę oraz fakt, iż badany silnik pracuje ze stałą prędkością obrotową, uznano, że przyjęta metoda okresowego pomiaru strumienia powietrza jest wystarczająco poprawna z punktu widzenia prowadzonych badań.

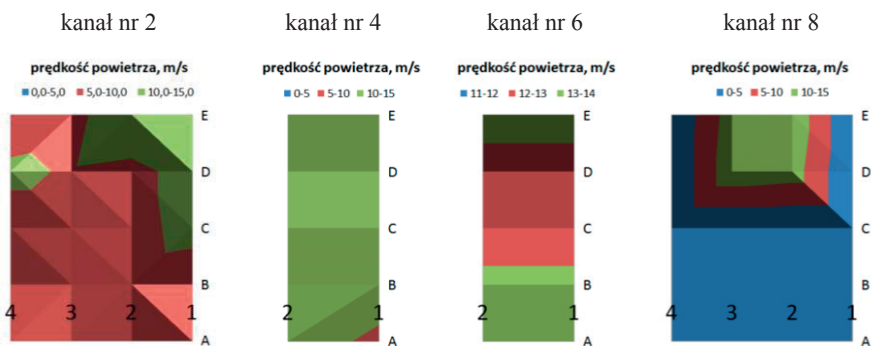


**Rys. 5.8.** Wyniki pomiaru: a) prędkości lokalnych, b) temperatury; w kanale dolotowym badanego silnika SE-1 po stronie napędowej

a) kanały wentylacyjne po stronie napędowej (N)



b) kanały wentylacyjne po stronie przeciw napędowej (P)

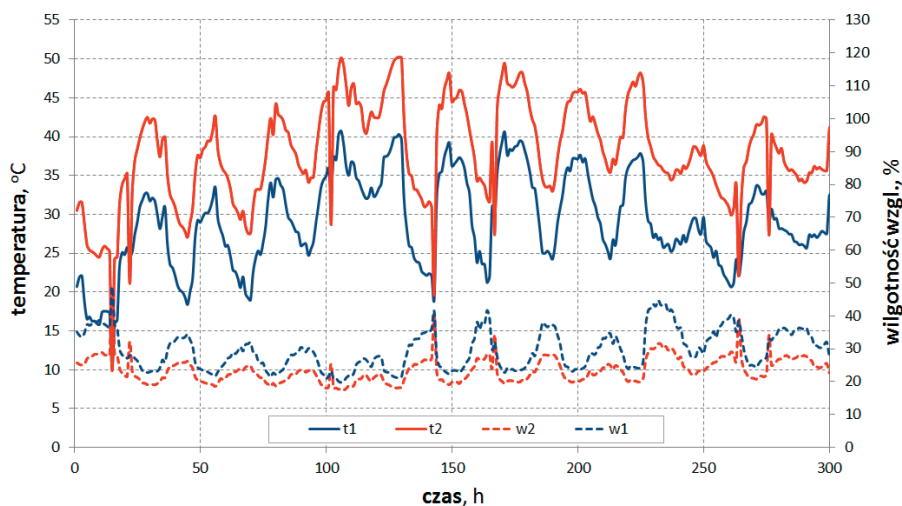


**Rys. 5.9.** Przykładowe wyniki pomiaru prędkości lokalnych w wentylacyjnych kanałach wywiewnych badanego silnika SE-1

**Tabela 5.4.** Przykładowe wyniki pomiaru prędkości lokalnych w kanałach wywiewnych

Strona napędowa (N)				Strona przeciwnapędowa (P)			
ozn.	A	Vs	Gs	ozn.	A	Vs	Gs
	m <sup>2</sup>	m/s	m <sup>3</sup> /h		m <sup>2</sup>	m/s	m <sup>3</sup> /h
kanal 1	0,0720	9,5	2 468,9	kanal 2	0,0720	8,9	2 300,4
kanal 3	0,0300	11,1	1 198,8	kanal 4	0,0300	12,1	1 301,4
kanal 5	0,0300	12,1	1 306,8	kanal 6	0,0300	13,0	1 404,0
kanal 7	0,0720	9,7	2 514,2	kanal 8	0,0225	13,1	1 063,1
razem			<b>7 488,7</b>	razem			<b>6 068,9</b>
łączy strumień chłodzący silnik, m <sup>3</sup> /h						<b>13 557,6</b>	
procentowa różnica w strumieniu chłodzącym stronę (N) i (P)						<b>19,0%</b>	

Znając charakterystykę przepływową badanego silnika oraz mierząc w sposób ciągły temperaturę i wilgotność względną w kanałach wentylacyjnych można analizować warunki chłodzenia silnika w różnych warunkach przemysłowej eksploatacji. Na rysunku 5.10 przedstawiono przykładowy przebieg zmian wybranych parametrów procesowych. Wyraźne zmiany temperatur i wilgotności względnej wskazują na okresowy charakter pracy badanego silnika. Widać bardzo wyraźnie przyrost temperatury powietrza chłodzącego silnik. Podczas normalnej pracy silnika przyrost temperatury osiąga stabilną wartość około 10°C. Widać również, że w małym stopniu przyrost zależy od temperatury początkowej powietrza chłodzącego.

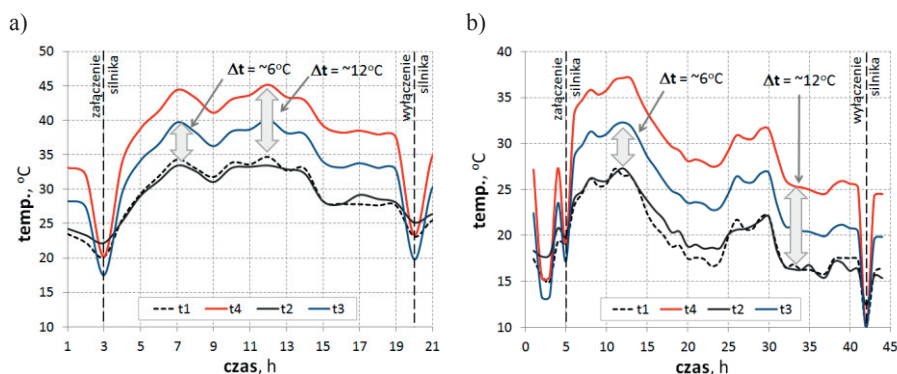


**Rys. 5.10.** Przebieg zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza mierzonych w dwóch kanałach wentylacyjnych silnika SE-1 zarejestrowane w okresie 03.05.2011r. ÷ 15.05.2011r., gdzie: t1 i t2 – temperatura nawiewanego i wywiewanego powietrza, w1 i w2 – wilgotność wzgl. nawiewanego i wywiewanego powietrza

Dwa przykłady pojedynczych cykli pracy silnika zostały przedstawione na rysunkach 5.11 i 5.12. Z ich analizy wynika, że nierównomierny przepływ po-

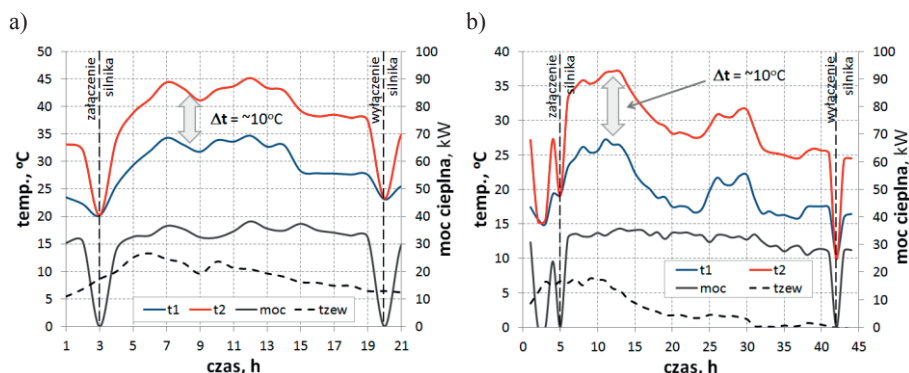


wietrza wpływa również na nierównomierny wzrost temperatury powietrza podczas chłodzenia silnika w części napędowej i przeciwnapędowej. Mniejszy przyrost temperatury powietrza obserwuje się przy chłodzeniu strony przeciwnapędowej silnika, około 6°C. Po stronie napędowej przyrost temperatury powietrza chłodzącego jest prawie dwukrotnie większy. Ważna jest również obserwacja, że w kanałach doprowadzających powietrze do silnika ma ono różną temperaturę. Różnice są na poziomie 2–4°C i wynikają z warunków mikroklimatycznych, jakie się kształtują w pomieszczeniu hali maszyn w wyniku wymiany ciepła i masy pomiędzy pracującym silnikiem a powietrzem wewnątrz i zewnątrz budynku.



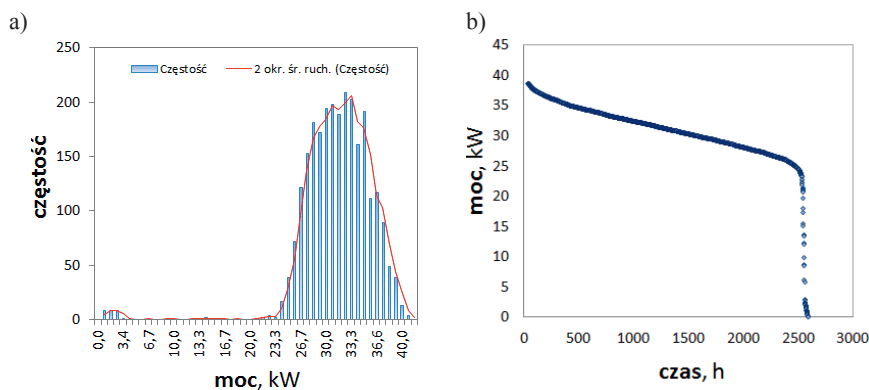
**Rys. 5.11.** Przebieg zmian temperatury powietrza chłodzącego część napędową i przeciwnapędową podczas jednego cyklu pracy silnika SE-1, gdzie t1 i t2 – temperatura powietrza nawiewanego, t3 i t4 – temperatura powietrza wywiewanego, okres pomiarowy:

a) 29.04.2011 r. ÷ 30.04.2011 r., b) 02.05.2011 r. ÷ 04.05.2011 r.



**Rys. 5.12.** Przebieg zmian temperatury powietrza chłodzącego część napędową i przeciwnapędową badanego silnika, gdzie t1 i t2 – temperatura powietrza nawiewanego, t3 i t4 – temperatura powietrza wywiewanego, okres pomiarowy: a) 29.04.2011 r. ÷ 30.04.2011 r.,

b) 02.05.2011 r. ÷ 04.05.2011 r.



**Rys. 5.13.** Skuteczność działania układu chłodzenia: a) histogram, b) uporządkowany wykres zmian mocy cieplnej emitowanej przez silnik SE-1, okres pomiarowy 13.04.2011 r. ÷ 31.01.2012 r.

Praca badanego silnika powoduje emisję ciepła do pomieszczenia w wysokości średnio  $30\div 35\text{kW}$  (rys. 5.13). Krzywa mocy cieplnej w małym stopniu zmienia się w wyniku zmiany temperatury wewnątrz pomieszczenia hali, a zależy głównie od obciążenia silnika. Przy obciążeniu silnika na poziomie  $70\div 100\%$  wpływ warunków zewnętrznych na efektywność chłodzenia jest również niewielki, ale obserwowalny. Spadek temperatury zewnętrznej o  $5^{\circ}\text{C}$  powoduje obniżenie temperatury w hali maszyn o prawie  $10^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.12). Niemniej skuteczność układu chłodzenia pozostaje nadal na bardzo podobnym poziomie.

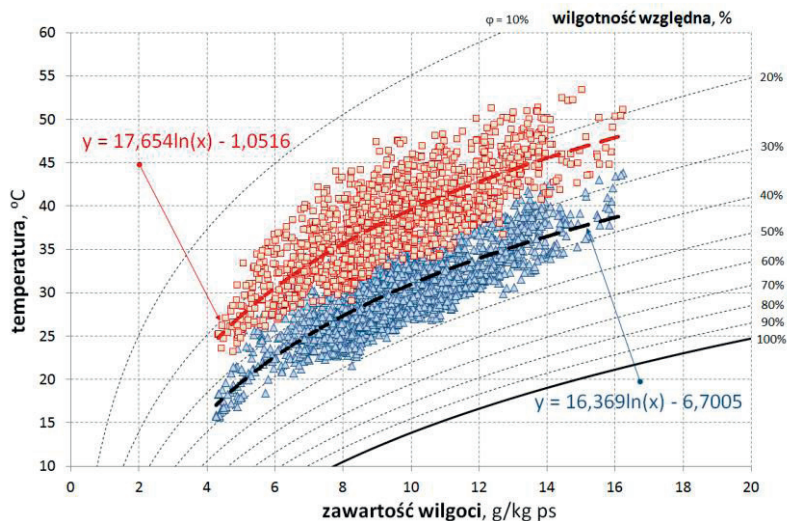
Efektywność chłodzenia silnika zależy w pewnym stopniu od warunków mikroklimatycznych panujących w pomieszczeniu. Ten trend jest obserwowalny dopiero na wykresie psychrometrycznym powietrza wilgotnego (rys. 5.14). Użyte na drodze obliczeniowej korelogramy wskazują wpływ udziału wilgoci w powietrzu na jakość wymiany ciepła podczas chłodzenia silnika. Wzrost wilgotności bezwzględnej z 4 do  $16\text{ g/kgps}$  powoduje efektywny wzrost różnicy temperatur z 7 do blisko  $10^{\circ}\text{C}$ .

Główną przyczyną niesymetrycznego chłodzenia silnika (jak stwierdzono podczas wizji lokalnych oraz w wyniku analizy wyników pomiarowych), jest zaburzenie swobodnego przepływu powietrza chłodzącego po jednej ze stron silnika. W badanym układzie montaż osłony bezpieczeństwa zbyt blisko wirującej części wału po stronie przeciwnapędowej spowodowało ograniczenie dopływu powietrza i w konsekwencji jego zmniejszenie o 19% (tabela 5.4). W konsekwencji ta część uzwojeń oddaje do otoczenia o 5 kW mniej ciepła. Efektem tego jest lokalny wzrost temperatury wewnętrznych elementów silnika o około  $20^{\circ}\text{C}$ .

Wpływ poszczególnych wielkości klimatu zewnętrznego na efektywność pracy układu chłodzenia uwzględniający pełny zbiór danych pomiarowych przedstawiono na rysunku 5.15. Analiza tych danych potwierdza już wcześniej sformułowane spostrzeżenia o małym wpływie zewnętrznych parametrów kli-



matycznych na skuteczność działania układu chłodzenia. Przyrost temperatury powietrza w tym układzie w bardzo małym stopniu zależy od temperatury zewnętrznej. Różnica ta wynosi około 9°C (rys. 5.15d).

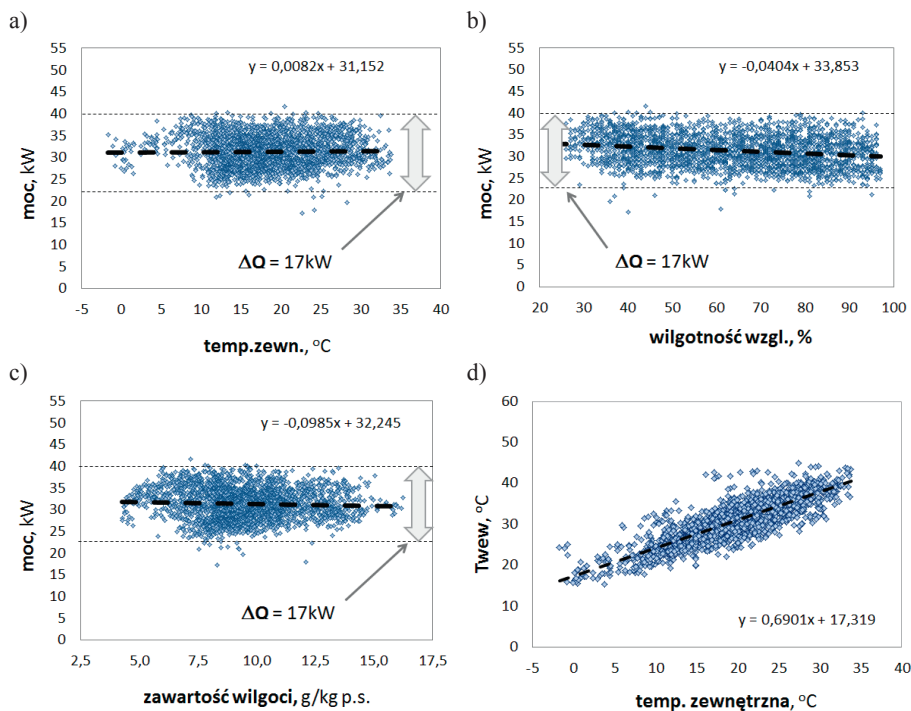


**Rys. 5.14.** Korelogramy warunków mikroklimatycznych jakie panują w pomieszczeniu pracy silnika SE-1 na wykresie psychrometrycznym w układzie prostokątnym  $x-t$ , okres pomiarowy 13.04.2011 r. ÷ 31.01.2012 r. (ilość pomiarów 6 500)

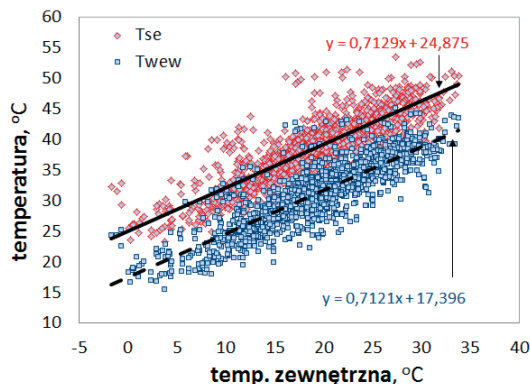
Dużą uciążliwością dla prawidłowej eksploatacji badanego silnika w zakresie mikroklimatu jest chłodzenie silnika zanieczyszczonym powietrzem. Głównym źródłem zanieczyszczenia jest drobny pył cementu pochodzący z linii technologicznej produkcji młyna cementu. Pył charakteryzuje się dosyć zróżnicowanym rozkładem wielkości ziaren. Rozkład ziarnowy pyłu mieści się w zakresie od 0 do ponad 200µm (rys. 5.17). Największy udział stanowi frakcja 25÷60 µm. W skład chemiczny pyłu wchodzi: część mineralna stała i lotna (97%) oraz węgiel (do 3%). Średnia wilgotność pyłu wynosi 2÷5%.

Przykładowe wyniki pomiaru stężenia pyłu cementowego w powietrzu, mierzone w odległości 1m od silnika przedstawiono na rysunku 5.18. Z analizy przebiegów czasowych wynika, że występuje korelacja między stanem pracy silnika a wielkością stężenia (5.18a). Podczas pracy silnika stężenie pyłu jest znacznie większe niż w okresach postoju. Po jego uruchomieniu, w wyniku wzrostu prędkości powietrza w hali, pył jest unoszony i rozprzestrzeniany po całym pomieszczeniu (5.18b). Największe stężenie pyłu w powietrzu występuje zaraz po uruchomieniu silnika i jest spowodowane wyrzuceniem pyłu z wnętrza obudowy silnika przez otwory wentylacyjne. W ciągu zaledwie 5 minut od jego uruchomienia następuje ponaddwukrotny wzrost stężenia (od 0,35 do 0,9 mg/m<sup>3</sup>). Później wartość stężenia już spada. Okresowo można dostrzec chwilowe wzrosty stężenia. Jest to spowodowane pojawieniem się nowego źró-

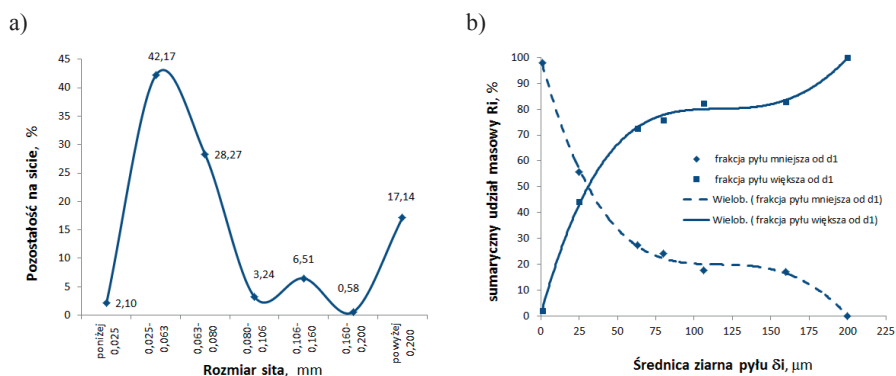
dła pyłu, np. otwarcie drzwi z hali młynów cementu. Średnio stężenie pyłu w hali maszyn podczas pracy silnika mieści się między  $0,45 \div 0,55 \text{ mg/m}^3$ , a podczas postoju między  $0,25$  do  $0,4 \text{ mg/m}^3$ .



Rys. 5.15. Wpływ zewnętrznych warunków klimatycznych na efektywność pracy układu chłodzenia (a,b,c) oraz temperaturę wewnątrz hali (d), okres pomiarowy 13.04.2011 r. ÷ 31.01.2012 r. (ilość pomiarów 6 500)

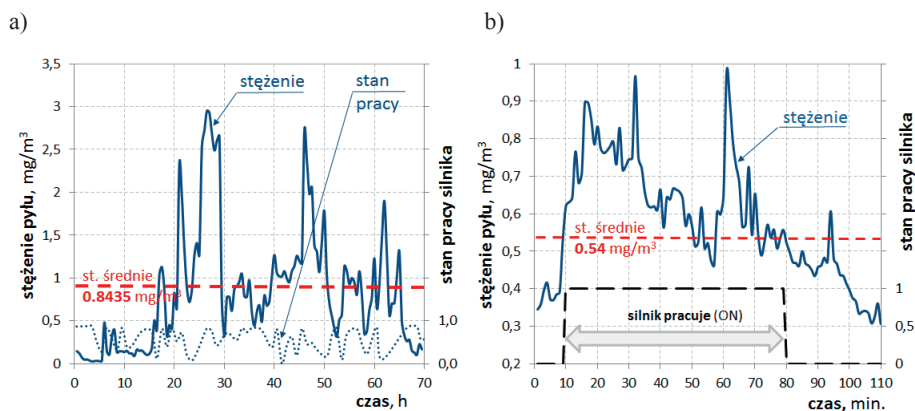


Rys. 5.16. Korelogramy wpływu temperatury zewnętrznej na temperaturę wewnętrzną (Twew) oraz temperaturę powietrza po chłodzeniu silnika (Tse), okres pomiarowy 13.04.2011 r. ÷ 31.01.2012 r. (ilość pomiarów 6 500)



Rys. 5.17. Charakterystyka rozkładu wielkości ziaren pyłu cementowego, a) próba sitowa, b) histogram rozkładu ziarnowego

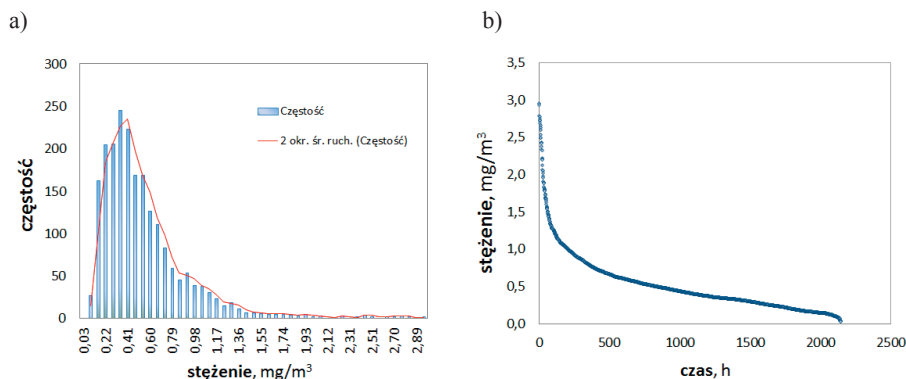
Pył zawarty w powietrzu zasysany jest wraz z powietrzem wentylacyjnym do wnętrza silnika i podczas normalnej pracy ponownie wyrzucany na zewnątrz. Podczas wyłączania część pyłu osadza się na uzwojeniach stojana i wirnika, powodując powstawanie cienkiej warstwy. Przy wysokiej wilgotności powietrza podczas stygnięcia może to spowodować powstanie trwałej powłoki cementowej. Skutkiem tego jest gorsza wymiana ciepła i wzrost temperatury izolacji uzwojeń podczas kolejnych godzin pracy.



Rys. 5.18. Przykładowe przebiegi zmian stężenia pyłu cementowego:  
a) trzydniowy okres obserwacji (16.12.2011 r. ÷ 19.12.2011 r.),  
b) pojedynczy cykl pracy silnika (dn. 17.10.2011 r.)

Wnioski wynikające z analizy wyników pomiarowych skłoniły autora do zaproponowania służbom technicznym, odpowiedzialnym za dozór i eksploatację badanego silnika, okresowe jego czyszczenie. Zaproponowano jego odkurzenie typowym odkurzaczem przemysłowym wyposażonym w filtr workowy klasy minimum EU5. Użytkownik wprowadził procedurę czyszczenia do instrukcji eksploatacji silnika. Od 4 lipca 2011 roku czyszczenie jest powtarzane

systematycznie co 2÷3 dni. Ostatecznie użytkownik zdecydował się na technologię czyszczenia sprężonym suchym powietrzem. Uzyskany efekt stosowania czyszczenia zostanie przedstawiony w dalszej części pracy (rozdział 6).



**Rys. 5.19.** Rozkład gęstości stężenia pyłu cementowego w badanej hali: a) histogram częstości występowania, b) uporządkowany wykres zmian stężenia pyłu, okres pomiarowy 14.10.2011 r. ÷ 31.01.2012 r. (ilość pomiarów 2500)

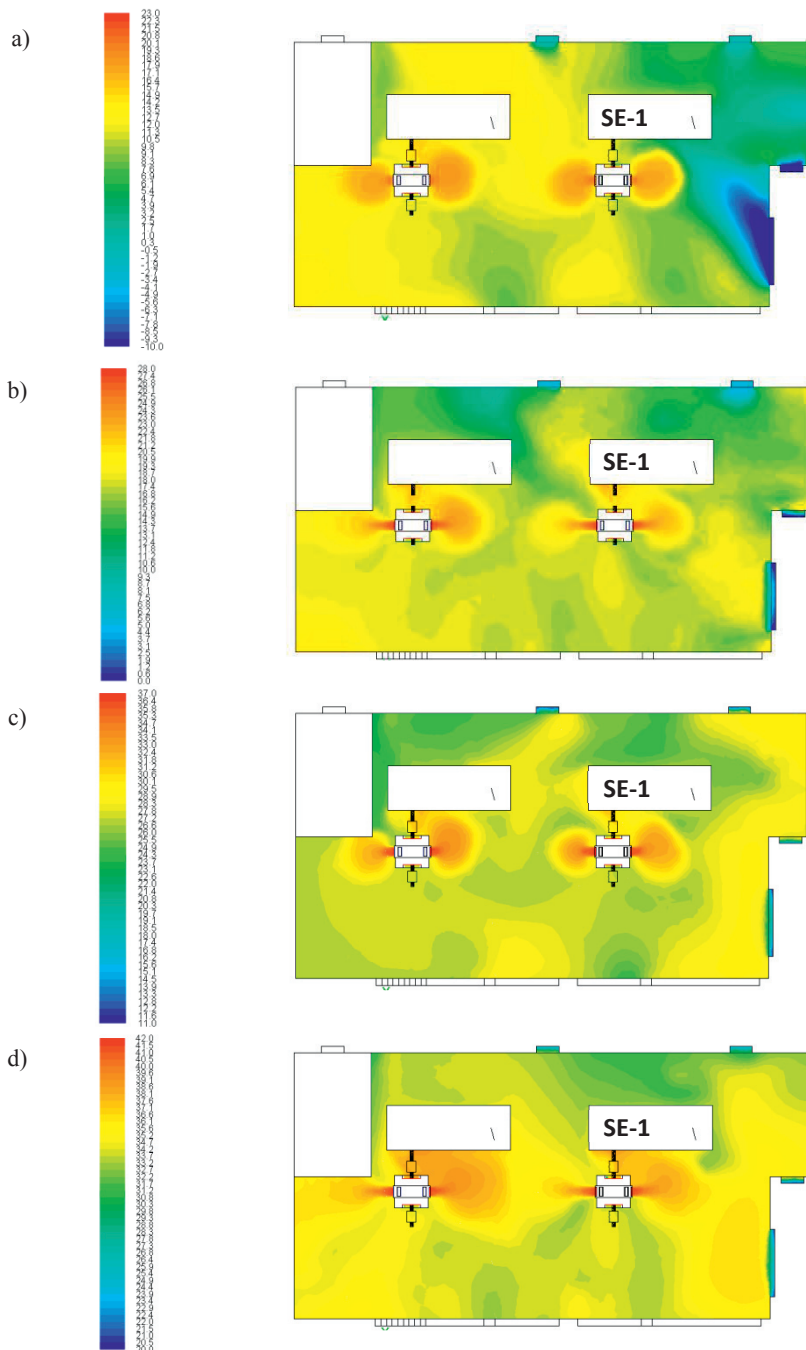
### 5.3.2. Wyniki badań symulacyjnych

Celem prezentowanych poniżej badań symulacyjnych jest dostarczenie szczegółowych informacji o charakterze i intensywności przebiegu zjawisk cieplnych i przepływowych do jakich dochodzi w pomieszczeniu podczas pracy badanego silnika SE-1. Dzięki obliczeniu rozkładów temperatur i prędkości ruchu powietrza dla rozpatrywanych oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych możliwe jest zwizualizowanie przebiegu zjawisk co znacznie poszerzyło zakres prowadzonej analizy.

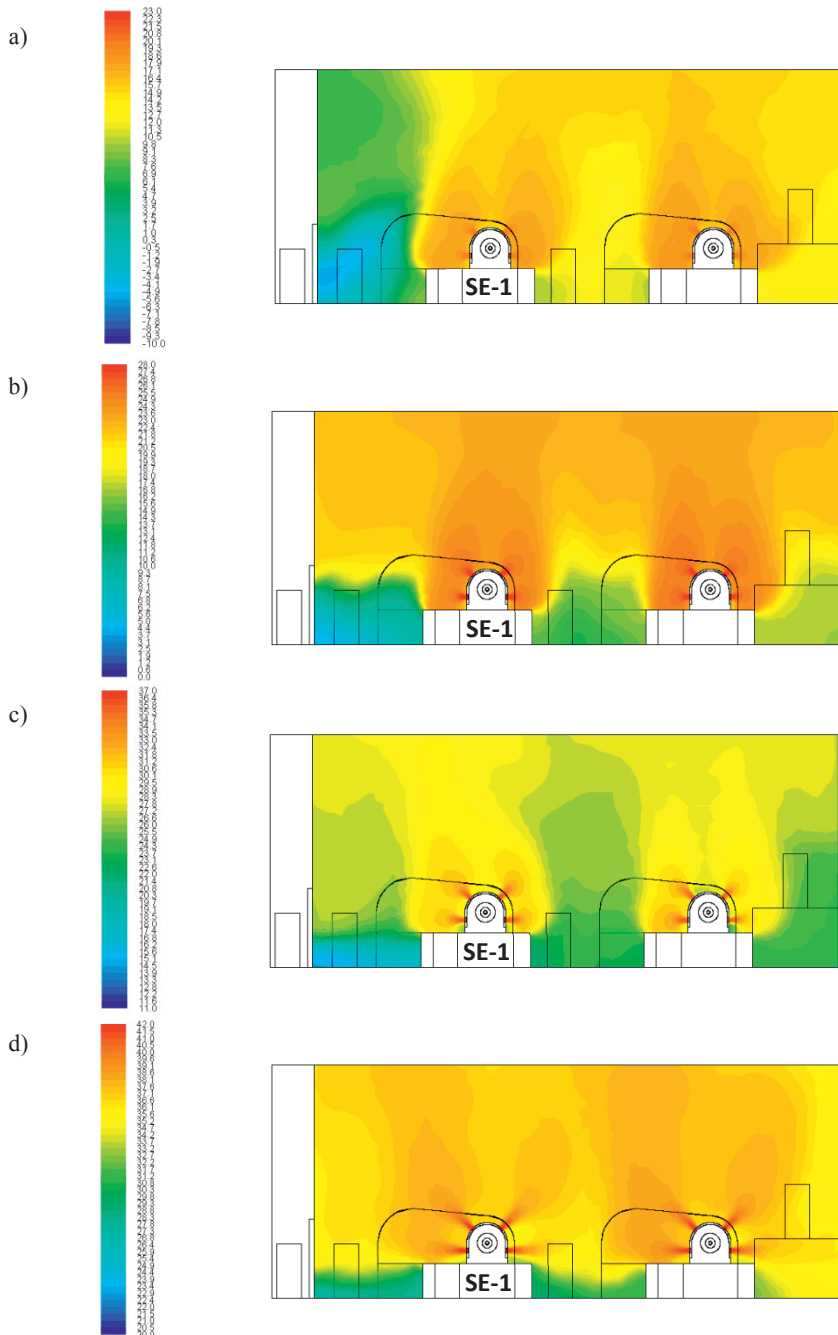
Rozpatrzono pracę silnika w różnych warunkach eksploatacji oraz przy zmiennych warunkach klimatycznych panujących na zewnątrz budynku. Przyjęto następujący scenariusz prowadzenia badań symulacyjnych. Wyniki obliczeń przedstawiają opis zjawisk w stanach ustalonych, które uzyskano dzięki wykorzystaniu modeli opisanych w rozdziale 4. Dla porównania wpływu zmian wewnętrznych warunków klimatycznych na przebieg intensywności zjawisk ciepło-przepływowych przeprowadzono serię obliczeń przy różnych temperaturach powietrza zewnętrznego, tj. przy zadanej temperaturze zewnętrznej z przedziału  $< -10, 0, 10, 20^{\circ}\text{C} >$ . Rozpatrzono ponadto wpływ warunków pracy zespołów napędowych poprzez zasymulowanie jednoczesnej pracy obu zespołów a następnie pracy jedynie zespołu, w skład którego wchodzi badany silnik SE-1. Wybrane wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 5.20÷5.30. Przedstawiono je w postaci rozkładów konturowych badanych wielkości, pól wektorowych oraz gęstości występowania profili prędkości. Skala kolorów na rysunkach odpowiada odpowiednio rozkładowi temperatury i prędkości a długość wektorów lokalnej prędkości z jaką porusza się powietrze.

Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają prezentowane wcześniej wnioski z badań eksperymentalnych. Chodzi tu głównie o występującą podczas pracy silnika dużą nierównomierność rozkładu temperatury powietrza w pomieszczeniu. Z zaprezentowanych na rysunkach 5.20 i 5.21 wyników obliczeń wnioskuje się, że występujące różnice temperatur, obserwowane w bezpośrednim otoczeniu badanego silnika SE-1, osiągają wartości między 5 a 20°C. W dużym stopniu wynika to z pracy układu chłodzenia silnika, ale również z faktu, że powietrze w pomieszczeniu intensywnie się porusza. Ruch powietrza ma charakter wymuszony pracą wentylatorów ruchu konwekcyjnego. Przestrzenny sposób i kierunek poruszania się mas powietrza w dużym stopniu zależy od zmieniającej się temperatury zewnętrznej powietrza (rys. 5.20 i 5.21) i różnych warunków pracy (rys. 5.22 i 5.23).

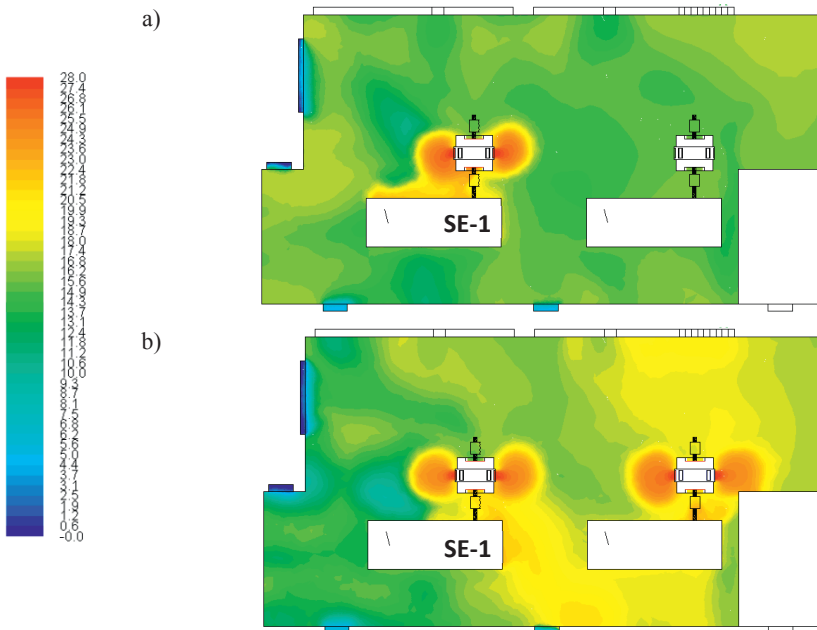
Wyniki badań symulacyjnych dostarczają szereg dodatkowych nowych informacji o badanym obiekcie. Na przykład z analizy warunków pracy dwóch jednocześnie pracujących silników wynika, że przy różnych zewnętrznych warunkach klimatycznych drugi silnik pracuje w dużo mniej sprzyjających warunkach termicznych. Jego układ chłodzenia jest narażony na wyższą temperaturę czynnika chłodzącego, ale również na bardziej nierównoważone chłodzenie części napędowej i przeciwnapędowej. To zjawisko tylko potwierdza obserwacje poczynione już na podstawie badań eksperymentalnych. Świadczy również o źle funkcjonującym systemie wentylacji w pomieszczeniu.



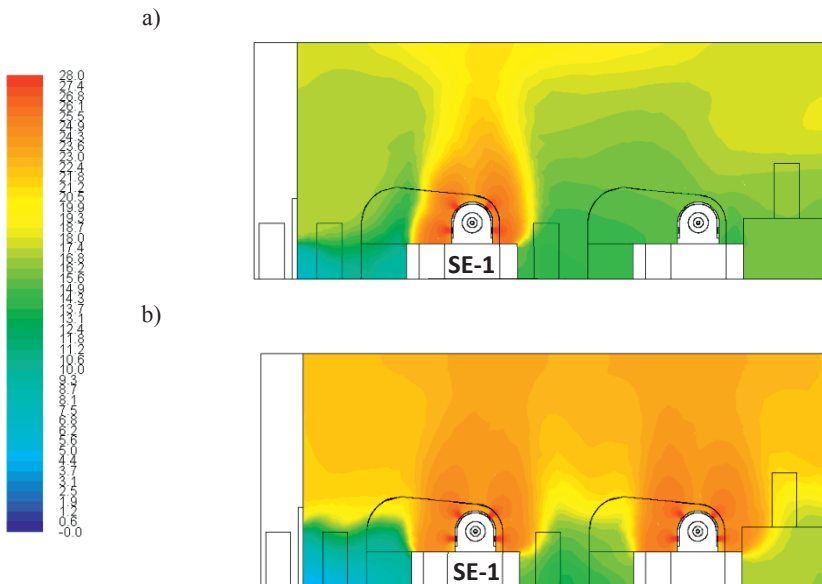
Rys. 5.20. Pole temperatury obliczone w płaszczyźnie poziomej na wysokości  $z=2\text{m}$ :  
 a)  $T_{zew}=-10^\circ\text{C}$ , b)  $T_{zew}=0^\circ\text{C}$ , c)  $T_{zew}=10^\circ\text{C}$ , d)  $T_{zew}=20^\circ\text{C}$



**Rys. 5.21.** Pole temperatury obliczone w płaszczyźnie pionowej  $y=6\text{m}$ : a)  $T_{zew}=-10^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{zew}=0^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{zew}=10^{\circ}\text{C}$ , d)  $T_{zew}=20^{\circ}\text{C}$

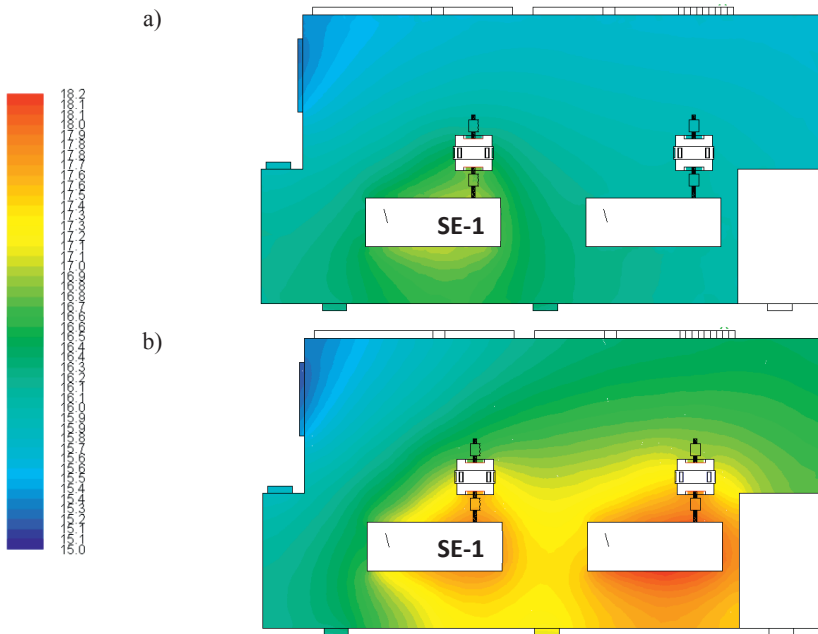


Rys. 5.22. Pole temperatury obliczone w płaszczyźnie poziomej na wysokości  $z=2\text{m}$ ,  $T_{zew}=0^\circ\text{C}$ : a) pracuje jeden silnik SE-1, b) pracują dwa silniki

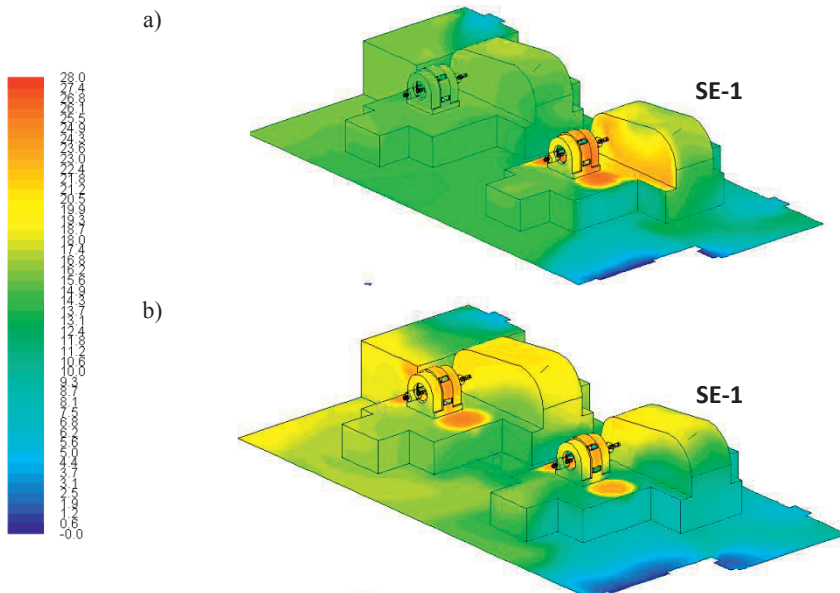


Rys. 5.23. Pole temperatury obliczone w płaszczyźnie pionowej  $y=6\text{m}$ ,  $T_{zew}=0^\circ\text{C}$ : a) pracuje jeden silnik (SE-1), b) pracują dwa silniki



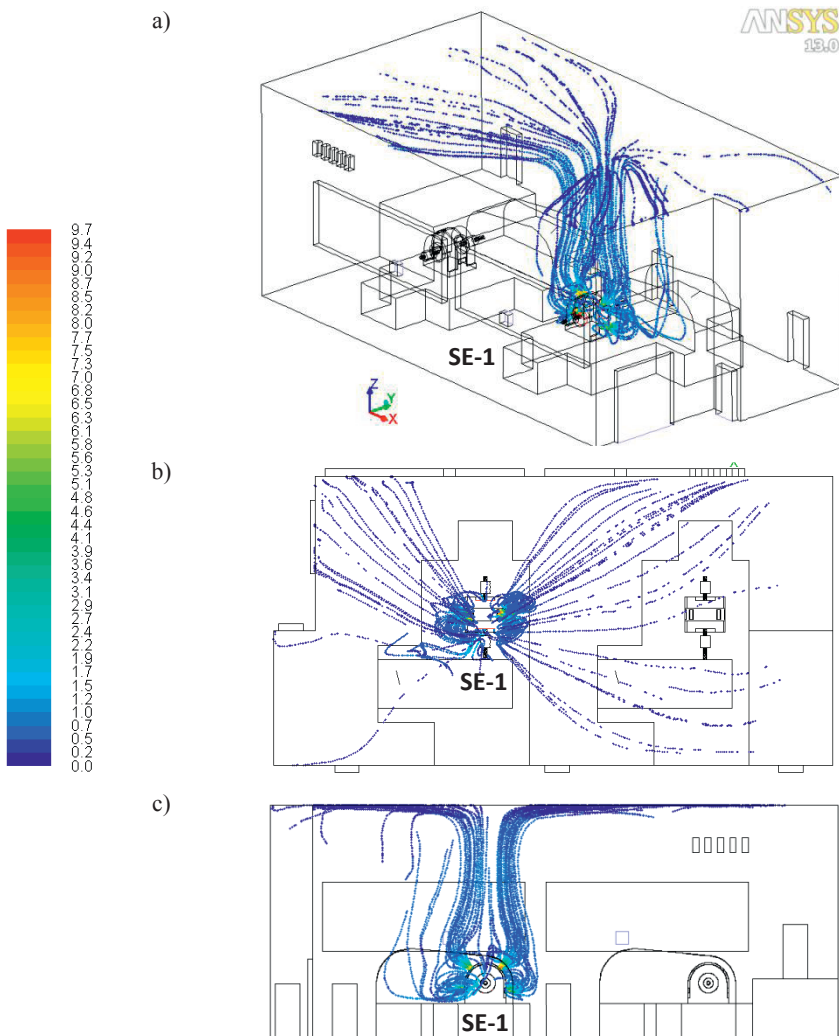


Rys. 5.24. Pole temperatury promieniowania obliczone w płaszczyźnie poziomej  $z=2\text{m}$ ,  $T_{zew}=0^\circ\text{C}$ : a) pracuje jeden silnik SE-1, b) pracują dwa silniki



Rys. 5.25. Wpływ pracy silników na rozkład temperatury na powierzchniach przegród i urządzeń,  $T_{zew}=0^\circ\text{C}$ : a) pracuje jeden silnik (SE-1), b) pracują dwa silniki

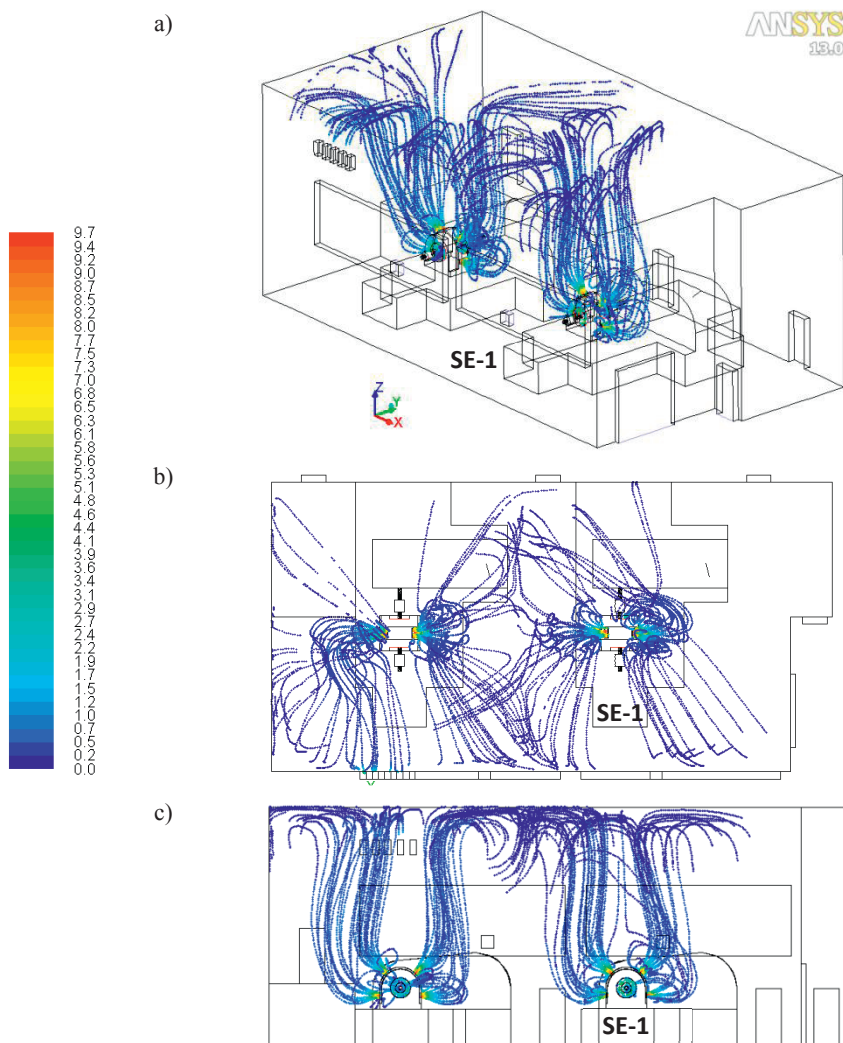




**Rys. 5.28.** Trajektorie ruchu cząstek powietrza: a) widok izometryczny, b) płaszczyzna pozioma  $z=2\text{m}$ , c) płaszczyzna pionowa  $y=6\text{m}$ ; pracuje jeden silnik (SE-1),  $T_{zew}=0^\circ\text{C}$ , skala kolorów odpowiada prędkości wyrażonej m/s

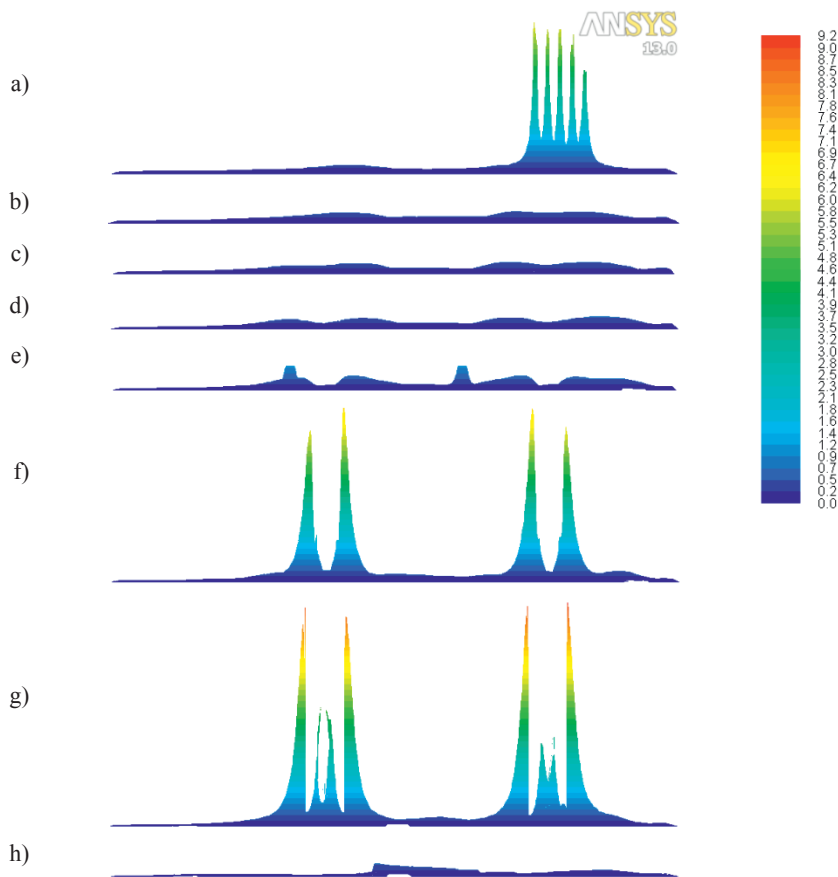
Obliczeniowy rozkład temperatury promieniowania pozwala obserwować wymianę ciepła pomiędzy ciałami o różnych temperaturach (rys. 5.24). Temperatura promieniowania to parametr charakteryzujący całkowitą energię niesioną przez promieniowanie termiczne ciał otaczających rozpatrywaną przestrzeń oraz występującą pomiędzy tymi powierzchniami wzajemną konfigurację kątową. Dzięki temu uzyskuje się informację w dowolnym punkcie rozpatrywanej przestrzeni o występujących z tego tytułu zagrożeniach. Lokalne podwyższenie temperatury promieniowania może spowodować, że znajdujące się w pobliżu ele-

menty techniczne (typu: łożyska, izolacja uzwojeń, izolacja kabli, elektronika itp.) są narażone na dodatkowe uciążliwości. Sposobem na ochronę przed negatywnym działaniem promieniowania cieplnego jest stosowanie ekranów. W analizowanej hali przemysłowej właściwe wydaje się zastosowanie ochrony ekranowej łożysk i sprzęgła pomiędzy silnikiem napędowym a współpracującą z nim przekładnią mechaniczną w zespole napędowym numer 2.



**Rys. 5.29.** Trajektorie ruchu cząstek powietrza: a) widok izometryczny, b) płaszczyzna pozioma  $z=2\text{m}$ , c) płaszczyzna pionowa  $y=6\text{m}$ ; pracują dwa silniki,  $T_{zew}=0^{\circ}\text{C}$ , skala kolorów odpowiada prędkości wyrażonej m/s

W wyniku wymiany ciepła pomiędzy wszystkimi ośrodkami biorącymi w niej udział na drodze przenikania, promieniowania i konwekcji ustala się rozkład temperatury na powierzchniach ciał stałych (rys. 5.25). Obraz ten pokazuje miejsca najbardziej zagrożone występowaniem zbyt wysokiej lub zbyt niskiej temperatury. Pozwala ponadto lepiej zrozumieć charakter przebiegu zjawisk ciepłno-przepływowych.

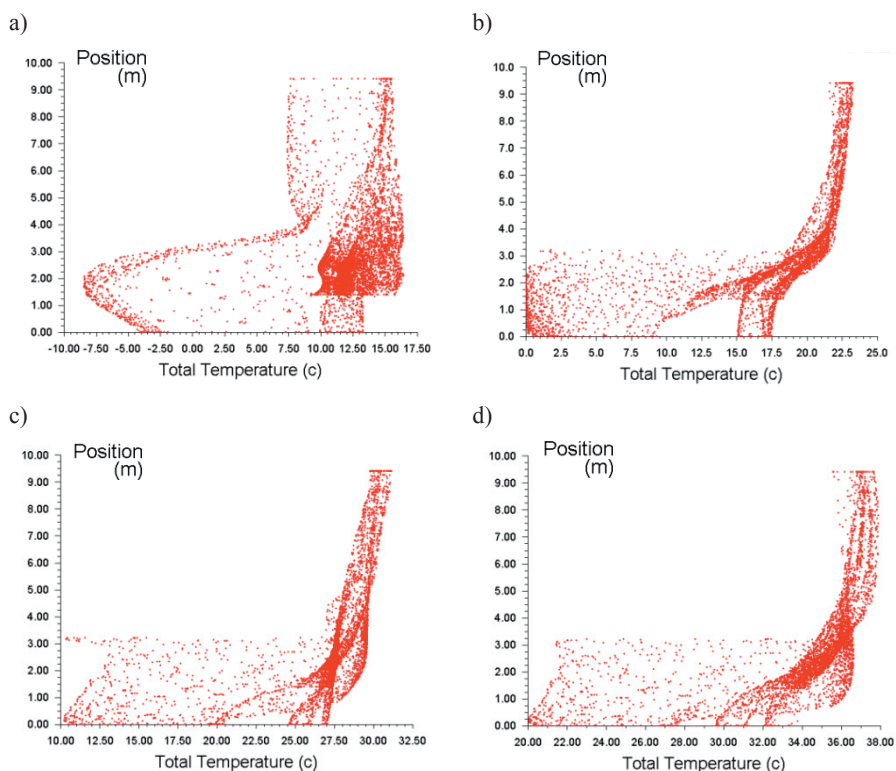


**Rys. 5.30.** Gęstość rozkładu pól prędkości obliczona w płaszczyznach poziomych: a)  $z=8\text{m}$ , b)  $z=7\text{m}$ , c)  $z=6\text{m}$ , d)  $z=5\text{m}$ , e)  $z=4\text{m}$ , f)  $z=3\text{m}$ , g)  $z=2\text{m}$ , h)  $z=1\text{m}$

Sposób przemieszczania się mas powietrza wskazuje na kierunki rozprzestrzeniania się w pomieszczeniu zanieczyszczeń (rys. 5.26÷5.29). Śledząc wektory prędkości oraz trajektorie poruszających się cząstek powietrza, można określić miejsca, w których powinny się znajdować kratki wentylacyjne z systemem podczyszczania powietrza. Dzięki zastosowaniu takich układów można by znacznie poprawić mikroklimat pomieszczenia, poprawiając jednocześnie warunki eksploatacji silników elektrycznych.

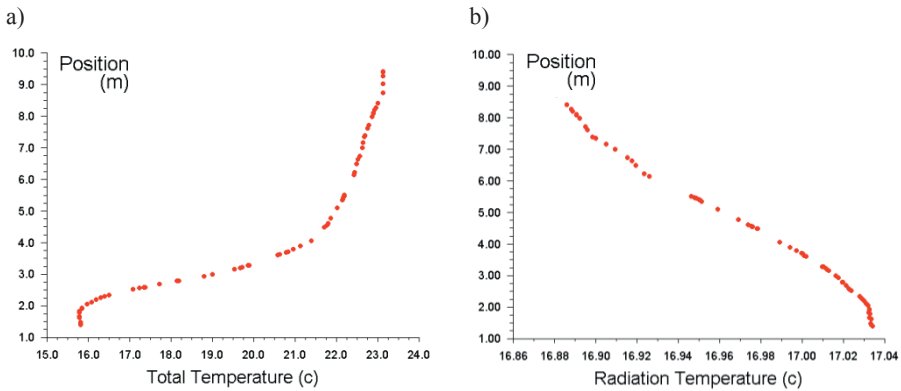
Z uzyskanych na drodze obliczeń symulacyjnych rozkładów prędkości powietrza oraz trajektorii ruchu cząstek zanieczyszczonego powietrza wynika, że lokalizacja kratki wentylacyjnych oraz sposób przyjętej organizacji wentylacji w pomieszczeniu nie zapewnia transportu zanieczyszczeń stałych poza pomieszczenie. Zbyt mała prędkość nawiewu powietrza przez kratki nawiewne również nie pozwala zapewnić sprawnego transportu czystego oraz chłodnego powietrza w strefę działania systemu chłodzenia silników elektrycznych (rys. 5.28÷5.30).

Uzupełnieniem wiedzy o badanym pomieszczeniu są pionowe rozkłady temperatur powietrza. Wynika z nich między innymi w jaki sposób przebieg kształtujących się zjawisk ciepłno-przepływowych wpływa na powstającą w pomieszczeniu nierównomierność rozkładu temperatury powietrza i temperatury promieniowania. Informuje ponadto w jaki sposób kształtowana jest gęstość zmian badanych wielkości. Z badań wynika ponadto, że przebieg rozkładu temperatur powietrza i temperatur promieniowania obliczonych, w tym samym miejscu badanego pomieszczenia, może mieć zupełnie odmienny charakter (rys. 5.32). Przebiegi te świadczą o złożoności analizowanych zjawisk.



**Rys. 5.31.** Pionowy rozkład temperatury obliczony w płaszczyźnie pionowej  $y=4\text{m}$ :  
a)  $T_{zew}=-10^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{zew}=0^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{zew}=10^{\circ}\text{C}$ , d)  $T_{zew}=20^{\circ}\text{C}$





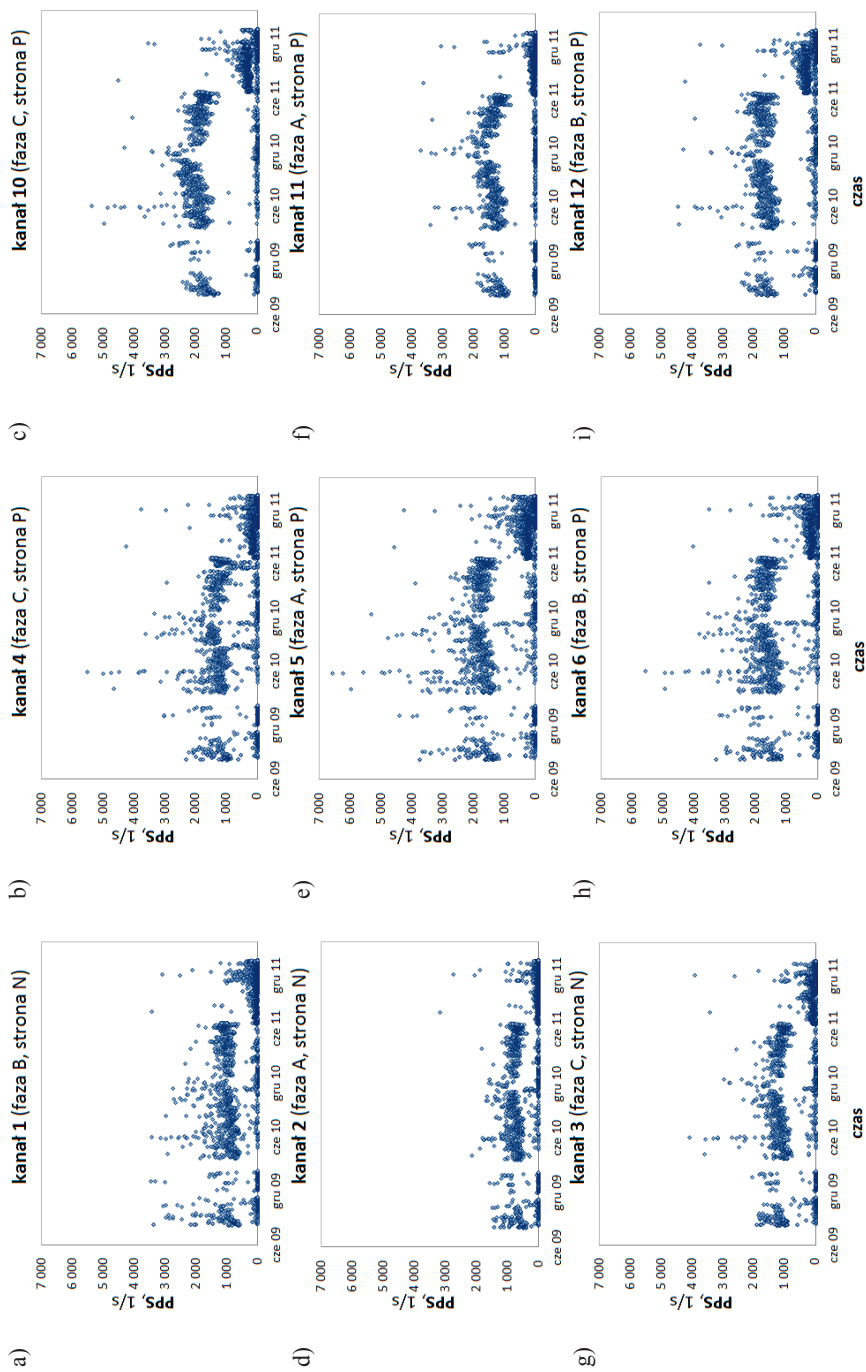
**Rys. 5.32.** Przykładowy pionowy rozkład: a) temperatury powietrza, b) temperatury promieniowania; przy  $T_{zew}=10^{\circ}\text{C}$ , lokalizacja linii:  $x=13\text{m}$ ,  $y=4\text{m}$ ,  $z \in <0,10\text{m}>$

### 5.3.3. Emisja wyładowań niezupełnych w silniku SE-1

Badania wykonano z wykorzystaniem opisanej w rozdziale 3 instalacji pomiarowej. Pomiary prowadzono w sposób ciągły z przerwami technologicznymi od 28 sierpnia 2009r. Początkowo pomiary rejestrowano trzy razy na dobę. Następnie zwiększono częstość pomiarów do 2 godzin a obecnie są realizowane co 1 godzinę.

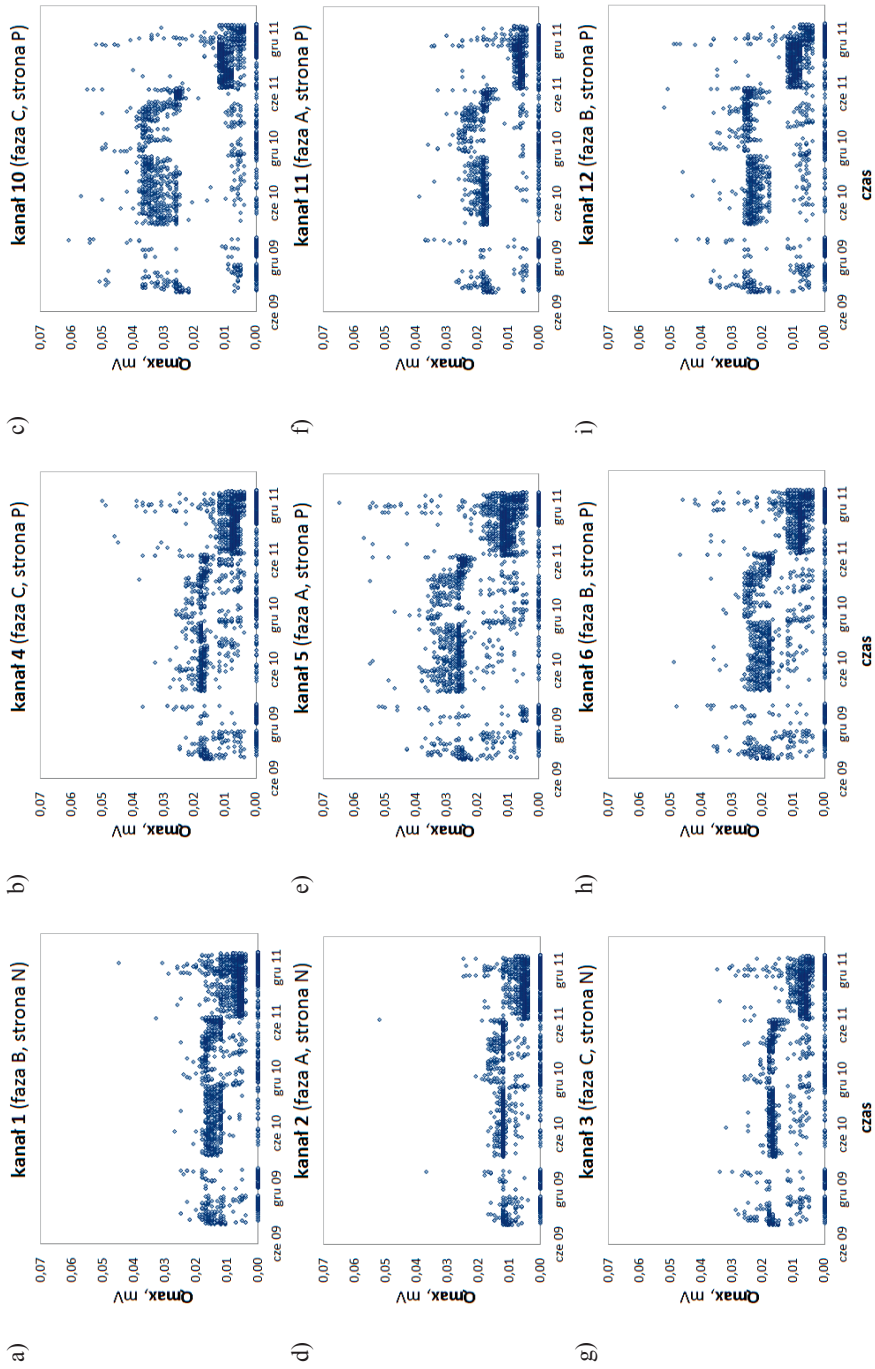
Wyniki pomiarów dla poszczególnych kanałów pomiarowych przedstawiono na rysunkach 5.33÷5.41. Ze wstępnej analizy przebiegów czasowych wynika, że ilość wyładowań, ich amplituda oraz moc są różne dla różnych kanałów pomiarowych. Świadczy to nierównomiernym zużywaniu się izolacji uzwojeń. Znacznie większe wartości wskaźników emisji *wnz* występują w uzwojeniach znajdujących się po stronie przeciw napędowej (kanały od 4 do 12). Można również dostrzec pewną tendencję do okresowych zmian badanych wielkości, które mają charakter przebiegów zbliżonych do sinusoidalnych. Najlepiej to widać na przykładzie zmian intensywności wyładowań PPS (rys. 5.33). Ilość impulsów pochodzących od wyładowań niezupełnych wyraźnie jest większa w okresach zimowych (o około 20%). W miesiącach wiosennych i letnich (maj-lipiec) występują pojedyncze impulsy wyładowań o dużo większej wartości mocy wyładowań PDI niż w pozostałych okresach (rys. 5.35beh).

Na wszystkich przebiegach zmian badanych wielkości od pewnego momentu obserwuje się zmniejszenie wartości wskaźników wyładowań niezupełnych. Wyraźna ich redukcja nastąpiła po 4 lipca 2011 roku. To od tego czasu wprowadzono procedurę systematycznego oczyszczania silnika z drobnego pyłu cementowego. Gęstość występowania wyładowań znacznie się wówczas obniżyła, lecz zaczęły się pojawiać pojedyncze impulsy o bardzo wysokich wartościach. Najwięcej impulsów o ponad standardowych wartościach zaobserwowano w zakresie amplitudy wyładowań  $Q_{max}$  podczas miesiący zimowych (5.34).

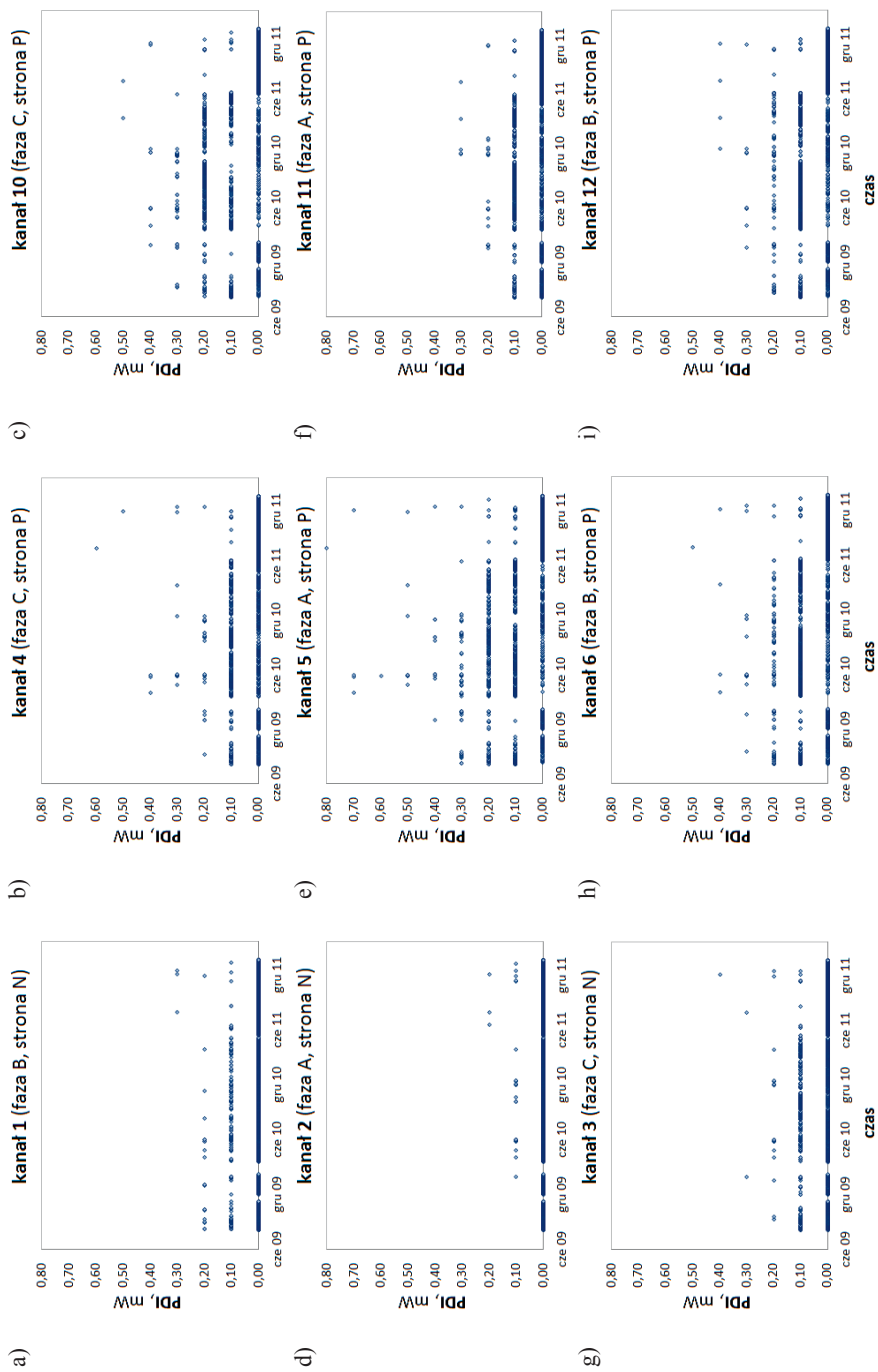


Rys. 5.33. Zmiany intensywności *wiz* (PPS) występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.

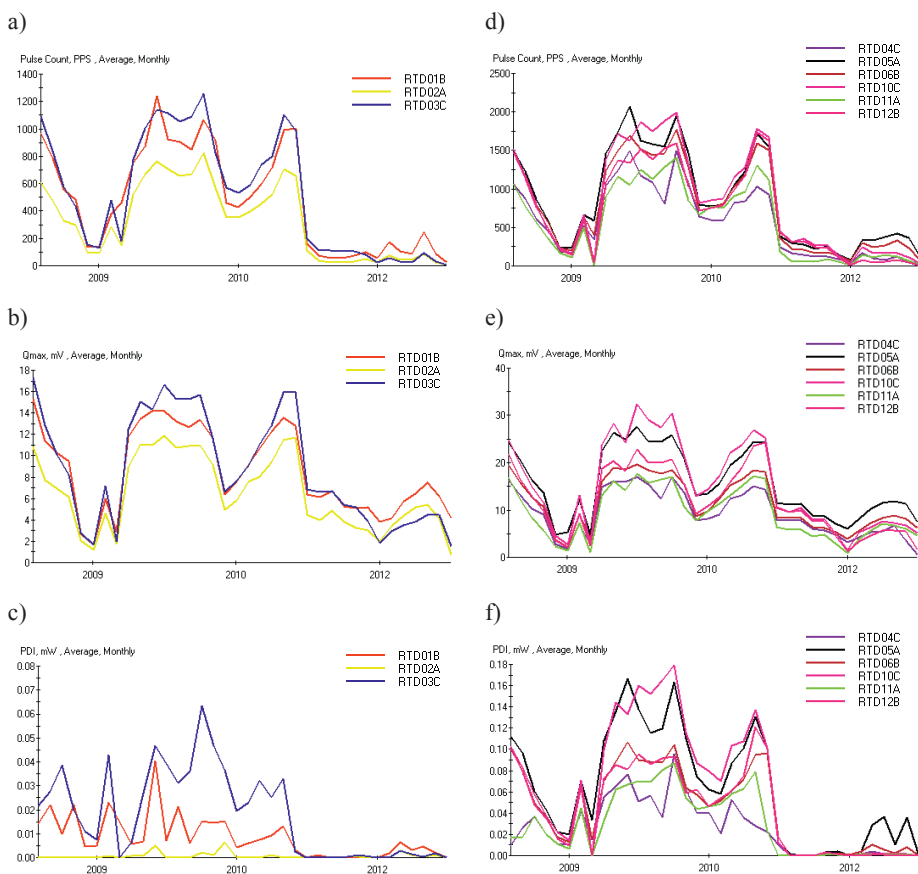




Rys. 5.34. Zmiany amplitudy  $w_{iz}$  ( $Q_{max}$ ) występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.



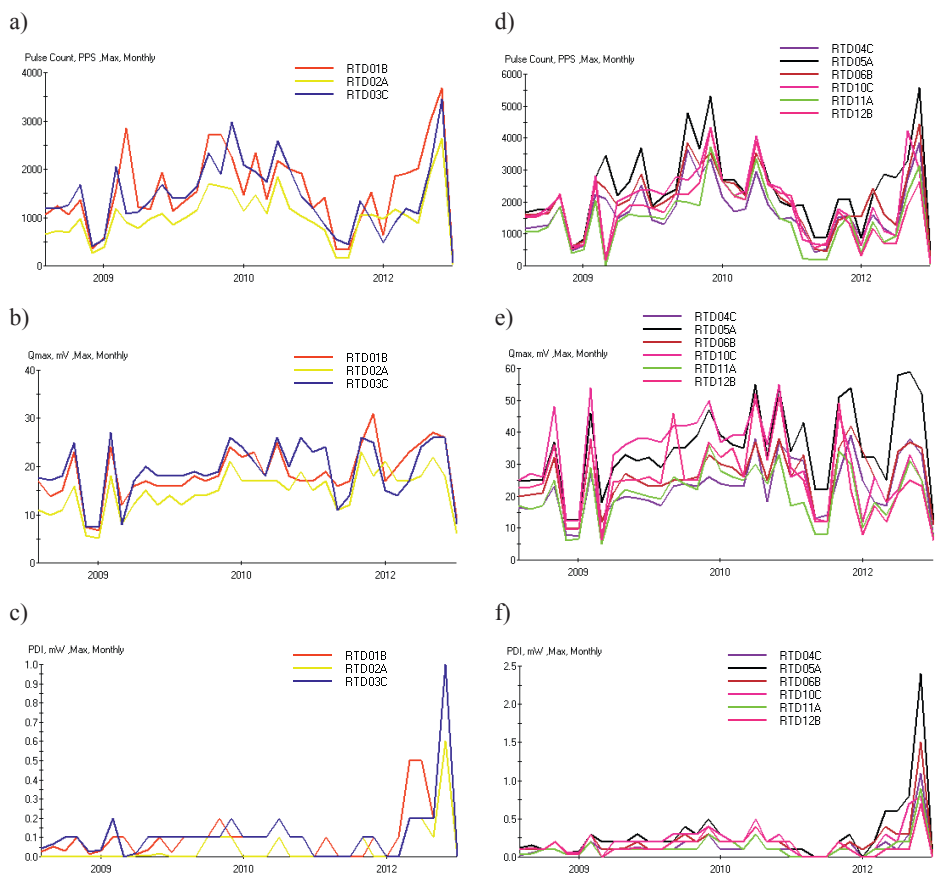
Rys. 5.35. Zmiany mocy  $w_{nz}$  (PDI) występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.



**Rys. 5.36.** Średnie miesięczne wartości emisji *wnz* zmierzone po stronie napędowej (a, b, c) i przeciw napędowej (d, e, f) badanego silnika SE-1

Średnie miesięczne wartości emisji *wnz* przedstawione na rysunku 5.36, potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia o znacznej redukcji wyładowań przy systematycznym czyszczeniu silnika. Najwyraźniej zmniejszyła się moc wyładowań opisywana wskaźnikiem PDI a następnie ilość wyładowań PPS. Najmniej spadła wartość amplitudy wyładowań  $Q_{max}$ . Ograniczenie ilości impulsów, amplitudy oraz mocy wyładowań w pierwszym okresie po wprowadzeniu czyszczenia jest bardzo wyraźne, ale od grudnia 2012r. widać powolny stopniowy wzrost wartości badanych wyładowań.

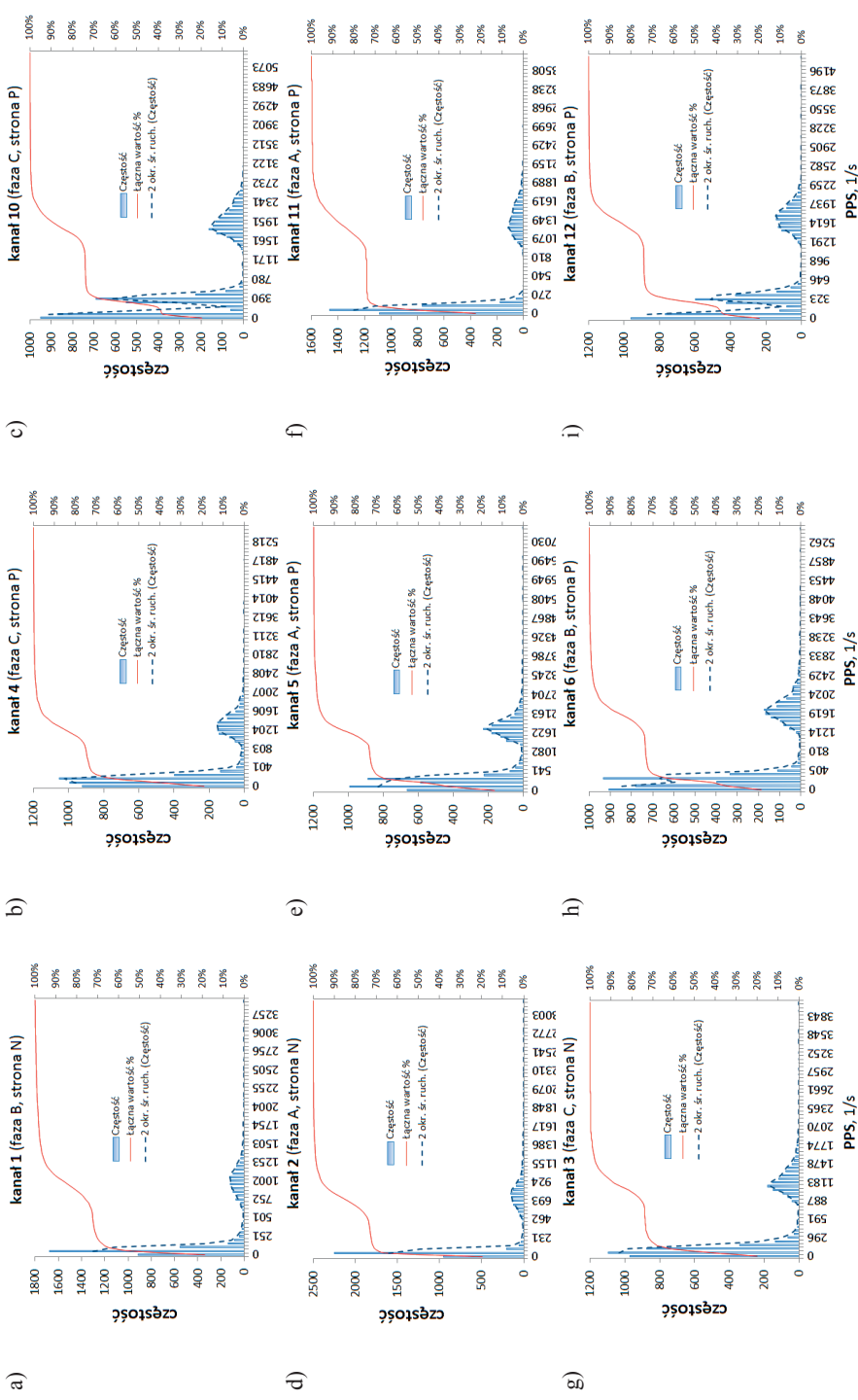
Z analizy występowania maksymalnych wartości emisji *wnz* można dojść też do nieco innych wniosków (rys. 5.37). Największe wartości wszystkich badanych wielkości występują w ostatnim okresie pomiarowym, tj. w miesiącach marzec – kwiecień 2012 r. Ich wzrost wskazuje na wzmożoną aktywność zarówno w ilości wyładowań (PPS), ale również w mocy wyładowań (PDI). W najmniejszym stopniu jest to widoczne na przebiegu amplitudy wyładowań  $Q_{max}$ .



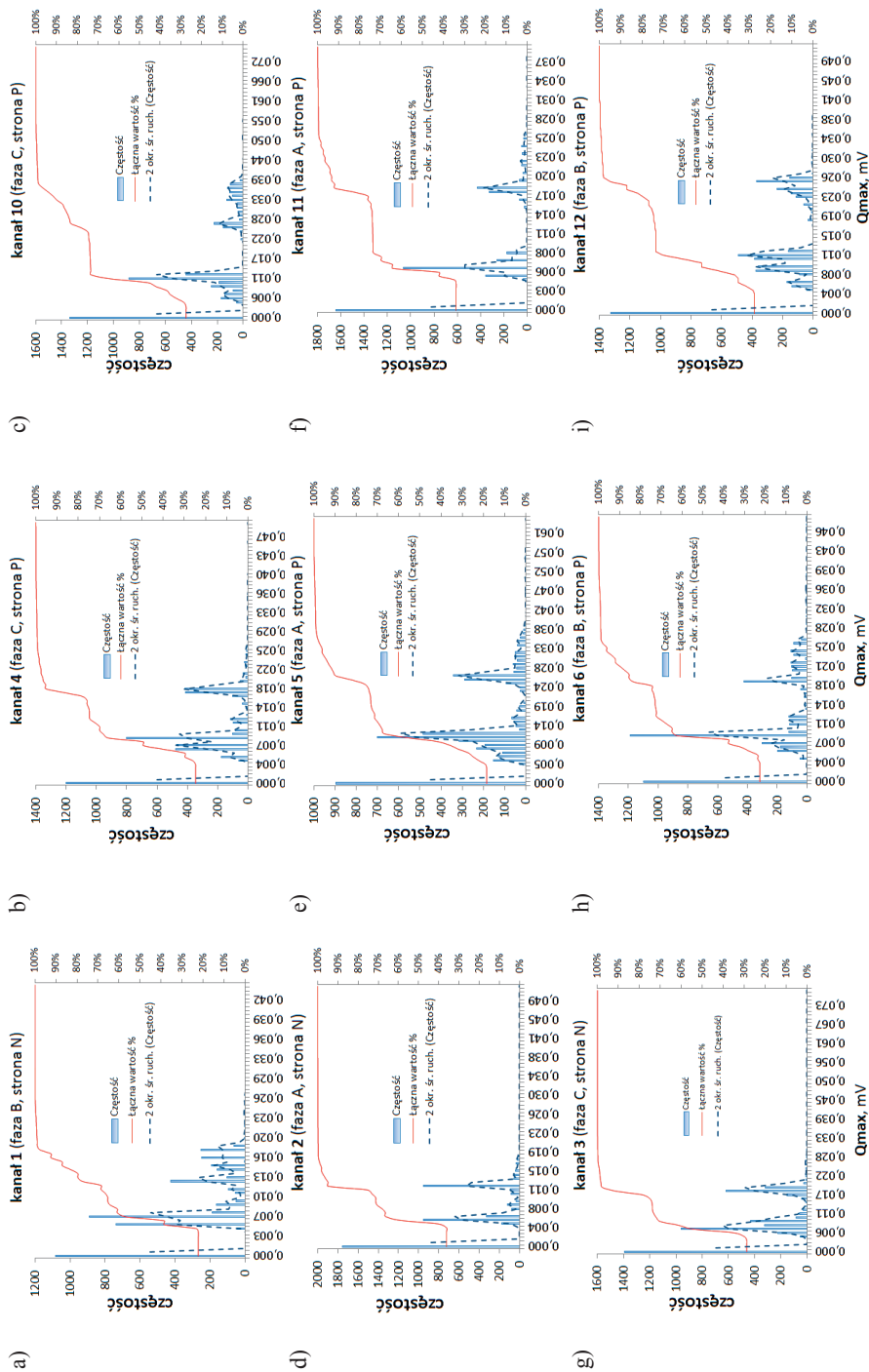
**Rys. 5.37.** Maksymalne miesięczne wartości emisji *wnz* zmierzone po stronie napędowej (a, b, c) i przeciwnapędowej (d, e, f) badanego silnika SE-1

Rozpatrywane zbiory danych pomiarowych w ujęciu statystycznym przedstawiono na rysunkach 5.38÷5.40 oraz w tabelach 4÷6 załącznika 1 do niniejszej pracy. Przedstawiają one wyniki w postaci histogramów, funkcji gęstości oraz uporządkowanych przebiegów zmienności wartości wraz z opisową charakterystyką statystyczną rozpatrywanej próby. Cechą charakterystyczną zbioru danych pomiarowych jest ich liczebność, która jest na poziomie 4 tys. dla każdej z badanych wielkości.

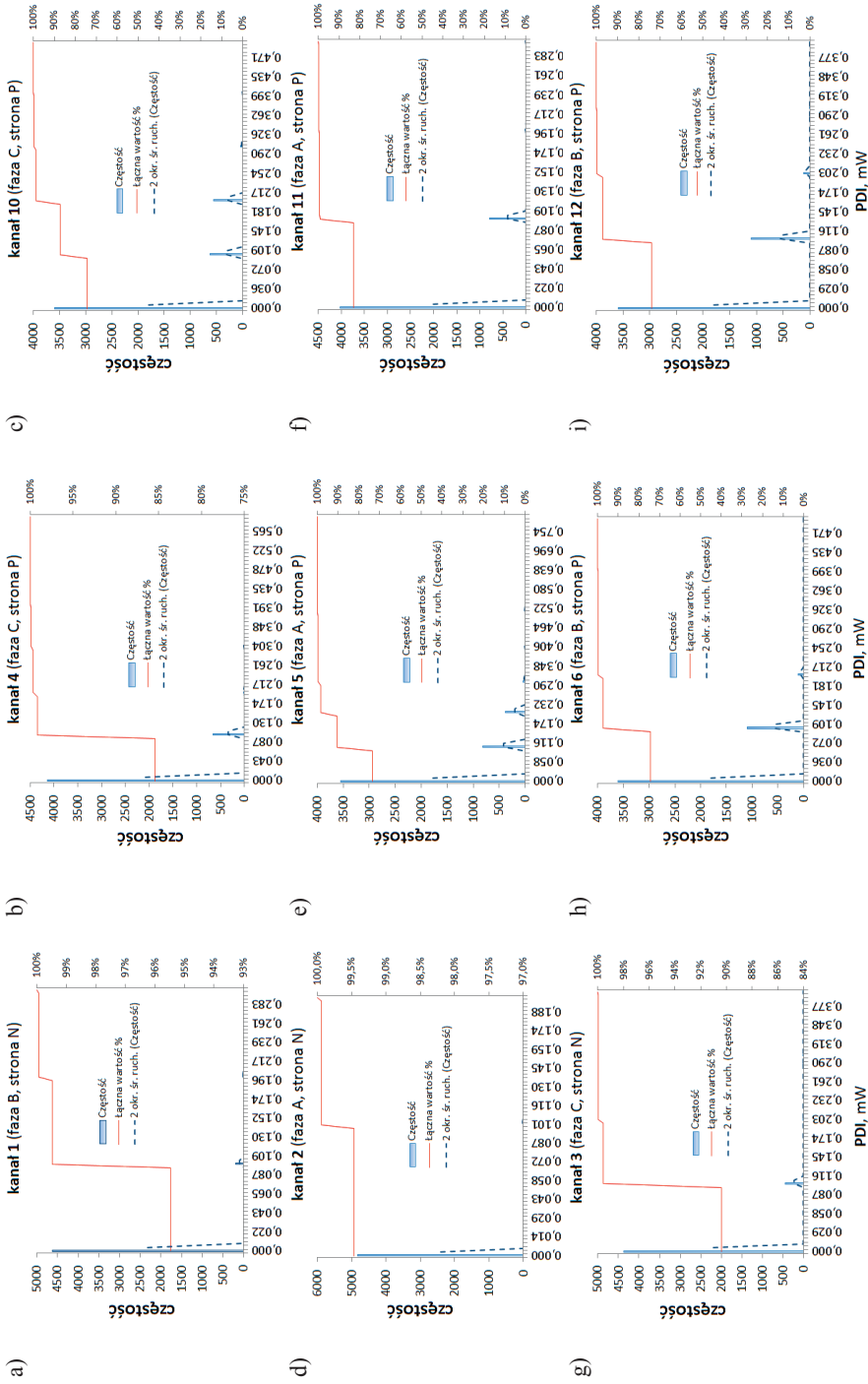
Na podstawie analizy statystycznej wskazano obszary wzmożonej aktywności emisji *wnz*. W zakresie intensywności wyładowań (PPS) są to dwa lub trzy obszary o zmiennej liczebności. Najliczniejszy obszar występowania PPS odpowiada małej aktywności *wnz* na poziomie od 0 do około 200 impulsów na sekundę. Kolejny obszar aktywności *wnz* występuje dla każdej z obserwowanych części uzwojeń w nieco innym zakresie wartości PPS. Dla uzwojeń zlokalizowanych po stronie napędowej jest to przedział 700÷1200 impulsów na sekundę, a dla strony



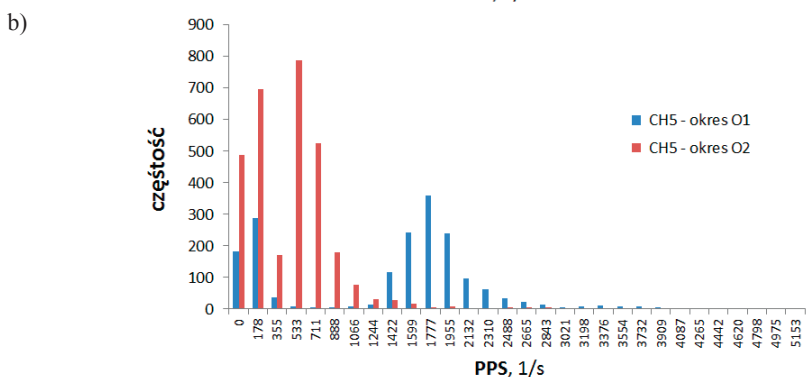
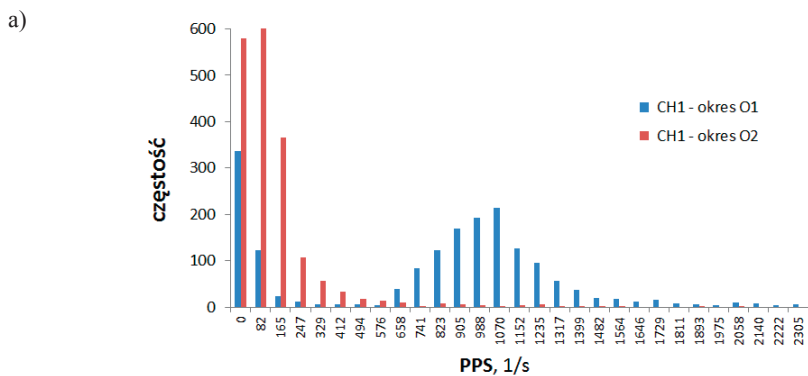
Rys. 5.38. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości PPS występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.



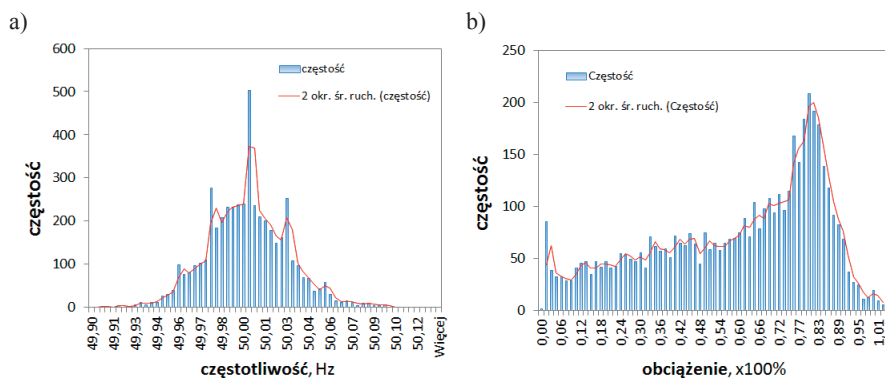
Rys. 5.39. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości  $Q_{max}$  występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.



Rys. 5.40. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości PDI występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.



Rys. 5.41. Wpływ zanieczyszczenia silnika SE-1 pyłem cementowym na emisję *wnz*, histogram występowania intensywności PPS w kanałach pomiarowych: a) 1 (CH1), b) 5 (CH5)



Rys. 5.42. Histogram i przebieg funkcji gęstości parametrów zasilającego silnika SE-1: a) częstotliwość prądu zasilającego, b) obciążenie silnika



przeciwnapędowej aktywność ta występuje w zróżnicowanym zakresie PPS. Biorąc jednak pod uwagę zaobserwowany już wcześniej istotny wpływ zanieczyszczenia silnika na wielkość emisji *wnz*, wykresy te należy analizować oddzielnie dla każdego z tych okresów. Na rysunku 5.41 przedstawiono porównanie gęstości występowania wskaźnika PPS wyznaczonego dla okresu przed czyszczeniem silnika (O1) oraz dla okresu, w którym silnik był już systematycznie oczyszczany (O2). Z porównania tych histogramów wynika, że na pierwszy obszar aktywności *wnz* składają się zarówno wyładowania występujące w okresie O1, jak i O2, przy czym o szerokości tego obszaru decydują wyładowania występujące w okresie drugim (O2). Drugi obszar występowania *wnz* to już tylko wyładowania występujące w okresie O1.

Podobnie należy analizować histogramy i funkcje gęstości występowania wskaźników  $Q_{\max}$  i PDI (rys. 5.39 i 5.40). W zakresie amplitudy  $Q_{\max}$  są również wyraźnie widoczne dwa obszary aktywności *wnz* (rys. 5.39). Pierwszy od prawej odpowiada warunkom pracy silnika bez czyszczenia (O1), drugi – przy systematycznym oczyszczaniu (O2).

Na przebieg funkcji gęstości wskaźników PPS,  $Q_{\max}$  i PDI mają również wpływ uwarunkowania wynikające z układu technologicznego, w jakim pracuje badany silnik. Praca silnika jako napędu młyna cementu charakteryzuje się dużą zmiennością obciążenia (rys. 5.42b). Jest to spowodowane między innymi zmiennością stopnia wypełnienia młyna surowcem, ale również okresową pracą układu, która jest związana z kolei z cyklem napełniania, pracy właściwej oraz opróżniania młyna z cementu. Warunki elektrycznego zasilania silnika w badanym okresie były zdaniem autora poprawne (rys. 5.42a). W całym okresie badań doszło zaledwie do kilku chwilowych zaników napięcia, które nie miały większego wpływu na pomiar wartości emisji *wnz*.

#### **5.3.4. Ważniejsze wnioski wynikające z prezentowanych wyników badań**

Biorąc pod uwagę wyżej przedstawione uwarunkowania związane ze zmiennymi warunkami pracy badanego silnika, zmieniającymi się w szerokim zakresie warunkami mikroklimatycznymi oraz osiąganą skutecznością działania systemu chłodzenia, należy uznać, że:

- Badany silnik SE-1 cechuje dobrze zaprojektowany i wykonany system przewietrzania. Jediną stwierdzoną wadą układu jest niezapewnienie równomiernego chłodzenia strony napędowej i przeciwnapędowej silnika. Zdaniem autora przyczyną jednak nie jest wada projektowa ani wykonawcza, a jedynie źle zlokalizowana osłona BHP wokół wirującej części wału po stronie przeciwnapędowej. Ponadto pole przekroju poprzecznego jednego z kanałów wywiewnych zostało poważnie zmniejszone (o ponad połowę) poprzez montaż elektrycznych przewodów zasilających wraz z układem montażowym. Wnioski te zostały przekazane służbom technicznym odpowiedzialnym za nadzór i eksploatację badanego silnika. Z uzyskanych zapewnień wynika, że zostaną one w najbliższej przyszłości uwzględnione.

- Straty energii w silniku w małym stopniu zależą od zmieniających się warunków mikroklimatycznych. W dokumentacji techniczno-ruchowej badanego silnika brak jest informacji o deklarowanej przez producenta sprawności całkowitej. Z analizy skuteczności działania układu chłodzenia wynika, że straty związane z przekazywaniem do otoczenia ciepła na drodze konwekcji powodują, że silnik osiągałby sprawność na poziomie  $96\div 96,5\%$ . Gdy jednak uwzględni się dodatkowy strumień ciepła przekazywany przez silnik na drodze przenikania ciepła przez obudowę oraz promieniowanie, szacowana sprawność silnika spada do zakresu  $94\div 94,5\%$  (przy obciążeniu  $70\div 100\%$ ).
- Sposób pracy silnika jest warunkowany pracą układu technologicznego w jakim pracuje, a który cechuje duża zmienność obciążenia przy zachowaniu stałej prędkości obrotowej. Sytuacja ta ma wpływ na częstą zmianę termicznych warunków pracy silnika, a to prowadzi do dużej zmienności w poziomie emisji wyładowań niezupełnych. Zmiana termicznych warunków chłodzenia silnika powoduje zmianę rozmiarów szczelin wewnątrz uzwojeń stojana. Wraz ze wzrostem temperatury rozszerza się miedź i materiał izolacyjny, powodując zmniejszanie się objętości wtrącin gazowych i rozwarstwień. W ten sposób powinna się zmniejszać emisja *wnz*. W badanym silniku również obserwuje się ten trend, przy czym nie jest to obserwacja na tyle wyraźna, aby na tym etapie oceny stwierdzić jednoznacznie jakościową i ilościową zależność.
- Systematyczne czyszczenie silnika skutkuje wyraźną redukcją emisji *wnz* w każdym z ocenianych obszarów oceny stanu izolacji metodą pomiaru wyładowań niezupełnych. Zmalała zarówno intensywność (PPS), amplituda ( $Q_{\max}$ ) jak i moc wyładowań (PDI). Należy jednak zauważyć, że wartości maksymalne wyładowań są teraz znacznie wyższe.

## 5.4. Warunki przemysłowej eksploatacji silnika SE-2

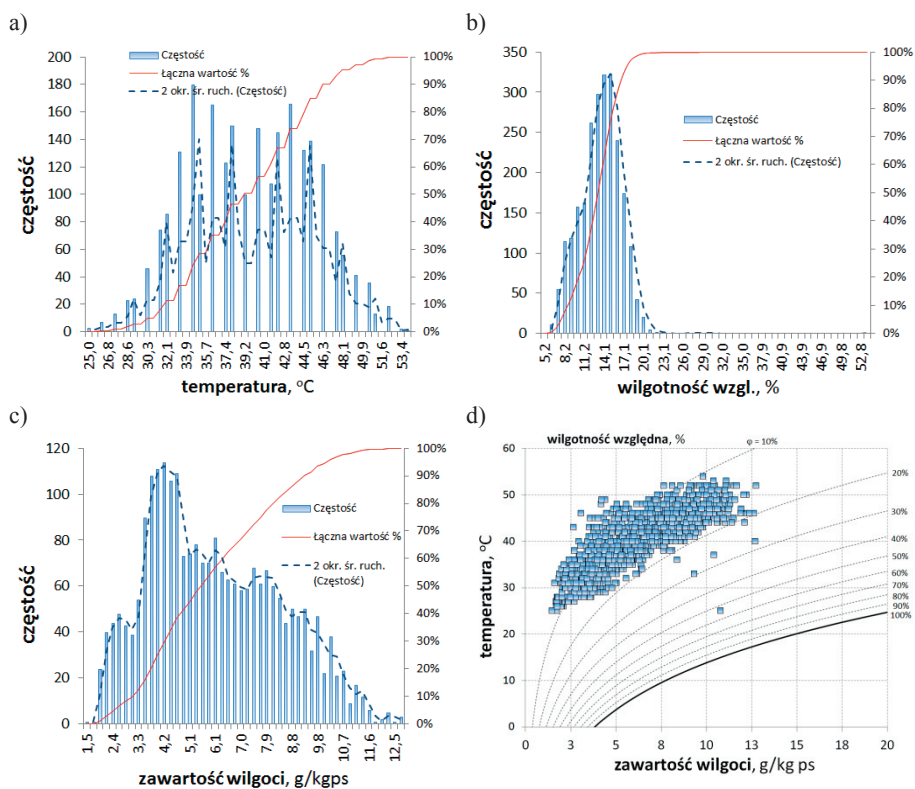
Zakres prezentowanych poniżej wyników badań w dużym stopniu ograniczono, prezentując jedynie te, które mają istotny i bezpośredni wpływ na ocenę jakościową i ilościową wybranych wielkości mikroklimatu oraz aktywności wyładowań niezupełnych badanego silnika SE-2.

### 5.4.1. Mikroklimat

Wyniki pomiaru wybranych wielkości mikroklimatu przedstawiono na rysunku 5.43. Są to histogramy oraz funkcje gęstości zmierzonej temperatury powietrza, wilgotności względnej i zawartości wilgoci w powietrzu wilgotnym (rys. 4.43a,b,c), odpowiadające warunkom eksploatacji silnika SE-2. Dodatkowo przedstawiono wykres psychometryczny, który ilustruje zakres zmian warunków mikroklimatycznych (rys. 5.43d). Opis statystyczny prezentowanych wyników przedstawiono w tabelach 4 i 5 załącznika 1.

Z analizy przedstawionych wyników pomiarowych wnioskuje się, że warunki mikroklimatyczne panujące w otoczeniu pracującego silnika SE-2 zmieniają się w dużo mniejszym zakresie niż to miało miejsce w przypadku silnika SE-1. Za główną przyczynę należy uznać fakt, iż przedmiotowy silnik pracuje w sposób ciągły oraz to, że w hali maszyn pracuje w sposób ciągły jeszcze kilka silników o zbliżonej konstrukcji i mocy.

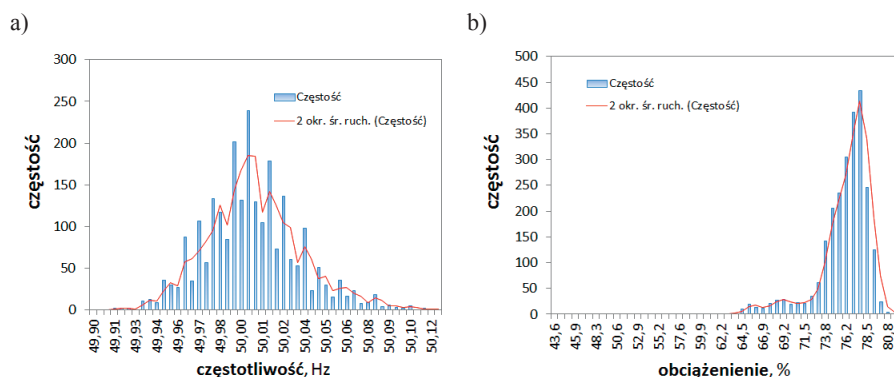
Na mały zakres zmian wilgotności względnej oraz udziału wilgoci w powietrzu wilgotnym ma wpływ lokalizacja czujników pomiarowych. Zlokalizowano je w przyłączeniowej skrzynce zasilającej silnik. Skrzynka jest natomiast wewnętrznie połączona bezpośrednio z zamkniętą przestrzenią komory silnika. Biorąc pod uwagę, że silnik jest chłodzony powietrzem w układzie zamkniętym, zmiana wilgotności powietrza w silniku jest rezultatem jedynie zjawiska dyfuzji wilgoci przez nieszczelności obudowy.



Rys. 5.43. Histogram i przebieg funkcji gęstości wybranych wielkości mikroklimatu (a, b, c) oraz wyniki pomiarów na wykresie psychrometrycznym powietrza wilgotnego (d), okres pomiarowy 29.07.2008 r. ÷ 05.01.2012 r.

### 5.4.2. Emisja *wnz* w silniku SE-2

Silnik SE-2, przez cały okres badań, tj. od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r. pracował w sposób ciągły z krótkimi przerwami na obsługę serwisową (2÷3 dni w ciągu roku), ze stałą prędkością obrotową i pod obciążeniem zmieniającym się w bardzo wąskim zakresie (rys. 5.44b). Warunki zasilania silnika przez cały okres trwania badań były prawie niezmiennie (rys. 5.44a).



**Rys. 5.44.** Histogram i przebieg funkcji gęstości parametrów zasilania silnika SE-2: a) częstotliwość prądu zasilającego, b) obciążenie silnika, okres pomiarowy 29.07.2008 r. ÷ 05.01.2012 r.

Ilustrację przedstawiającą intensywność (PPS), amplitudę ( $Q_{\max}$ ) oraz moc wyładowań (PDI) w czasie, dla każdej z faz przedstawiono na rysunku 5.45. Wszystkie prezentowane przebiegi mają kształt zbliżony do sinusoidy. Największą aktywność *wnz* obserwuje się w miesiącach zimowych, kiedy temperatura powietrza jest na poziomie 25÷30°C. Najmniejszą natomiast w miesiącach letnich, gdy temperatura powietrza osiąga 45–50°C. Sinusoidalny kształt diagramów korelacyjnych wskaźników emisji *wnz* wskazuje zatem na bezpośredni wpływ wielkości mikroklimatu na wielkość emisji wyładowań niepełnych.

W tabeli 5.5 przedstawiono miarę położenia elementów całego rozpatrywanego zbioru danych pomiarowych (ponad 2,4 tys. elementów próby). Zmienność badanych wskaźników procentowo największa jest dla mocy wyładowań PDI, a następnie dla intensywności wyładowań PPS i amplitudy  $Q_{\max}$ . Wskaźnik PDI we wszystkich fazach zmienia się w zakresie od 0 do 0,40mW. Pozostałe wskaźniki (PPS i  $Q_{\max}$ ) zmieniają się różnie w poszczególnych fazach. Największa intensywność wyładowań PPS występowała w izolacji uzwojeń fazy C (w zakresie od 239 do 3156 1/s). Również w tej izolacji, wystąpiła największa zmiana amplitudy  $Q_{\max}$  – zmiana od 0,018 do ponad 0,11mV.

W kolejnych tabelach (tab. 5.6 i 5.7) przedstawiono miarę położenia wartości pomiarowych z podziałem na dwa podokresy. Pierwszy to podokres odpowiadający łącznie wszystkim porom letnim, drugi to podokres pór zimowych. Ponadto na rysunku 5.47 przedstawiono wpływ pory roku na wzrost aktywności *wnz*, na przykładzie wskaźnika PPS. Na podstawie porównania wskaźników

aktywności *wnz* w obu podokresach, zawnioskowano o konieczności dokonania jakościowej i ilościowej analizy określającej wpływ wielkości mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych (patrz rozdział 6).

W analizowanym horyzoncie obserwacji widać, że amplituda wszystkich wskaźników oceniających emisję *wnz*, w kolejnych latach wyraźnie rośnie. Świadczy to o wzroście aktywności wyładowań oraz o postępującym procesie starzenia się izolacji uzwojeń stojana. Największy wzrost emisji wyładowań w kolejnych okresach zimowych zanotowano na izolacji przewodów fazy A i wyniósł on odpowiednio dla: PDI – 30%,  $Q_{\max}$  – 30% i PPS – 16%. Wpływ starzenia się izolacji na wzrost aktywności *wnz*, na przykładzie wskaźnika PPS, przedstawiono na rysunku 5.48. Wynika z niego jednoznacznie postępujący proces degradacji izolacji uzwojeń. Można również dokonać prognozę dalszego przebiegu degradacji izolacji, wyznaczając równanie funkcji.

**Tabela 5.5.** Charakterystyka aktywności *wnz* – cały okres badań

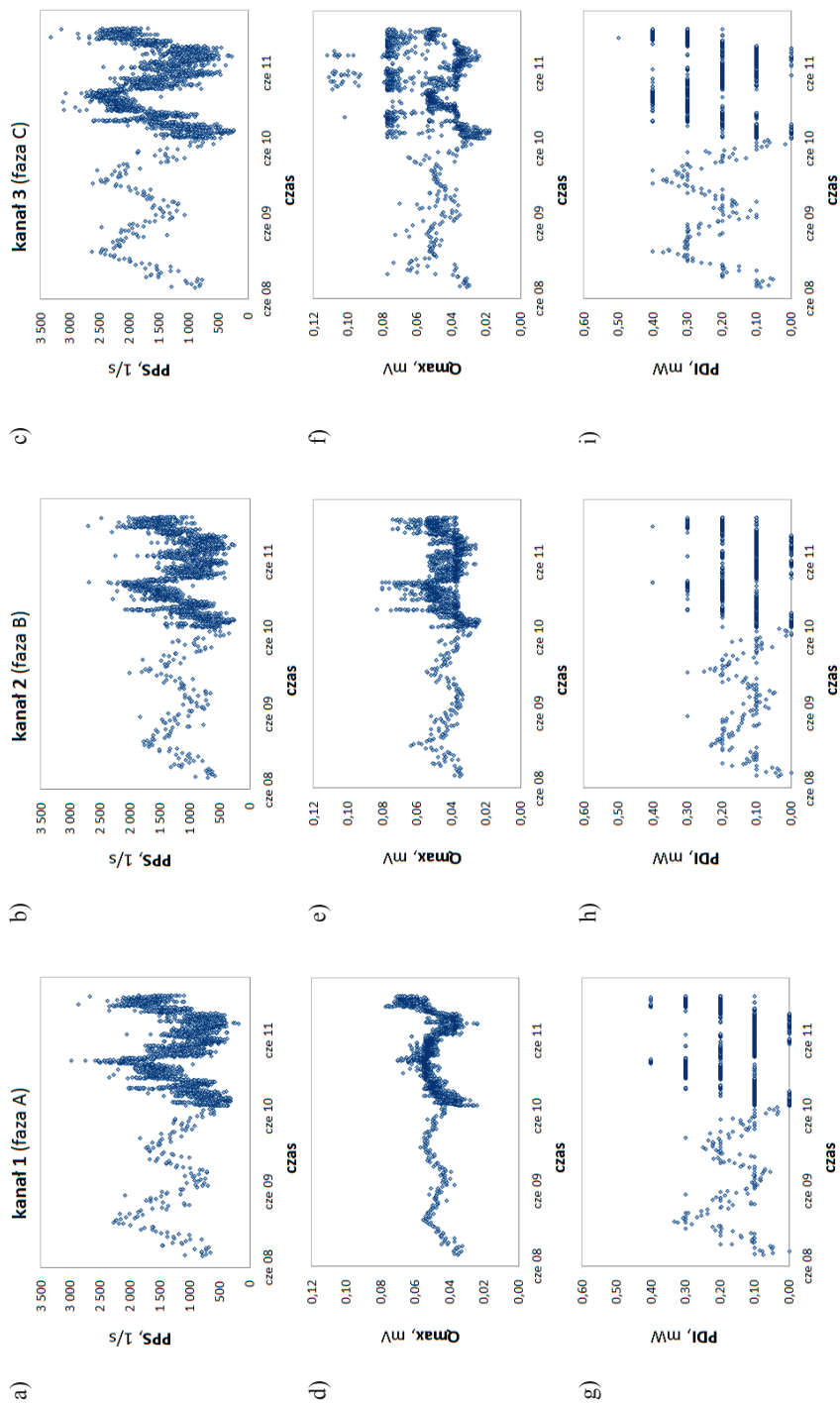
Nazwa Wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW
śr. arytm.	1 194	0,050	0,149	1 132	0,043	0,134	1 583	0,053	0,217
śr. geomet.	1 032	0,048	-	998	0,079	-	1 393	0,049	-
sr. harmon.	994	0,048	-	966	0,041	-	1 323	0,046	-
mediana	1 130	0,051	0,100	1 094	0,041	0,100	1 581	0,051	0,200
moda	1 389	0,054	0,100	1 217	0,037	0,100	1 038	0,077	0,300
minimum	193	0,024	0,000	255	0,024	0,000	239	0,018	0,000
maksimum	2 993	0,071	0,400	2687	0,080	0,400	3 156	0,112	0,400

**Tabela 5.6.** Charakterystyka aktywności *wnz* – okres letni

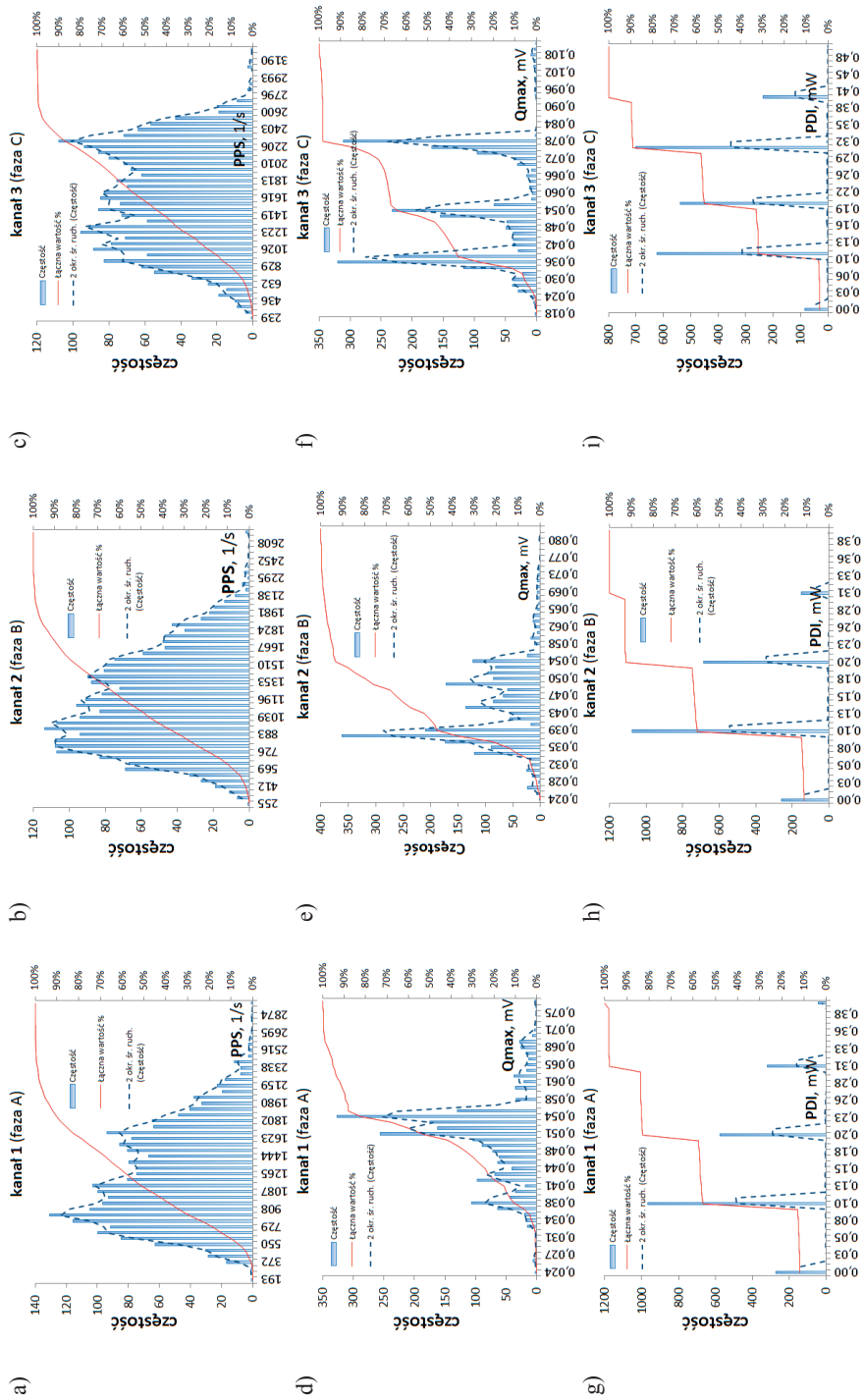
Nazwa Wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW
śr. arytm.	799	0,041	0,069	827	0,036	0,077	1051	0,041	0,114
śr. geomet.	755	0,040	-	777	0,035	-	987	0,038	-
sr. harmon.	710	0,040	-	726	0,035	-	913	0,036	-
mediana	774	0,041	0,100	785	0,036	0,100	1038	0,034	0,100
moda	871	0,037	0,100	785	0,037	0,100	992	0,034	0,100
minimum	193	0,024	0,000	255	0,024	0,000	239	0,018	0,000
maksimum	2 058	0,062	0,300	2 247	0,054	0,300	2 448	0,112	0,300

**Tabela 5.7.** Charakterystyka aktywności *wnz* – okres zimowy

Nazwa Wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW
śr. arytm.	1 704	0,056	0,246	1 571	0,051	0,210	2 237	0,053	0,331
śr. geomet.	1 669	0,056	0,235	1 539	0,050	0,201	2 219	0,052	0,326
sr. harmon.	1 632	0,055	0,223	1 502	0,049	0,186	2 198	0,052	0,321
mediana	1 671	0,054	0,218	1 556	0,050	0,200	2 247	0,052	0,300
moda	1 634	0,054	0,200	1 689	0,053	0,200	2 239	0,053	0,300
minimum	640	0,046	0,100	420	0,036	0,010	793	0,037	0,100
maksimum	2 993	0,071	0,400	2 687	0,080	0,400	3 156	0,109	0,400

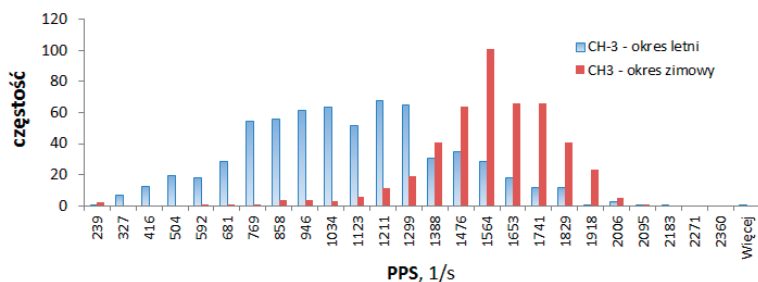


**Rys. 5.45.** Zmiany intensywności (PPS), amplitudy ( $Q_{max}$ ) i mocy  $w/wz$  (PDI) występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.

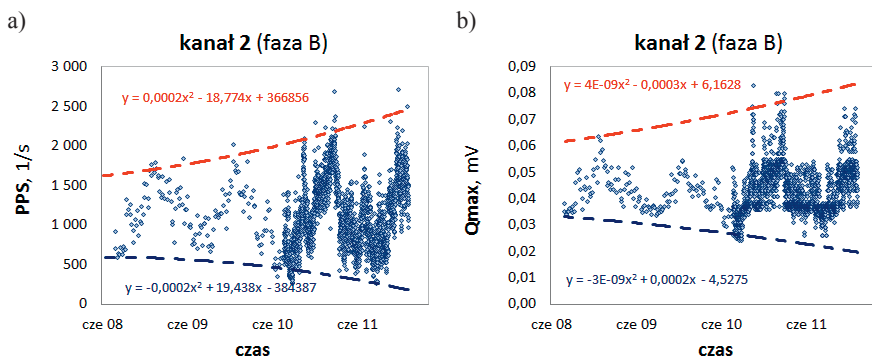


Rys. 5.46. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości wskaźników emisji *wiz* (PPS – intensywność,  $Q_{max}$  – amplituda, PDI – moc *wiz*) występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.





Rys. 5.47. Wpływ pory roku na przebieg funkcji gęstości na przykładzie intensywności  $w_{nz}$  PPS



Rys. 5.48. Wpływ procesu starzenia się izolacji na wielkość emisji  $w_{nz}$  w silniku SE-2:  
a) intensywność wyładowań PPS, b) amplituda wyładowań  $Q_{max}$ ,  
okres pomiarowy 29.07.2008 r. ÷ 05.01.2012 r.

## 5.5. Warunki przemysłowej eksploatacji generatora SE-3

Zakres prezentowanych poniżej wyników badań, podobnie jak w punkcie 5.4, został w dużym stopniu ograniczony jedynie do wyników istotnych z punktu widzenia prowadzonej analizy.

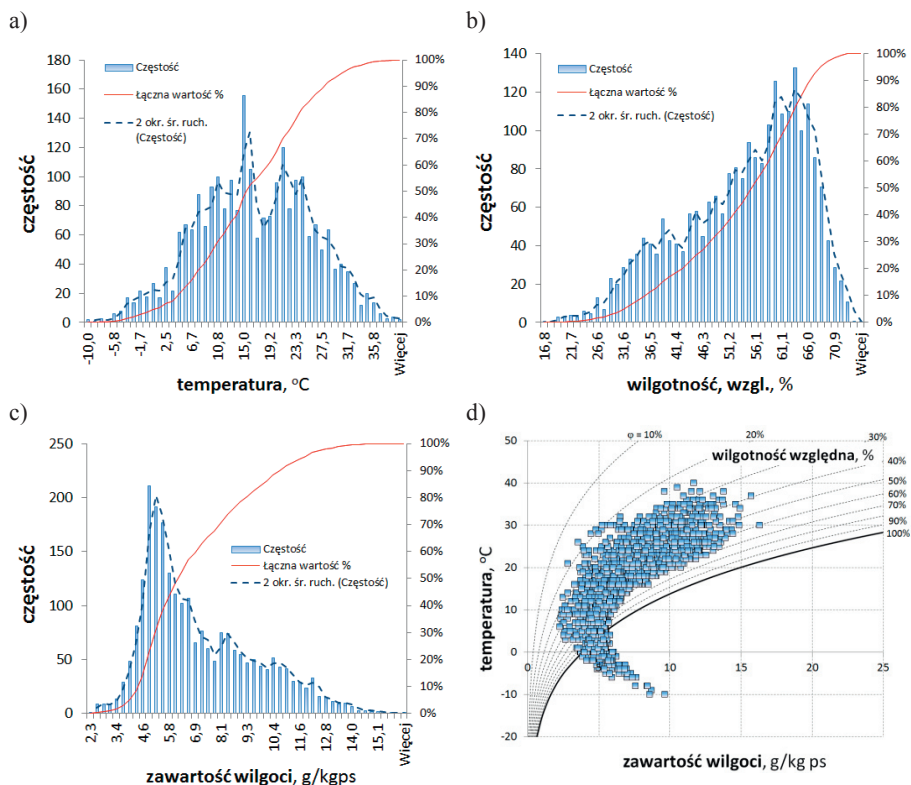
### 5.5.1. Mikroklimat

Wyniki pomiaru wybranych wielkości mikroklimatu przedstawiono na rysunku 5.47. Są to histogramy oraz funkcje gęstości zmierzonej temperatury powietrza, wilgotności względnej i zawartości wilgoci w powietrzu wilgotnym (rys. 4.47a,b,c), odpowiadające warunkom eksploatacji generatora SE-3. Dodatkowo przedstawiono wykres psychometryczny, który ilustruje zakres zmian podstawowych wielkości mikroklimat (rys. 5.47d). Opis statystyczny prezentowanych wyników przedstawiono w tabelach 7÷9 załącznika 1.

Z analizy przedstawionych wyników pomiarowych wnioskuje się, że warunki mikroklimatyczne panujące w otoczeniu pracującego generatora SE-3 zmieniają się w następującym zakresie: temperatura od  $-10$  do  $38^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta t=48^{\circ}\text{C}$ ), wilgotność względna od 15 do 75% ( $\Delta RH=60\%$ ) i udział wilgoci w powietrzu



od 2,5 do 16 g/kgps ( $\Delta X=13,5\text{g/kgps}$ ). Prezentacja parametrów środowiskowych na wykresie psychometrycznych wskazuje, że powierzchnia zewnętrzna obudowy generatora jest narażona na działanie mgły lub szadzi (rys. 5.47d).



**Rys. 5.49.** Histogram i przebieg funkcji gęstości wybranych wielkości mikroklimatu (a, b, c) oraz wyniki pomiarów na wykresie psychometrycznym powietrza wilgotnego (d), okres pomiarowy 12.07.2006 r. ÷ 05.01.2012 r.

Wartości prezentowanych parametrów jakości powietrza potwierdzają fakt, iż generator pracuje na zewnątrz budynku, czyli w środowisku klimatu wewnętrznego. Pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza realizowano przez czujniki zlokalizowane w skrzynce zaciskowej głównych przewodów elektrycznych wyprowadzających generowaną moc do sieci zewnętrznej. Skrzynka zaciskowa, mimo bliskiego sąsiedztwa generatora, stanowi odrębny element konstrukcyjny. Jej przestrzeń powietrza nie jest połączona z przestrzenią wewnętrzną badanego generatora. Skrzynka zaciskowa posiada typowe gumowe uszczelnienie drzwi oraz elastyczne dławiki na przewodach elektrycznych. Migracja wilgoci między powietrzem zewnętrznym a powietrzem znajdującym się w skrzynce zaciskowej następuje jedynie przez nieszczelności w uszczelnieniu. Jedyne zabezpieczenie generatora i skrzynki zaciskowej przed

bezpośrednim oddziaływaniem warunków atmosferycznych (śnieg, deszcz) stanowi wiata.

### 5.5.2. Emisja *wnz* w generatorze SE-3

Generator SE-3, przez cały okres badań, tj. od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r., pracował w sposób ciągły z krótkimi przerwami na obsługę serwisową (3÷4 dni w ciągu roku), ze stałą prędkością obrotową i pod obciążeniem zmieniającym się w bardzo wąskim zakresie (rys. 5.50b). Parametry produkowanej energii mierzone na zaciskach generatora były stabilne przez cały okres trwania badań (rys. 5.50a).

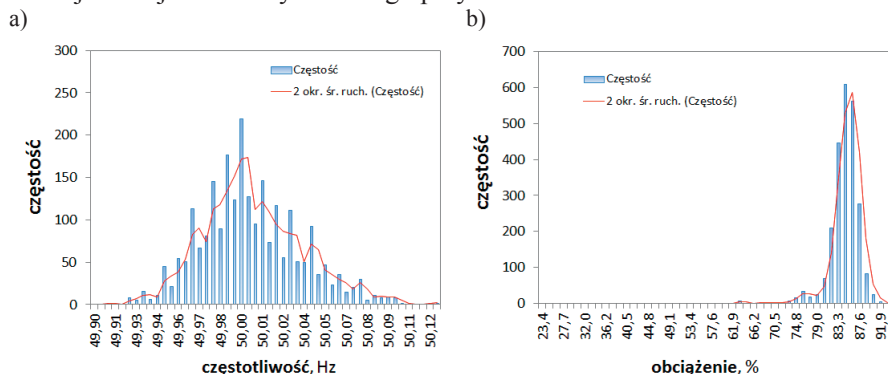
Ilustrację przedstawiającą intensywność (PPS), amplitudę ( $Q_{\max}$ ) oraz moc wyładowań (PDI) w czasie, dla każdej z faz, przedstawiono na rysunku 5.51. Wszystkie prezentowane przebiegi, podobnie jak w przypadku silnika SE-2, mają kształt zbliżony do sinusoidy. Największą aktywność *wnz* obserwuje się w miesiącach letnich, kiedy temperatura powietrza jest na poziomie 30÷35°C. Najmniejszą natomiast w miesiącach zimowych, gdy temperatura powietrza spada poniżej 5°C. Sinusoidalny kształt przebiegów przedstawionych na diagramach korelacyjnych badanych wskaźników *wnz* wskazuje na wpływ klimatu na wielkość emisji wyładowań niezupełnych. W odróżnieniu do poczynionych obserwacji dokonanych przy prezentowaniu wyników badań silnika SE-2, korelacja ma odwrotny charakter, tzn. wzrost temperatury sprzyja wzrostowi aktywności *wnz*.

W tabeli 5.8 przedstawiono miarę położenia elementów pełnego zbioru danych pomiarowych (blisko 2,4 tys. elementów próby). Zmienność badanych wskaźników, podczas całego okresu obserwacji, procentowo największa jest dla PDI,  $Q_{\max}$  i PPS. Wskaźniki aktywności *wnz* przyjmują różny poziom wartości w poszczególnych przewodach fazowych. Największy poziom emisji *wnz*, wyrażony średnimi wartościami wskaźników PPS,  $Q_{\max}$  i PDI, występuje w izolacji uzwojeń fazy C, następnie fazy A i najmniejszy jest w izolacji uzwojeń fazy B. Różnica między wartościami średnimi wskaźnika PPS dla fazy C i B jest prawie dwukrotna.

W kolejnych tabelach 5.9÷5.10 przedstawiono miarę położenia danych pomiarowych z podziałem na dwa podokresy (podobnie jak to zrobiono przy prezentowaniu wyników z badań silnika SE-2). Z porównania średnich wartości wskaźników PPS i PDI wynika, że poziom aktywności *wnz* w okresie letnim jest wyższy o 30÷38% aniżeli w okresie zimowym. Amplituda wyładowań ( $Q_{\max}$ ) w obu tych okresach nie zmienia się znacząco. Potwierdzeniem tej obserwacji jest szerokość rozkładów funkcji gęstości poszczególnych wskaźników *wnz* przedstawionych na rysunku 5.52. Ilustrację wpływu pory roku na wzrost aktywności *wnz* oraz zmianę gęstości funkcji, dla jednego z kanałów pomiarowych, przedstawiono na rysunku 5.53.

W analizowanym horyzoncie obserwacji widać, że amplituda wszystkich wskaźników oceniających emisję *wnz*, w kolejnych latach wyraźnie rośnie. Świadczy to o wzroście aktywności wyładowań oraz o postępującym procesie

starzenia się izolacji uzwojeń stojana. Wpływ starzenia się izolacji na wzrost aktywności *wnz*, na przykładzie wskaźnika PPS i PDI, przedstawiono na rysunku 5.54. Wynika z niego jednoznacznie postępujący proces degradacji stanu izolacji uzwojeń oraz szybkość tego przyrostu.



**Rys. 5.50.** Histogram i przebieg funkcji gęstości parametrów wyjściowych z generatora SE-3: a) częstotliwość generowanego prądu, b) wydajność generatora, okres pomiarowy 12.07.2006 r. ÷ 05.01.2012 r.

**Tabela 5.8.** Charakterystyka aktywności *wnz* – cały okres badań

Nazwa wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW
śr. arytm.	12 194	0,232	3,686	7 422	0,236	1,918	14 680	0,379	5,921
śr. geomet.	11 626	0,232	3,296	7 171	0,223	1,666	14 362	0,378	5,717
śr. harmon.	11 508	0,229	3,501	7 036	0,220	1,764	14 131	0,369	5,705
mediana	12 132	0,231	3,600	7 120	0,235	1,800	14 357	0,366	5,900
moda	10 352	0,232	3,500	6 543	0,243	1,800	15 973	0,352	5,700
minimum	5 730	0,078	1,100	2 334	0,071	0,500	5 387	0,075	1,400
maksimum	20 894	0,352	7,300	15 191	0,487	5,300	22 991	0,573	9,300

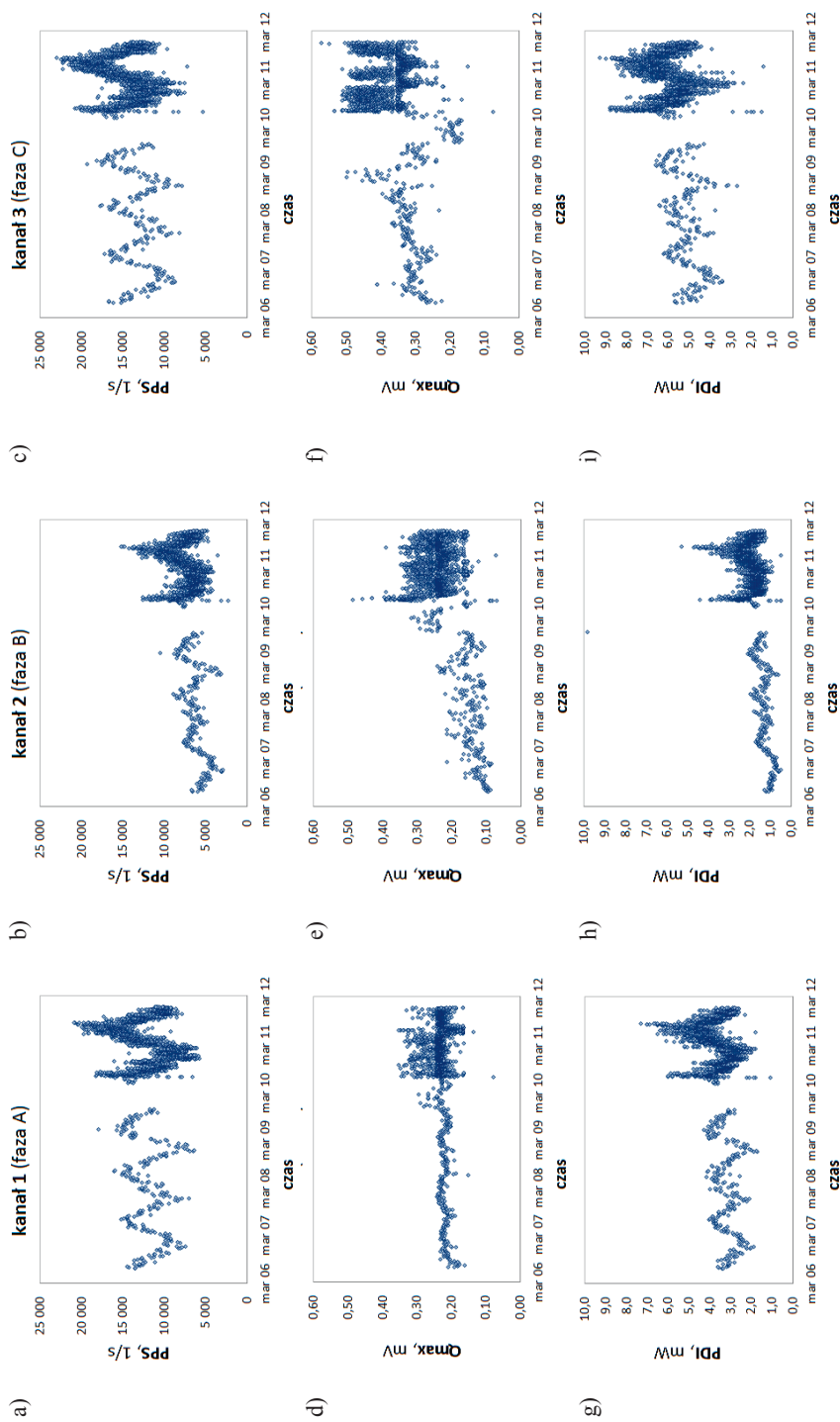
**Tabela 5.9.** Charakterystyka aktywności *wnz* – okresy letnie

Nazwa wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW
śr. arytm.	14 796	0,224	4,344	8 859	0,247	2,296	17 133	0,353	6,659
śr. geomet.	14 631	0,222	4,260	8 662	0,237	2,194	16 948	0,349	6,572
śr. harmon.	14 458	0,220	4,172	8 452	0,226	2,084	16 737	0,343	6,445
mediana	14 729	0,224	4,200	8 722	0,237	2,200	17 230	0,340	6,600
moda	13 946	0,231	4,100	7 435	0,243	2,100	15 973	0,352	6,400
minimum	6 627	0,078	1,100	2 334	0,071	0,500	5 387	0,075	1,400
maksimum	20 894	0,352	7,300	15 191	0,487	5,300	22 991	0,534	9,300

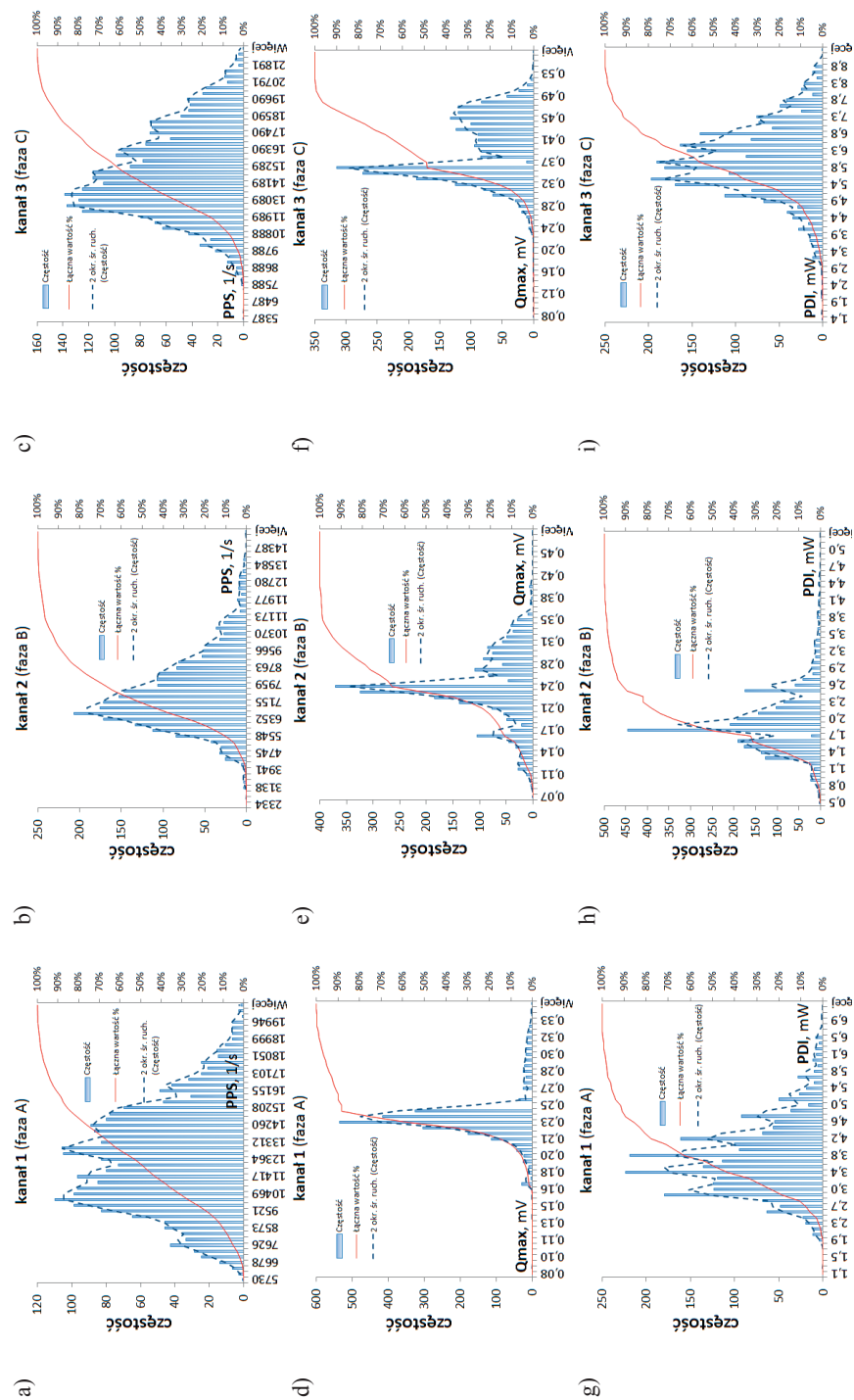
**Tabela 5.10.** Charakterystyka aktywności *wnz* – okresy zimowe

Nazwa wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{max}$ mV	PDI MW
śr. arytm.	9 219	0,235	2,909	6 125	0,229	1,634	12 254	0,369	4,890
śr. geomet.	9 090	0,234	2,867	6 032	0,222	1,584	12 124	0,364	4,814
śr. harmon.	8 964	0,233	2,826	5 931	0,214	1,525	11 990	0,359	4,732

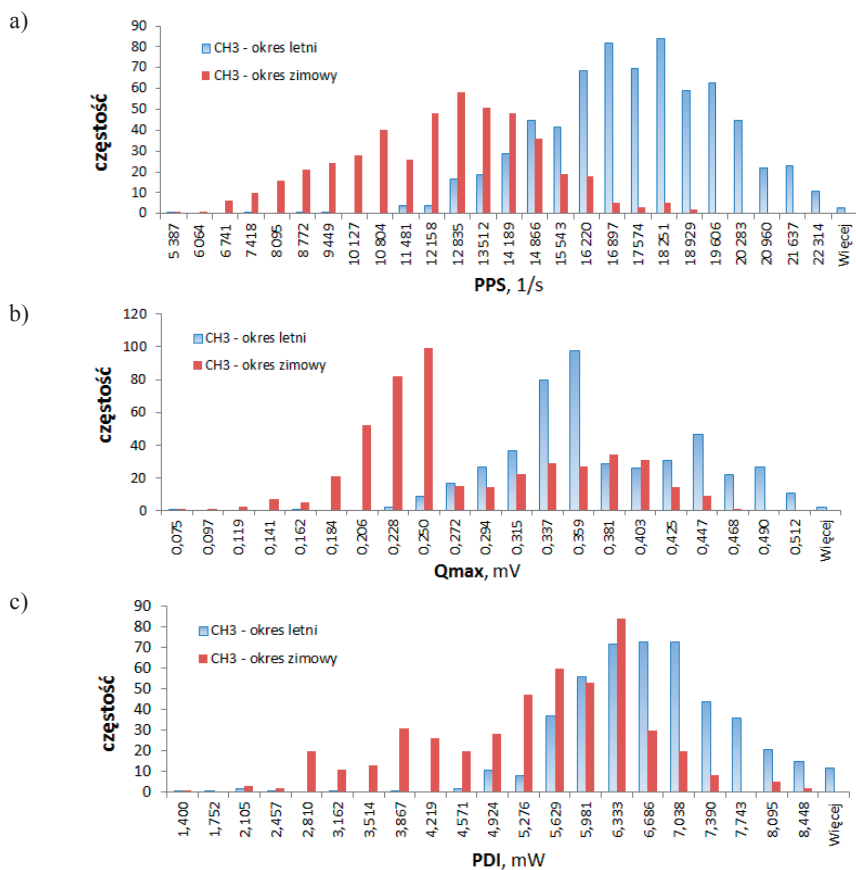
Nazwa wielkości	faza A			faza B			faza C		
	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW	PPS 1/s	$Q_{\max}$ mV	PDI MW
mediana	9 274	0,232	2,900	6 255	0,234	1,700	12 433	0,347	5,100
moda	9 636	0,232	2,900	6 543	0,240	1,800	14 718	0,352	5,500
minimum	5 901	0,165	1,700	2 910	0,085	0,500	7 599	0,218	2,400
maksimum	14 322	0,328	5,200	9 740	0,337	3,100	17 538	0,573	7,200



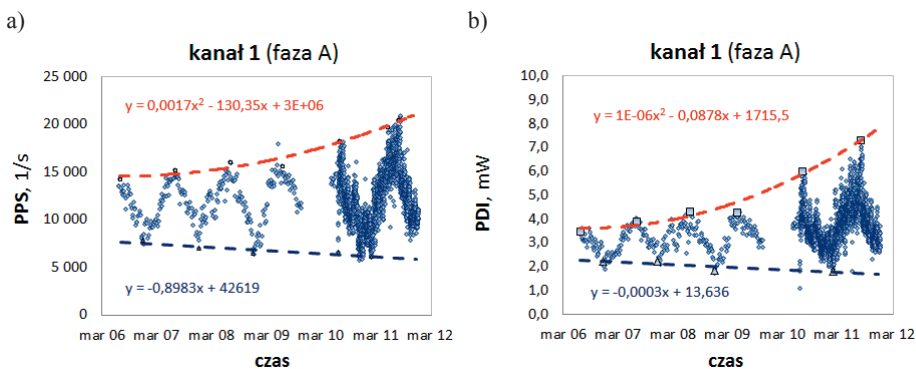
Rys. 5.51. Zmiany w czasie wartości w/wz występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.



Rys. 5.52. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.



Rys. 5.53. Wpływ pory roku na przebieg funkcji gęstości  $w_{nz}$  na przykładzie wskaźnika: a) PPS, b)  $Q_{max}$ , c) PDI; zarejestrowanych w kanale pomiarowym nr 3 (faza C)



Rys. 5.54. Wpływ procesu starzenia się izolacji na wielkość emisji  $w_{nz}$  w generatorze SE-3: a) intensywność wyładowań PPS, b) moc wyładowań PDI, okres pomiarowy 12.07.2006 r. ÷ 05.01.2012 r.

## 5.6. Podsumowanie

Przedstawione wyniki pomiaru wielkości mikroklimatu panującego w bezpośrednim otoczeniu pracujących maszyn elektrycznych wskazują na dużą zmienność zarówno temperatury powietrza, wilgotności względnej, jak również zawartości wilgoci w powietrzu, a w przypadku silnika SE-1 również zapylenia. O ile jest to zrozumiałe w przypadku generatora SE-3, który pracuje na zewnątrz budynku i który jest konstrukcyjnie przystosowany do pracy w takich warunkach, to już zmienność warunków mikroklimatycznych panujących wokół silników SE-1 i SE-2 wskazują na ograniczenia techniczne wyposażenia pomieszczeń, w których te silniki pracują. Chodzi tu głównie o brak lub złe wykorzystywanie systemów grzewczo-wentylacyjnych oraz świadomość personelu technicznego zarządzającego pracą tych urządzeń.

Silnikiem, który szczególnie jest narażony na zmienność warunków mikroklimatycznych podczas pracy jest SE-1, który pracuje okresowo w skrajnie odmiennych warunkach. Zaobserwowana zmienność temperatury powietrza w hali rzędu 50°C wskazuje, że pracuje on zarówno w temperaturze -10°C jak i 40°C. Zmianie temperatury towarzyszy duża zmienność wilgotności powietrza w zakresie od 18 do 98%. Zmiana tych warunków wynika głównie z braku urządzeń grzewczo-wentylacyjnych oraz z bardzo częstego otwierania drzwi i bram w celu przewietrzania hali. Jest to bowiem główny sposób obniżania temperatury w hali maszyn. Jak wykazały badania, brak należytych narzędzi do wpływania na warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu podczas pracy silnika, powoduje dużą niejednorodność pola temperatury i pola prędkości z jaką porusza się powietrze. Świadczy to o intensywnej konwekcji, która skutkuje niejednorodnym chłodzeniem części napędowej i przeciwnapędowej silnika. Ponadto występowanie lokalnie dużych prędkości powietrza sprzyja rozprzestrzenianiu pyłu, który sam w sobie przyczynia się do pogorszenia warunków pracy silnika SE-1. Wykazano bowiem duży wpływ zmiany zapylenia wewnątrz silnika na wielkość emisji wyładowań niezupełnych.

W pomieszczeniu pracy silnika SE-2 występują znacznie mniejsze zmiany temperatury. Sięgają one bowiem od 25 do 50°C, co przy stosunkowo małych zmianach wilgotności powietrza ( $\Delta\varphi=15\%$ ,  $\Delta X=10\text{g/kgps}$ ) czyni środowisko pracy silnika stosunkowo jednorodnym. Mimo to stwierdza się okresową zmienność aktywności *wnz* w izolacji uzwojeń w wyniku zmian warunków mikroklimatycznych.

Zmiana warunków klimatycznych wpływa również na okresową zmianę aktywności *wnz* w izolacji uzwojeń generatora SE-3. Wykazano przy tym, że izolacja generatora wykazuje zgoła odmienne właściwości w tym względzie, niż izolacja silnika SE-2. Wzrost temperatury powietrza sprzyja bowiem wzrostowi emisji *wnz*.

Na możliwość wyciągania prawidłowych wniosków ma również wpływ czas obserwacji warunków pracy maszyn zarówno w zakresie mikroklimatu jak i wielkości emisji *wnz*. W tym względzie największy obiektywizm jest zacho-



wany przy ocenie warunków pracy generatora SE-3 (historia 6-letnia), a następnie silnika SE-2 (4 lata). W przypadku silnika SE-1 dysponuje się historią 3-letnią, co przy ilości wykazanych uciążliwości i częstotliwości zmian warunków pracy silnika, mikroklimatu oraz zapylenia, analizę czyni trudną. Niemniej zakres przeprowadzonych badań pomiarowych obejmujących pomiary mikroklimatu, emisji *wnz* oraz wielkości niezbędnych do przeprowadzenia badań bilansowych, uzupełnionych wynikami badań symulacyjnych, zdaniem autora pozwala zachować należyłą staranność w ocenie uzyskanych wyników. Cenną wydaje się być szczegółowa analiza zjawisk ciepłno-przepływowych przeprowadzona w pomieszczeniach podczas pracy badanych maszyn, która dostarcza wielu informacji o obiekcie badań i pozwala lepiej zrozumieć przebieg i charakter tych zjawisk. Uwzględnienie tych uwarunkowań pozwoli na dokonanie pełniejszej analizy mającej na celu określenie wpływu wielkości mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych w badanych maszynach elektrycznych w warunkach przemysłowej ich eksploatacji.



## 6. ANALIZA WPŁYWU MIKROKLIMATU NA EMISJĘ *wnz*

Zaobserwowane tendencje zmian aktywności wyładowań niezupełnych podczas zmian warunków mikroklimatycznych skłoniły autora do przeprowadzenia szczegółowej analizy określającej wpływ poszczególnych parametrów mikroklimatu na jakościową i ilościową zmianę wielkości emisji *wnz*. Analizę przeprowadzono oddzielnie dla każdej z maszyn, określając w pierwszym etapie indywidualnie wpływ temperatury, wilgotności i udziału wilgoci w powietrzu wilgotnym na wielkość wskaźników wyładowań niezupełnych, a następnie podjęto próbę określenia łącznego wpływu wszystkich parametrów mikroklimatu na emisję *wnz*.

### 6.1. Wpływ temperatury na emisję *wnz*

#### 6.1.1. Analiza właściwości silnika SE-1

W przypadku stwierdzonej już wcześniej zmienności warunków pracy silnika SE-1, wynikającej z właściwości układu technologicznego młyna cementu, właściwe z punktu widzenia celu pracy, wydaje się analizowanie pojedynczych cykli pracy silnika. Na rysunkach 6.1÷6.3 przedstawiono przykłady zmian wielkości opisujących emisję *wnz* na tle zmieniającej się temperatury i wilgotności powietrza oraz obciążenia silnika. Poniżej przebiegów czasowych podano wykresy słupkowe ilustrujące wartości współczynników korelacji wzajemnej badanych wielkości. Współczynniki korelacji wyznaczono metodą *Pearsona*. Dla porównania wybrano pomiary wykonane w różnych porach roku (w okresie letnim, zimowym i przejściowym) i realizowane w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Podczas pracy silnika w lecie obserwuje się wyraźny związek między wzrostem temperatury a zmniejszeniem się intensywności wyładowań, amplitudy i mocy wyładowań. Świadczy o tym współczynnik *Pearsona* osiągający wartości 70÷80% dla wskaźników PPS i  $Q_{\max}$  oraz 30÷70% dla PDI wskazując na ujemną korelację między temperaturą i wskaźnikami emisji *wnz* (rys. 6.1a i 6.2a). Można również zauważyć, że po przekroczeniu temperatury 35°C trend korelacyjny się zmienia, powodując wzrost wyładowań (rys. 6.1a). Gdy temperatura w hali jest wysoka (na poziomie 43°C), ale podczas pracy silnika zmniejsza się, np. z powodu obniżania się temperatury zewnętrznej i intensywnego przewietrzania, wskaźniki emisji *wnz* wzrastają (rys. 6.2a). Współczynniki korelacji między wskaźnikami *wnz* a temperaturą ulegają zmniejszeniu do 50÷60%, ale znak ujemnej korelacji pozostaje zachowany.

Korelacja między temperaturą powietrza w hali a aktywnością *wnz* zmienia swój charakter, gdy silnik pracuje w zakresie temperatur od -10 do 25°C. Warunki takie odpowiadają niskim temperaturom zewnętrznym (w okresie zimowym).

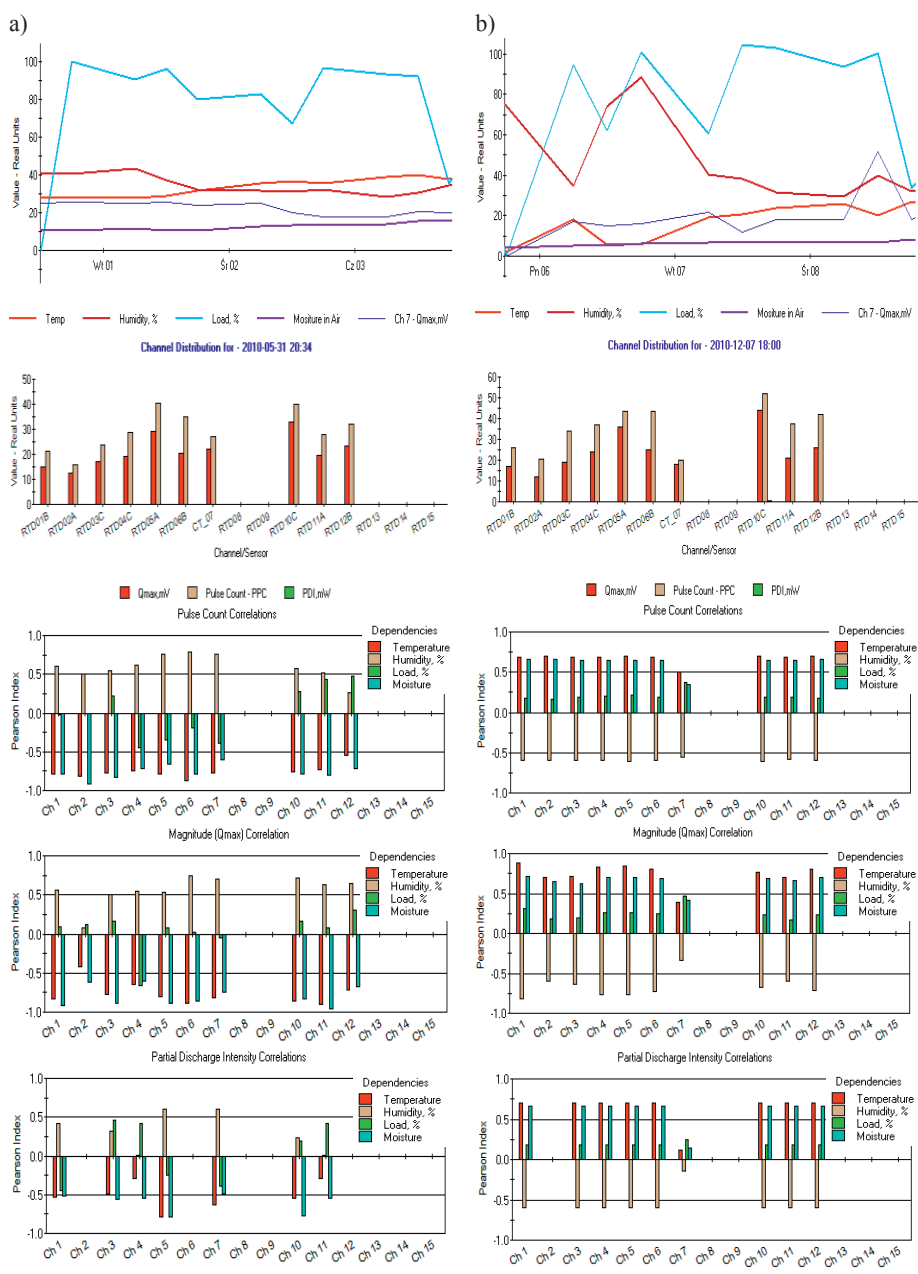
Wówczas wzrost temperatury powietrza generuje podwyższoną aktywność *wnz* (rys. 6.1b i 6.2b). Współczynniki korelacji *Pearsona* zawierają się wówczas między 65÷80% wskazując na silną korelację dodatnią. Ciekawym zjawiskiem jest obserwacja wpływu obniżenia się temperatury powietrza z 20 do 15°C, co powoduje dwukrotny wzrost amplitudy wyładowań (rys. 6.1b).

W okresach przejściowych, kiedy temperatura zewnętrzna zmienia się w szerokim zakresie, powodując również szybkie zmiany temperatury powietrza w pomieszczeniu badanego silnika, trendy korelacyjne między temperaturą a aktywnością *wnz* ulegają zmniejszeniu (rys. 6.3a). Wartości współczynników korelacji wzajemnej temperatury i wielkości emisji *wnz* są wówczas w przedziale od -0,3 do 0,3, świadcząc o braku wzajemnej zależności.

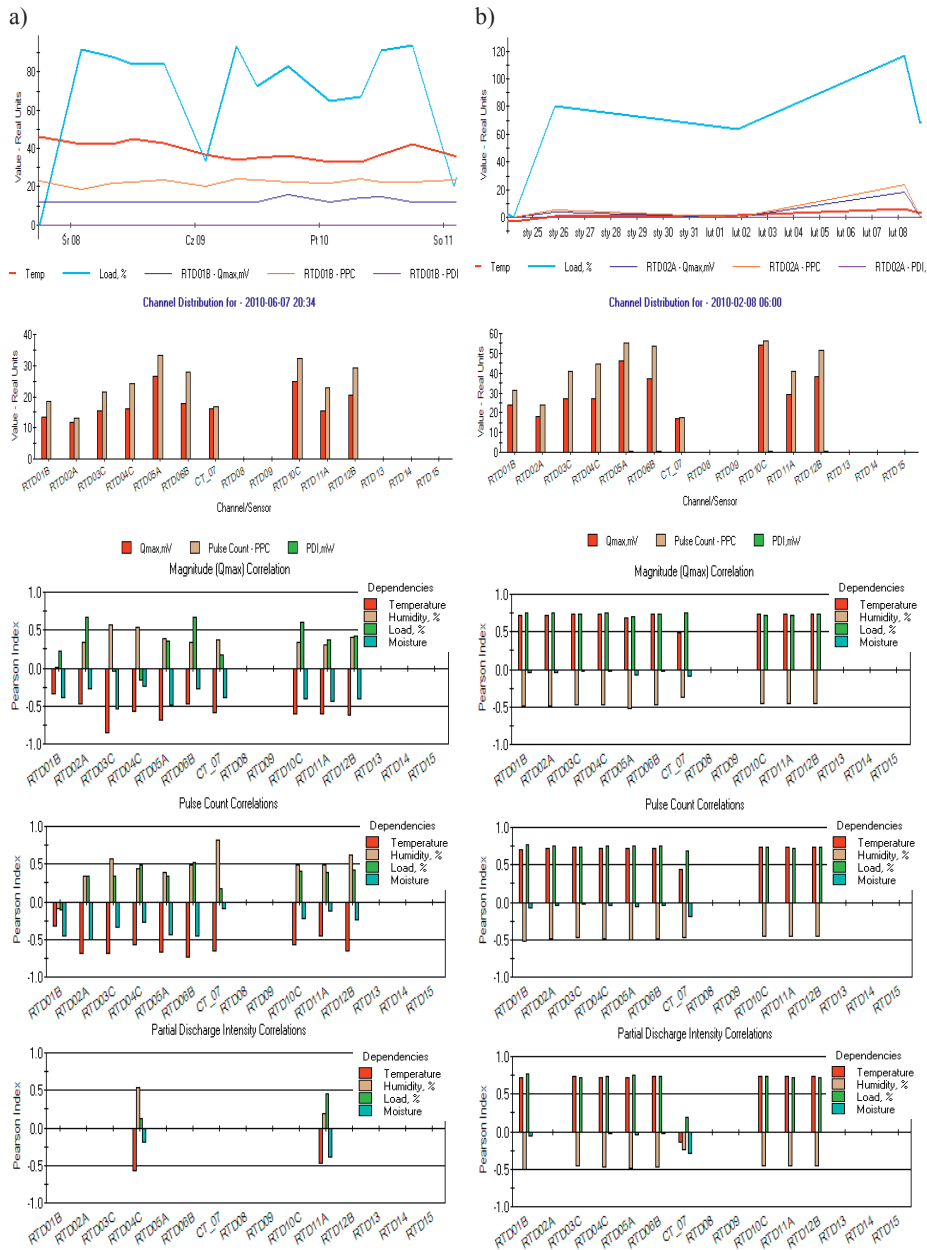
Analizując przebiegi czasowe temperatury i aktywności *wnz* można natrafić na przebiegi o ujemnych wartościach współczynników korelacji wzajemnej w części kanałów pomiarowych i o dodatnich wartościach współczynników w pozostałych. Przykład takiego przebiegu przedstawiono na rysunku 6.3b. Sytuacja na nim przedstawiona charakteryzuje się odmiennymi współczynnikami korelacji wzajemnej temperatury i wskaźników *wnz* dla izolacji uzwojeń znajdującej się po stronie napędowej, a innymi dla izolacji uzwojeń znajdującej się po stronie przeciwnapędowej. Podział ten przebiega na linii konstrukcyjnego podziału obiegu chłodzenia silnika. Można zatem nabrać przypuszczeń, że przyczyną wpływającą na taki stan jest niesymetryczne chłodzenie obu stron silnika.

Analizując pojedyncze cykle pracy silnika można zauważyć powtarzalne syndromy zachowania się izolacji. Biorąc jednak pod uwagę ilość zgromadzonych danych pomiarowych oraz możliwości percepcji ich analizy dla potrzeb dalszej analizy, opracowano diagramy korelacyjne. Przedstawiono na nich wartości pomiarowe wskaźników *wnz* względem uporządkowanych wartości pomiarowych temperatury powietrza. Dla poprawy czytelności rysunków naniesiono na nie funkcje regresji i wprowadzono oznaczenia cyfrowe charakterystycznych obszarów. Wybrane z nich przedstawiono na rysunku 6.4. Pozostałe korelogramy przedstawiono w załączniku 2 do niniejszej pracy.

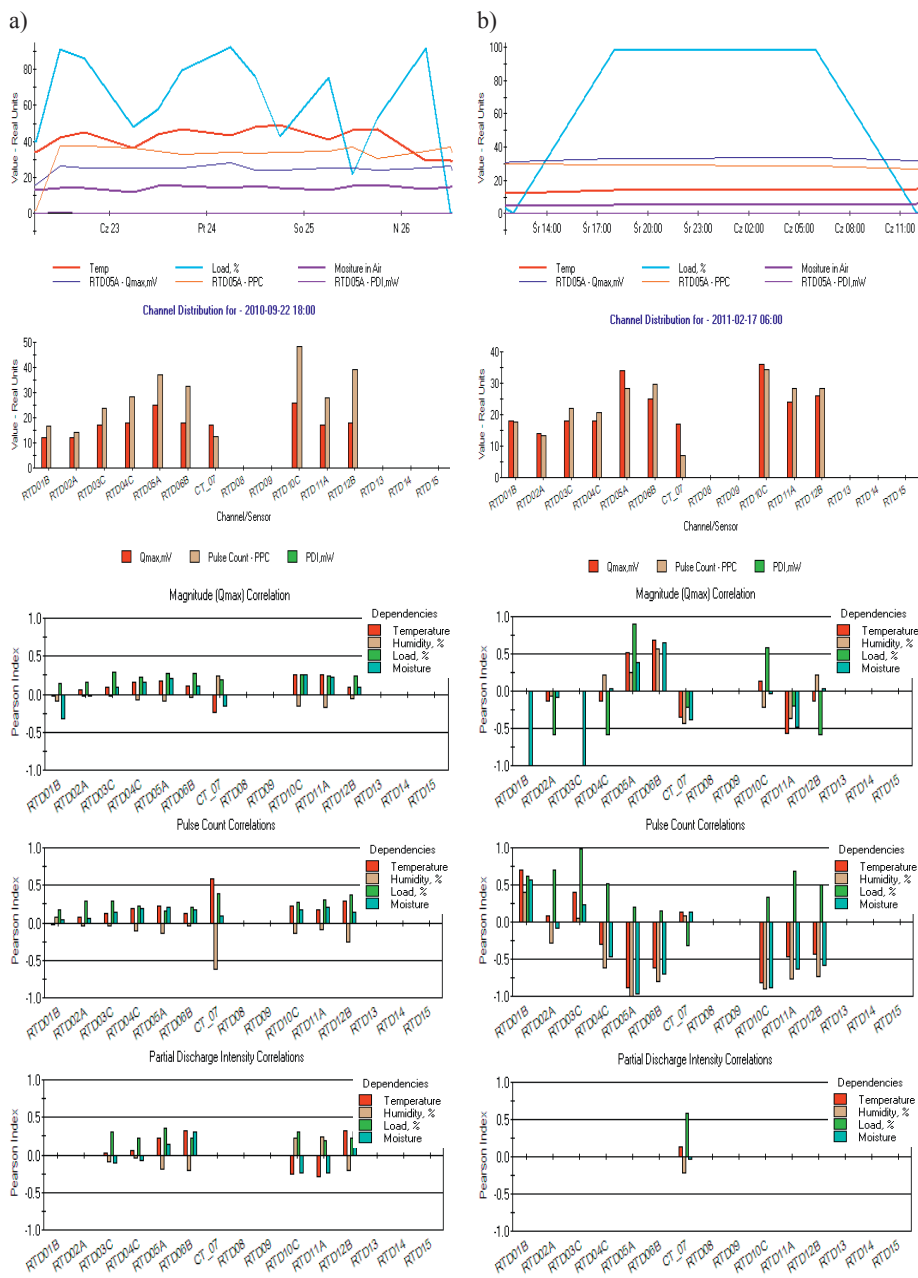
Zaprezentowane na rysunku 6.4 diagramy korelacyjne pozwalają zaobserwować pewne trendy między temperaturą powietrza a aktywnością *wnz* zmierzoną w izolacji uzwojeń tej samej fazy A, dwoma czujnikami zlokalizowanymi po dwóch stronach silnika (strona N i P). Rozkład intensywności wyładowań (PPS) w funkcji temperatury powietrza wskazuje, że jeśli temperatura jest niższa od 10°C, następuje bardzo wyraźne nasilenie się intensywności wyładowań (rys. 6.4.a i b – linia 1). Gdy temperatura powietrza wzrasta, linia trendu wyznaczona poprzez aproksymację wielomianową wskazuje na obniżanie się ilości wyładowań (rys. 6.4a i b - linia 2). Z pomiarów w tym zakresie wynika jednak, że występują chwile, w których intensywność wyładowań wyraźnie rośnie, nawet 2,5 raza. Ten wzrost jest obserwowany, gdy wzrasta temperatura z 27 do 40°C (rys. 6.4a i b – linia 3).



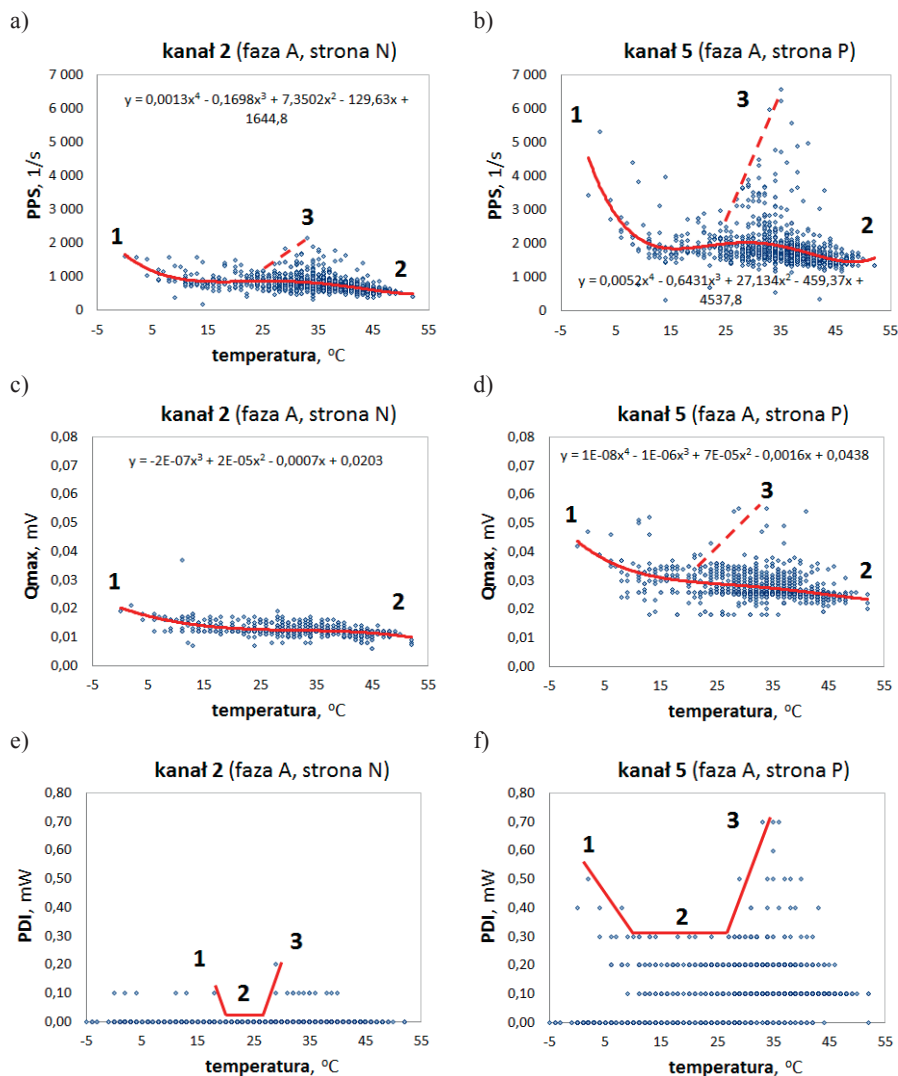
**Rys. 6.1.** Przebieg zmian i korelacje wzajemne badanych wielkości, okres: a) letni (31.05÷03.06.2010 r.), b) zimowy (06÷08.12.2010 r.)



**Rys. 6.2.** Przebieg zmian i korelacje wzajemne badanych wielkości, okres: a) letni (07÷11.06.2011 r.), b) zimowy (24.01÷08.02.2010 r.)



**Rys. 6.3.** Przebieg zmian i korelacje wzajemne badanych wielkości, okres: a) przejściowy (22÷26.09.2010 r.), b) zimowy (16.02÷17.02.2011 r.)



Rys. 6.4. Diagramy korelacyjne wskaźników *wnz* w funkcji temperatury powietrza (opis w tekście)

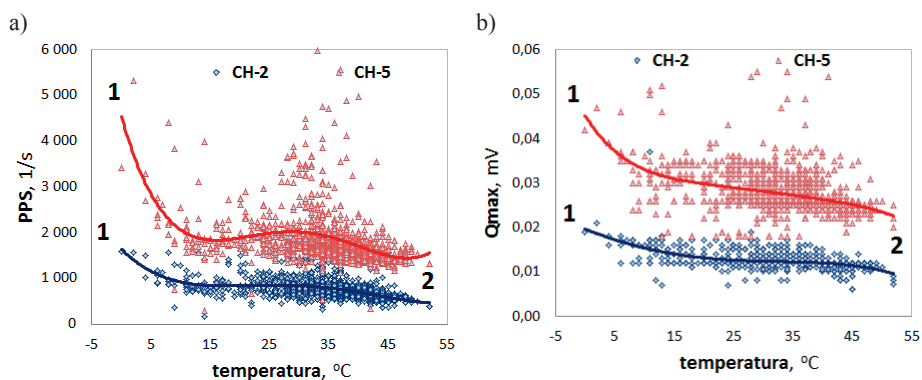
Wpływ zmiany temperatury powietrza na wskaźnik  $Q_{max}$  przedstawiono na rysunku 6.4c i d. Z tych korelogramów również wynika, że gdy temperatura powietrza w hali spadnie poniżej 10°C, to następuje wyraźny wzrost amplitudy wyładowań (linia 1). Wzrost temperatury wpływa na zmniejszenie się amplitudy wyładowań (linia 2). Obie linie mają podobny współczynnik kierunkowy.

Ciekawe wnioski nasuwają się z obserwacji wpływu temperatury powietrza na moc wyładowań PDI (rys. 6.4e i f). Wrysowane linie 1, 2 i 3 wskazują ob-



szar, w którym wartość wyładowań jest na najniższym poziomie. W zakresie temperatur powietrza od 10 do 27°C wyładowania nie przekraczają wartości 0,3mW po stronie P i 0,1mW po stronie N. Spadek lub wzrost tej temperatury od wskazanego zakresu wpływa wyraźnie na wzrost wyładowań. Wzrost ten może osiągać wartość nawet 2-krotną (linia 1 i 3).

Przedstawione na rysunku 6.4 przebiegi korelacyjne dla poszczególnych wskaźników mają podobne kształty. Różnią się wyraźnie poziomem wartości. Gdy weźmie się pod uwagę wcześniejsze wnioski związane z niesymetrycznym chłodzeniem silnika można przypuszczać, że to ta przyczyna wpływa na lokalne wzrosty wyładowań niezupełnych po jednej ze stron silnika. Wpływ temperatury powietrza na wielkość emisji wyładowań niezupełnych w izolacji uzwojeń tej samej fazy A, znajdującej się po obu stronach silnika (strona N i P), przedstawiono na rysunku 6.5. Wynika z niego, że poziom wyładowań niezupełnych mierzony po stronie przeciwnapędowej jest znacznie wyższy niż mierzony po stronie napędowej. W przypadku wskaźnika PPS poziom jest wyższy średnio dwukrotnie, w przypadku  $Q_{max}$  nawet trzykrotnie.



Rys. 6.5. Wpływ temperatury powietrza na wskaźnik PPS (a) i wskaźnik  $Q_{max}$  (b) w kanałach pomiarowych CH-2 (strona N) i CH-5 (strona P), izolacja uzwojeń fazy A

### 6.1.2. Analiza właściwości silnika SE-2

Silnik SE-2 pracuje w miarę ustabilizowanych warunkach środowiskowych, w których zmiany temperatury powietrza osiągają maksymalnie 25°C. Niemniej jednak, zastosowana w silniku izolacja główna uzwojeń wykonana w technologii VPI sygnowana przez producenta *Micadur Compact*, już na etapie wstępnych obserwacji przebiegów czasowych wykazywała się dużą wrażliwością aktywności  $w_{nz}$  na zmiany warunków mikroklimatycznych.

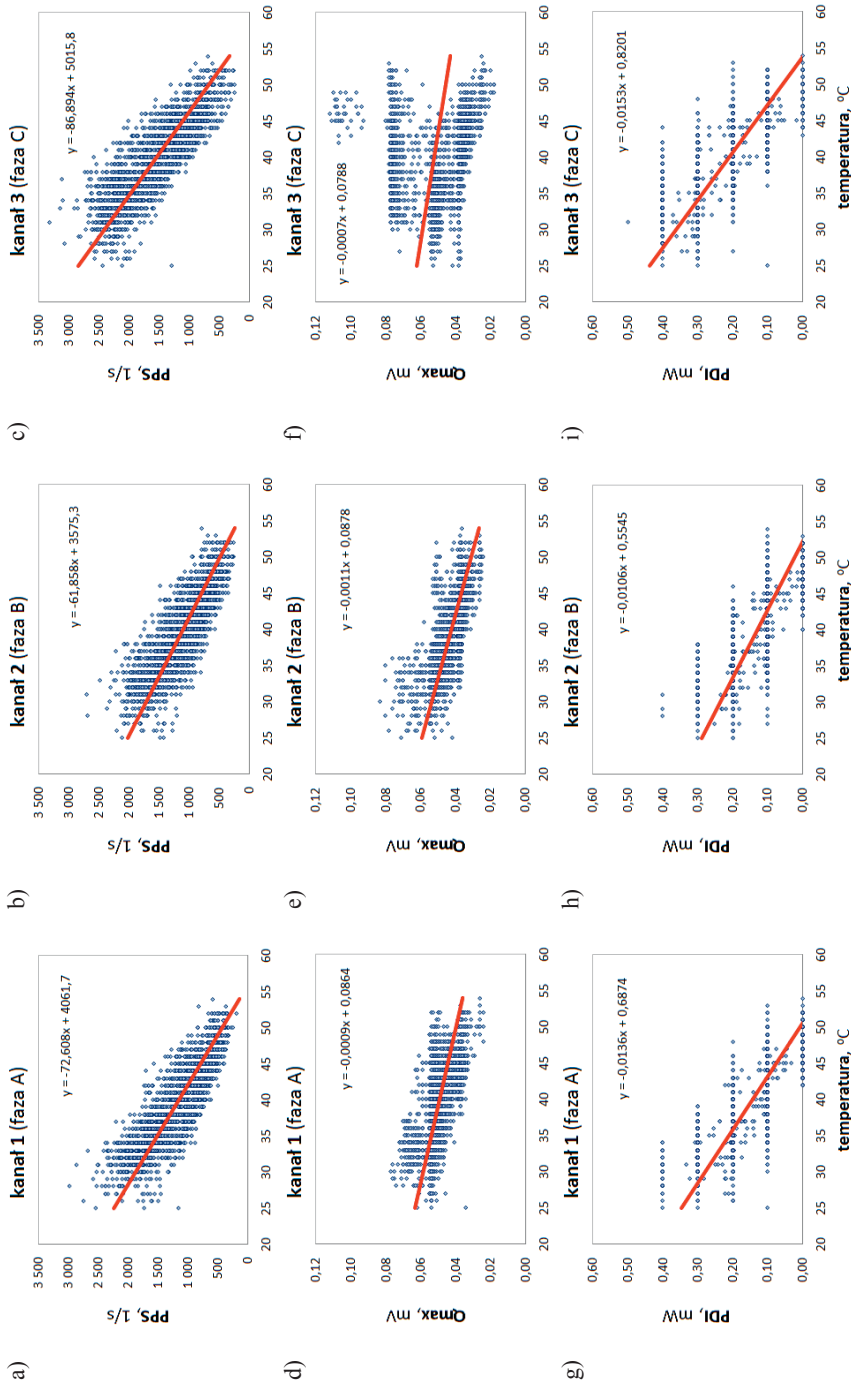
Na rysunku 6.6 przedstawiono diagram korelacyjny wskazujący na jakościowy i ilościowy wpływ zmiany temperatury powietrza na wskaźniki oceniające emisję  $w_{nz}$  w badanym silniku. Uzyskane przebiegi korelogramów dla wszystkich wskaźników  $w_{nz}$  wskazują na liniową zależność tych zmian. Współczynniki kierunkowe wyznaczonych funkcji przyjmują wartości ujemne, co

świadczy o odwrotnie proporcjonalnym wpływie temperatury na wskaźniki PPS,  $Q_{\max}$  i PDI. Ujemny wpływ temperatury na emisję *wnz* można wytłumaczyć zmianą rozmiarów pustych przestrzeni w uzwojeniu stojana. W miarę wzrostu temperatury materiał spoiwa izolacji żłobkowej i miedzi rozszerza się, zamykając puste przestrzenie i zmniejszając w ten sposób klasyczne wyładowania PDI. Efekt ten jest najbardziej znaczący w przypadku uzwojeń z pokryciem asfaltowym i poliestrowym, lecz można go również zaobserwować na uzwojeniach z pokryciem epoksydowym [23, 81].

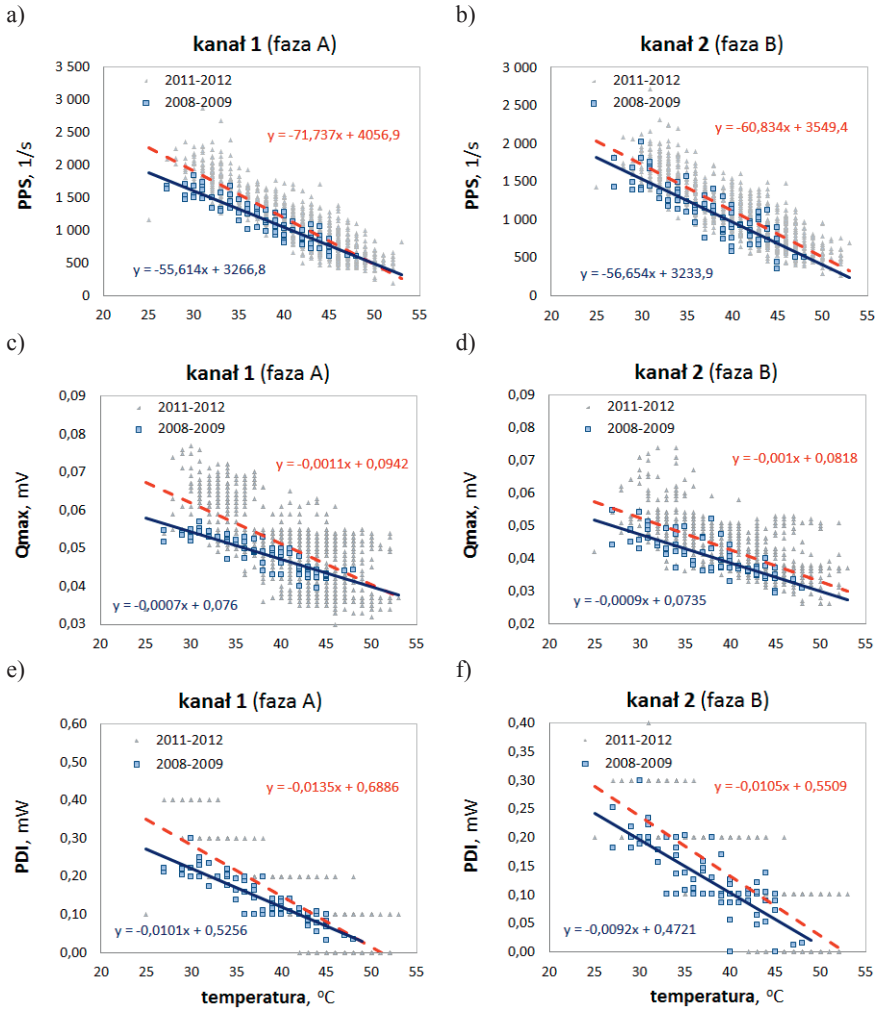
W analizowanym obiekcie największą wrażliwość izolacji na zmiany temperatury obserwuje się w zakresie intensywności wyładowań PPS, następnie mocy wyładowań PDI i na końcu amplitudy wyładowań  $Q_{\max}$ . Największe wartości współczynników kierunkowych występują dla pomiarów wykonanych w przewodach fazy C, co świadczy o stanie technicznym izolacji tych przewodów. Duży ujemny wpływ temperatury sugeruje bowiem istnienie wewnętrznych rozwarstwień w izolacji przewodów.

Wielkość występujących rozwarstwień izolacji zmienia się wraz z czasem pracy maszyny. Wpływ naturalnego procesu starzenia się izolacji na zmianę aktywności *wnz* przedstawiono na rysunku 6.7. Poczyniona obserwacja uwzględnia zmiany stanu izolacji, jaka nastąpiła na przestrzeni 3 lat pracy silnika. Wyznaczone funkcje liniowe zmian wskaźników *wnz* potwierdzają efekt starzenia się izolacji. Wszystkie wskaźniki *wnz* zanotowane w okresie lat 2011 ÷ 2012 mają wyższe wartości od ich wartości zmierzonych trzy lata wcześniej. Charakter zmian wskazuje na istnienie pewnej prawidłowości. Polega ona na tym, że wzrost emisji *wnz* w rozpatrywanym zakresie temperatur nie jest jednokowy. Linie aproksymacyjne przecinają się przy pewnej temperaturze powietrza, co oznacza, że obniżenie temperatury od tej wartości powoduje większy wzrost aktywności *wnz*. I odwrotnie, wzrost temperatury powyżej tej wartości powinien spowodować obniżenie emisji. Dla izolacji przewodów fazy A tą charakterystyczną temperaturą jest 48÷50°C, a dla izolacji przewodów fazy C – 55°C.

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki należy uznać, że wraz z postępującym procesem starzenia się izolacji, chcąc uniknąć wzrostu emisji *wnz*, należałoby zapewnić pracę silnika SE-2 w temperaturach zbliżonych do wskazanej temperatury charakterystycznej, przy której przecinają się obie linie. W tych warunkach bowiem wrażliwość izolacji w zakresie aktywności *wnz* na zmianę temperatury jest najmniejsza.



**Rys. 6.6.** Wpływ temperatury na wskaźniki *wHz* opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 29.07.2008 do 05.01.2012, silnik SE-2

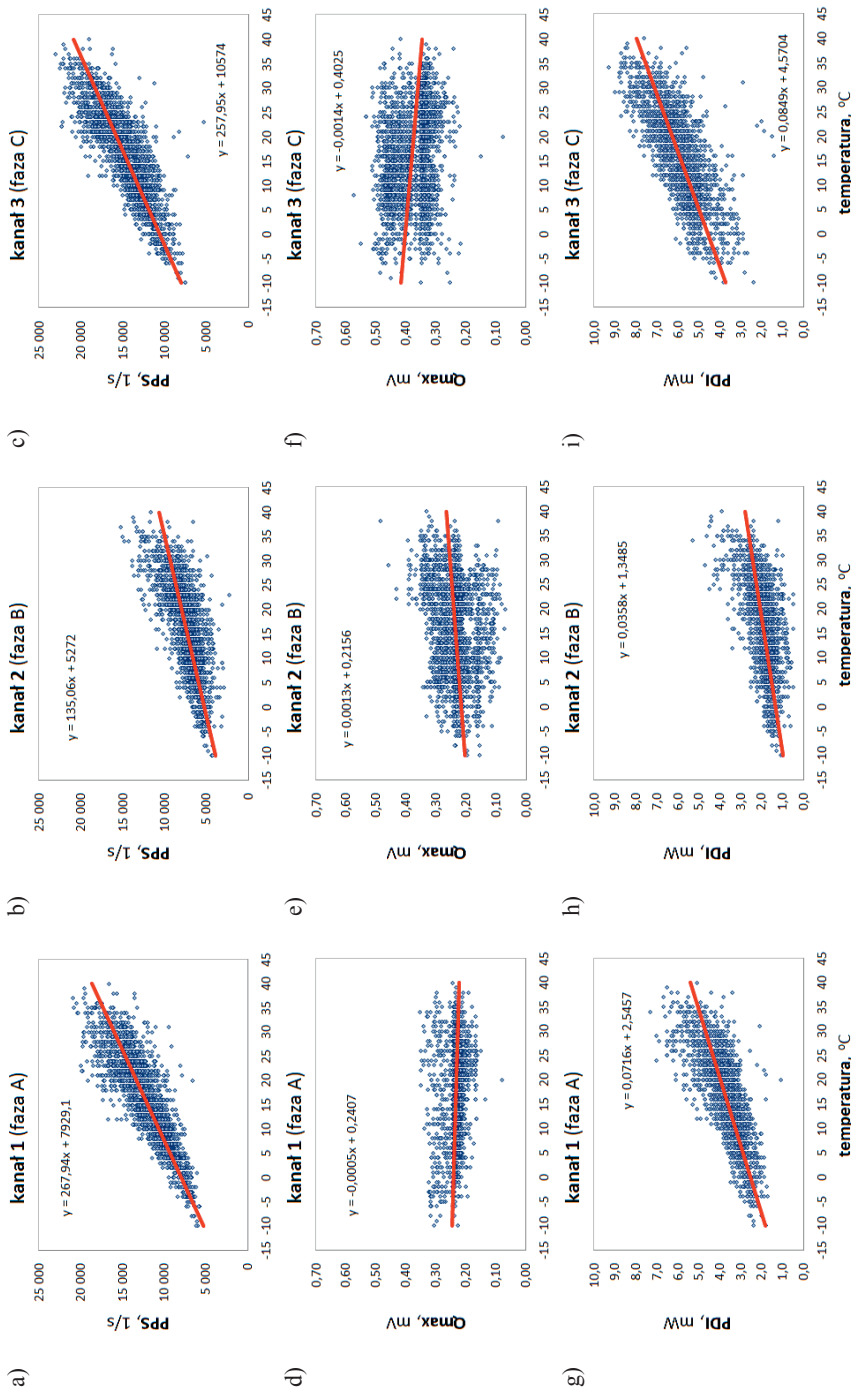


Rys. 6.7. Diagramy korelacyjne wskaźników *wnz* w funkcji temperatury powietrza z uwzględnieniem procesu starzenia się izolacji przewodów fazy A (a, c, e) i przewodów fazy B (b, d, f)

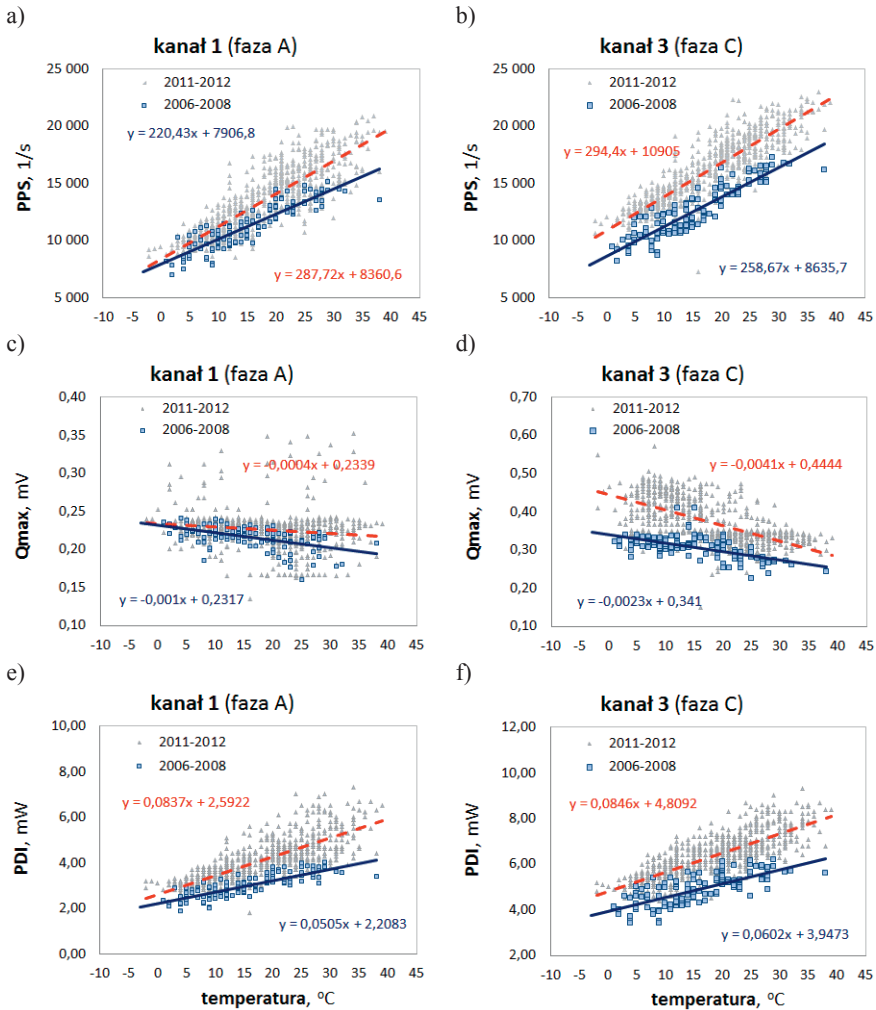
### 6.1.3. Analiza właściwości generatora SE-3

Praca generatora SE-3 w warunkach bezpośredniego oddziaływania klimatu zewnętrznego sprawia, że aktywność *wnz* izolacji silnika z tytułu zmieniających się temperatur powinna być dobrze zauważalna.

Na rysunku 6.8 przedstawiono diagramy korelacyjne wraz z wyznaczonymi aproksymacjami liniowymi, które potwierdzają powyższe przypuszczenie. Właściwości izolacji generatora w tym względzie wskazują na dodatni wpływ temperatury powietrza na wielkość emisji *wnz*. Największy jest dla wskaźnika PPS



**Rys. 6.8.** Wpływ temperatury na wskaźniki wiz opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 12.07.2006 do 05.01.2012, gen. SE-3



Rys. 6.9. Diagramy korelacyjne wskaźników *wnz* w funkcji temperatury powietrza z uwzględnieniem procesu starzenia się izolacji przewodów fazy A (a, c, e) i przewodów fazy C (b, d, f)

i PDI. Najmniejszą wrażliwością na zmiany temperatury charakteryzuje się amplituda wyładowań  $Q_{max}$ , która dla niektórych uzwojeń nie zachowuje znaku korelacji.

Dodatnia korelacja wskazuje na degradację powłoki półprzewodzącej/stopniującej (*semicon/grading*). W miarę, jak temperatura uzwojenia stojana wzrasta, opór powłok maleje i to powoduje wzrost aktywności powierzchniowego (dodatniego) PDI. Charakter zmian emisji *wnz* w funkcji temperatury zewnętrznej wskazuje na bardzo powolny mechanizm niszczenia się izolacji. Degradacji

izolacji w takich przypadkach najczęściej towarzyszy silne wytwarzanie się ozonu. Dotyczy to głównie maszyn z powietrznym układem chłodzenia [81]. W przypadku generatora SE-3, dla którego historia pomiarowa jest najdłuższa, wyznaczono analogicznie jak dla silnika SE-2, funkcje obrazujące stopień degradacji izolacji w funkcji zmian temperatury powietrza. Porównano emisję z dwóch okresów pomiarowych, tj. z okresu lat 2006÷2008 i 2011÷2012. Przebiegi tych funkcji przedstawiono na rysunku 6.9. Z analizy prezentowanych wyników wypływa również występowanie pewnej temperatury charakterystycznej, przy której wpływ zmiany temperatury na emisję *wnz* jest znikomy. W przypadku izolacji uzwojeń fazy A jest to temperatura  $-5^{\circ}\text{C}$ , w przypadku izolacji uzwojeń fazy C  $-15^{\circ}\text{C}$ .

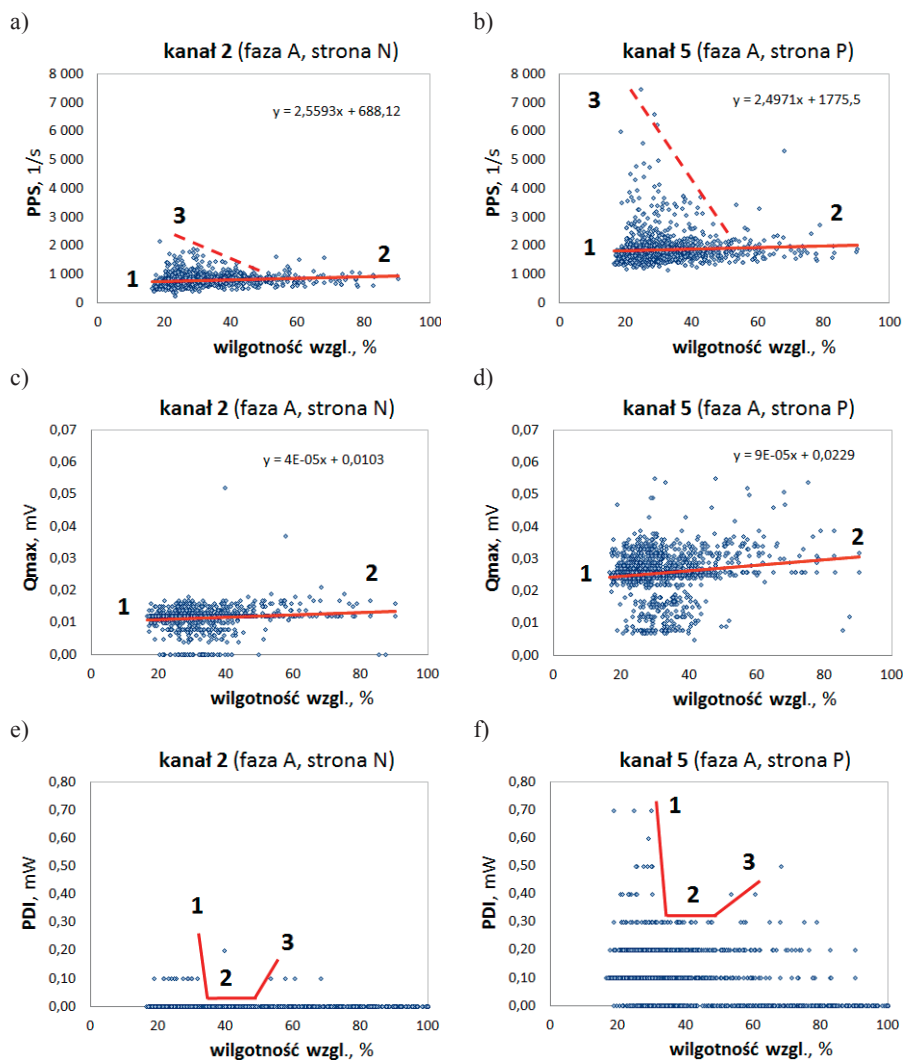
## 6.2. Wpływ wilgotności powietrza na emisję *wnz*

### 6.2.1. Analiza właściwości silnika SE-1

Wpływ wilgotności powietrza na emisję wyładowań dla wybranych kanałów pomiarowych badanego silnika SE-1 przedstawiono na rysunkach 6.10 i 6.11. Wyniki analizy dla pozostałych kanałów pomiarowych oraz obu okresów pomiarowych przedstawiono w załączniku 4. Na wszystkich diagramach korelacyjnych wrysowano funkcje aproksymacyjne oraz pomocniczo linie wskazujące na charakterystyczne obszary zmian badanych wielkości. Ponadto wprowadzono oznaczenia cyfrowe celem odwoływania się do tych obszarów. Wilgotność powietrza przedstawiono na rysunkach procentowo, jako wilgotność względną (rys. 6.10) i wartościowo – wyrażając udział wilgoci w powietrzu wilgotnym (rys. 6.11).

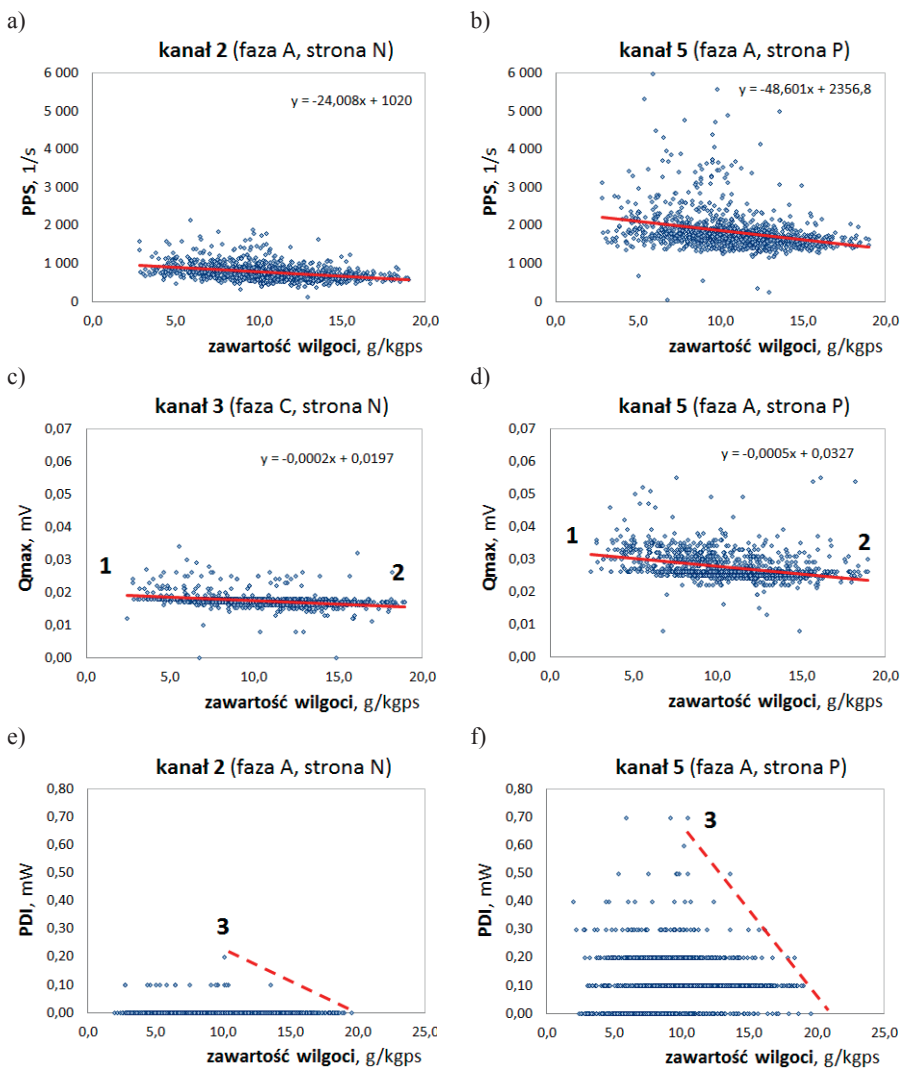
Współczynniki kierunkowe funkcji wyznaczonych na podstawie zgromadzonych danych pomiarowych wskazują na dodatnią korelację między wzrostem wilgotności względnej a aktywnością *wnz*. Współczynnik kierunkowy przyjmuje niewielkie wartości dla wskaźników PPS i  $Q_{\max}$ , co wskazuje na małą ich wrażliwość na zmiany wilgotności względnej. Jedynie w okolicach poniżej 40% zauważa się tendencję do wzmożonej aktywności *wnz*. Dla wskaźnika PDI w ogóle nie wyznaczono funkcji korelacyjnej, a jedynie wskazano linie pomocnicze celem zaznaczenia pewnych charakterystycznych obserwacji. Linie oznaczone liczbą 1 określają na lewo obszar, w którym wilgotność względna spada poniżej 30% i w tym obszarze następuje bardzo wyraźny wzrost wyładowań niezupełnych. Z kolei wzrost wilgotności względnej powyżej 55% powoduje wzrost wyładowań (linia 3 na rys. 6.10e, f).

Do nieco innych wniosków można dojść wyrażając emisję wyładowań w funkcji udziału wilgoci w powietrzu wilgotnym. Ujemna korelacja zaświadcza o korzystnym wpływie wzrostu wilgotności na redukcję aktywności *wnz*. Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że wzrost wilgotności powoduje wzrost pojemności cieplnej powietrza i zwiększenie współczynników przejmowania ciepła podczas wymiany między powierzchniami zewnętrznymi izolacji a omywającym je powietrzem – następuje intensyfikacja wymiany ciepła.



Rys. 6.10. Wpływ wilgotności względnej na wskaźniki *wnz* zarejestrowane w kanałach pomiarowych 2 (strona N) i 5 (strona P)





Rys. 6.11. Wpływ udziału wilgoci w powietrzu na wskaźniki *wnz* zarejestrowane w kanałach pomiarowych 2 (strona N) i 5 (strona P)

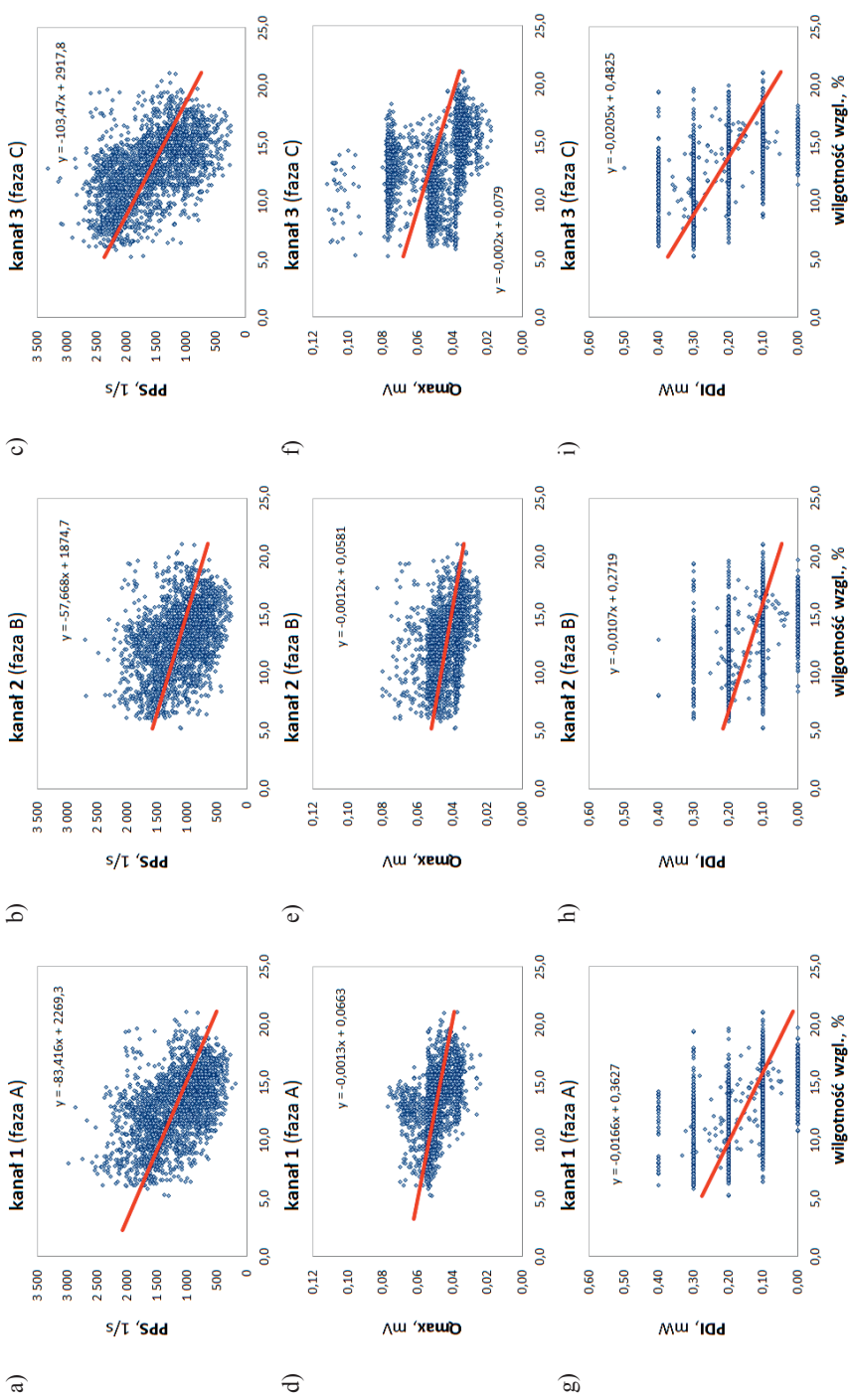
## 6.2.2. Analiza właściwości silnika SE-2

Ocenę właściwości izolacji uzwojeń silnika SE-2 pod kątem wpływu zmian wilgotności powietrza na wielkość emisji *wnz* przedstawiono na diagramach korelacyjnych 6.12÷6.14.

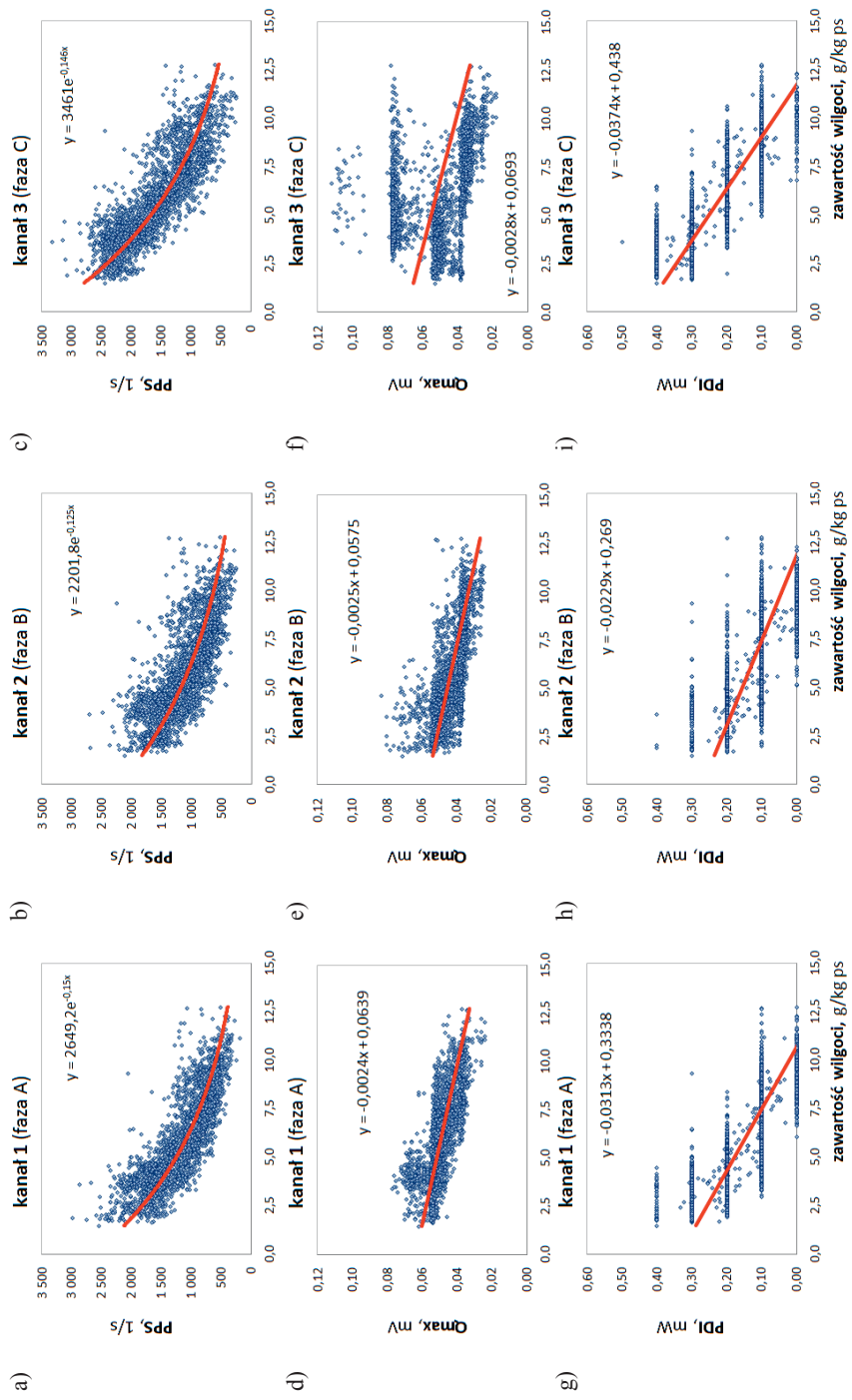
Wyraźny ujemny wpływ wilgotności powietrza wskazuje na znaczenie tego parametru w ocenie mikroklimatu. Wszystkie wskaźniki oceny *wnz* wykazują podobny trend, a mianowicie: wzrost wilgotności względnej (RH) oraz udział wilgoci w powietrzu wilgotnym (X) wpływa na obniżenie aktywności *wnz*. Współczynniki kierunkowe funkcji liniowych największe są dla parametrów PPS i PDI. W przypadku wpływu wilgotności bezwzględnej na wskaźnik PPS zależność przyjmuje wyraźnie kształt krzywej wykładniczej, co świadczy o dużej wrażliwości badanej izolacji na małą zawartość wilgoci w powietrzu.

Cechą charakterystyczną diagramów korelacyjnych oceniających wpływ wilgotności względnej powietrza na wskaźniki *wnz* jest znaczna szerokość rozkładu gęstości punktów pomiarowych. Obliczone wskaźniki korelacji wzajemnej osiągają dla wszystkich kanałów pomiarowych wartości między 0,3 a 0,5. Znacznie lepsze współczynniki korelacji *Pearsona* uzyskuje się przedstawiając emisję *wnz* na tle udziału wilgoci w powietrzu wilgotnym. Współczynniki korelacji wzajemnej są wówczas między 0,5 i 0,8. Można zatem uznać, że lepszą formą oceny warunków mikroklimatu dla właściwej eksploatacji badanego silnika w zakresie wilgotności powietrza powinien być wskaźnik wilgotności bezwzględnej. Zdaniem autora to ten parametr powinien być tym, którego zalecane wartości graniczne powinny być podane przez producenta silnika w dokumentacji techniczno-ruchowej.

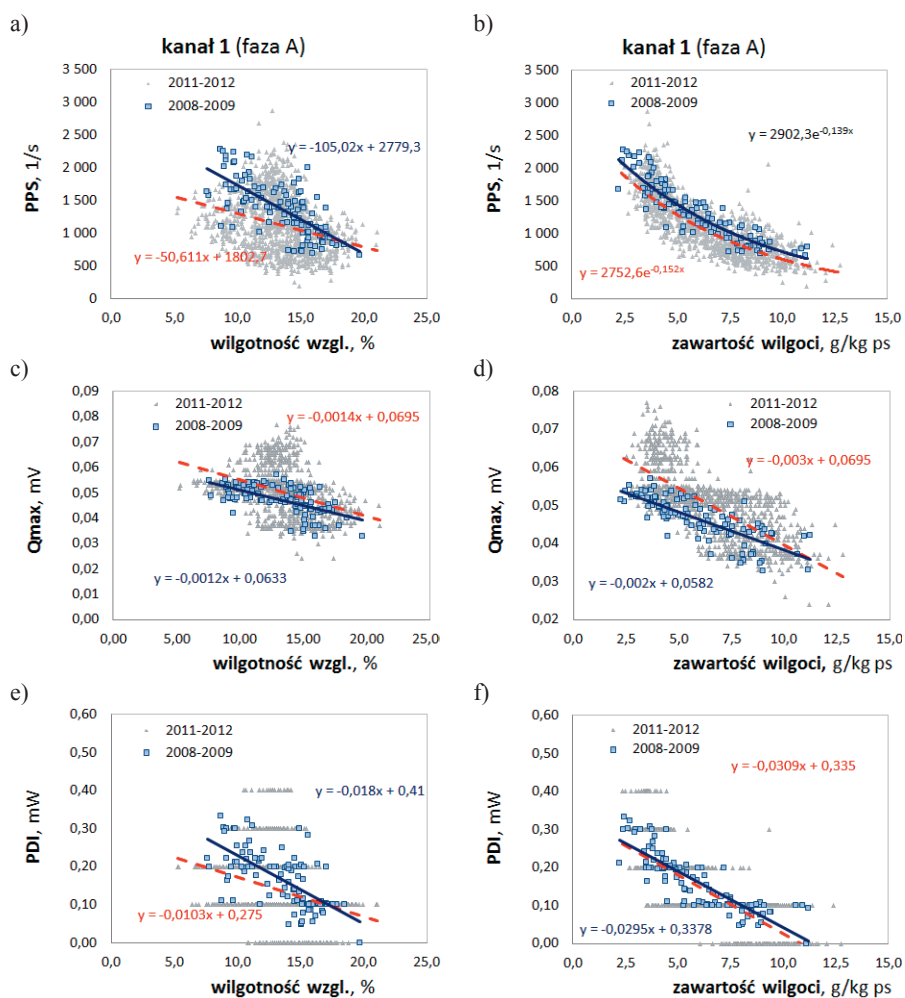
Ocena procesu starzenia się izolacji uzwojeń stojana w kontekście pomiaru wilgotności powietrza nie jest tak jednoznaczna jak w przypadku oceny wpływu temperatury na jej proces starzenia. Jak wynika z rysunku 6.14a i 6.14b, wskaźnik intensywności wyładowań PPS we wcześniejszym okresie eksploatacji silnika osiągał wyższe wartości aniżeli obecnie. Podobnie jest ze wskaźnikiem PDI (rys. 6.14e i 6.14f). Taki stan rzeczy wynika z bardzo niskiej wilgotności powietrza znajdującego się wewnątrz badanego silnika oraz niewielkiej jego zmiany podczas normalnej eksploatacji. Z rysunku 6.14a i 6.14e wynika, że gdyby od początku eksploatacji silnika wilgotność względna powietrza wewnątrz była na wyższym poziomie, tj. powyżej 18%, to proces starzenia się izolacji mógłby przebiegać znacznie wolniej. Punkt przecięcia się obu funkcji liniowych wskazuje bowiem na charakterystyczny poziom wilgotności względnej, poniżej której emisja wyładowań jest znacznie wyższa. O zbyt niskim poziomie wilgotności powietrza w komorze silnika mogły zadecydować warunki montażu silnika lub późniejsze warunki, w których dokonywano przeglądów i prac serwisowych. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę powyższy tok rozumowania, należy uznać, że silnik został w ten sposób narażony na przyśpieszony proces degradacji stanu izolacji.



Rys. 6.12. Wpływ RH na wskaźniki *wiz* opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r., silnik SE-2



**Rys. 6.13.** Wpływ X na wskaźniki wizz opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r., silnik SE-2



**Rys. 6.14.** Diagramy korelacyjne wskaźników  $w_{nz}$  w funkcji wilgotności względnej powietrza (a, c) oraz udziału wilgoci w powietrzu (b, d) z uwzględnieniem procesu starzenia się izolacji uzwojeń fazy A

### 6.2.3. Analiza właściwości generatora SE-3

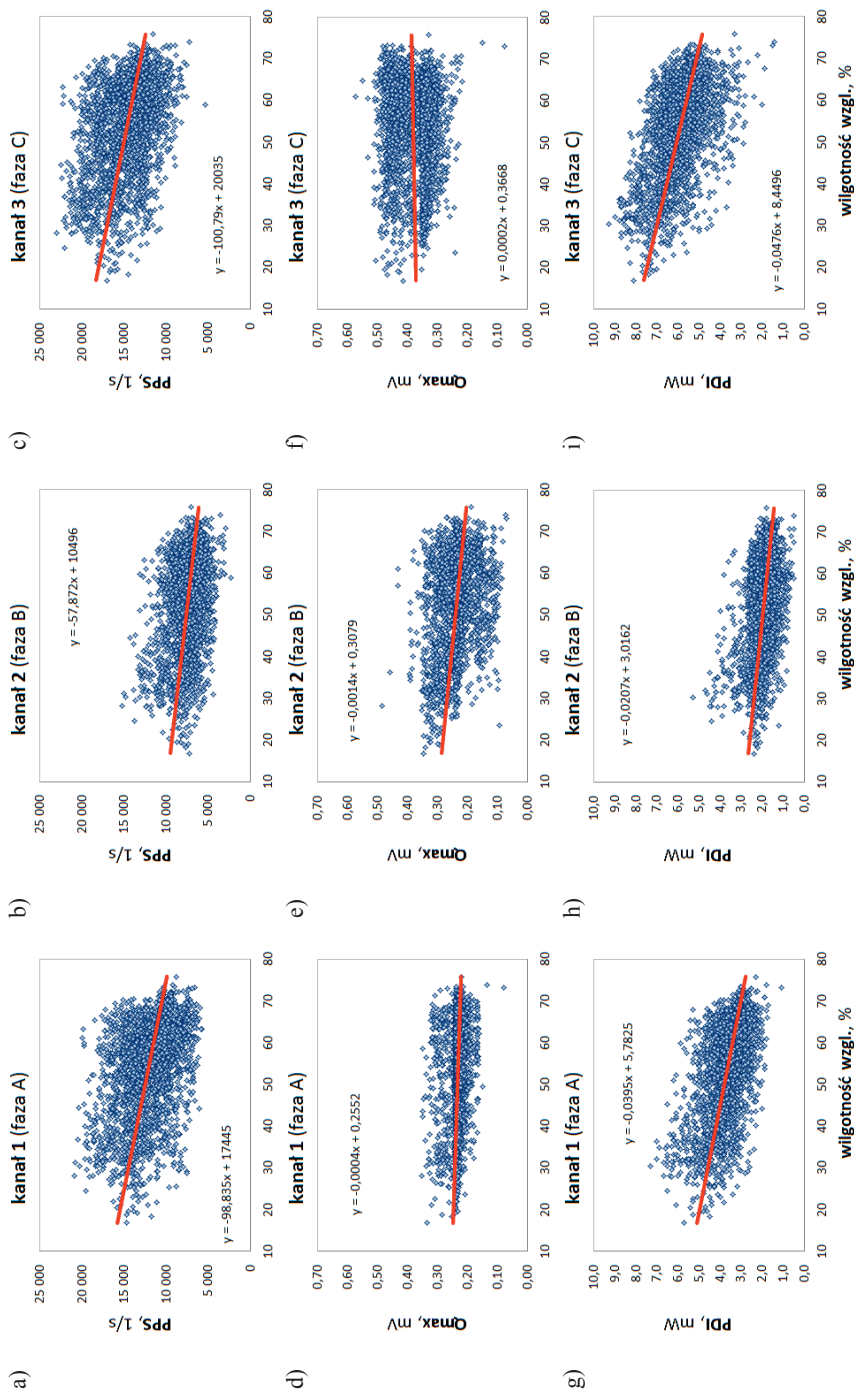
Generator ze względu na lokalizację zabudowy pracuje w bardzo zmieniających warunkach wilgotnościowych. Wilgotność względna powietrza w warunkach obliczeniowych dla lokalizacji, w której pracuje generator wynosi:  $\varphi=100\%$  ( $X=0,8\text{g/kg ps}$ ) przy temperaturze powietrza  $-20^{\circ}\text{C}$  w okresie zimowym oraz  $\varphi=45\%$  ( $X=11,9\text{g/kg ps}$ ) przy temperaturze powietrza  $30^{\circ}\text{C}$  w okresie letnim (według PN-76/B-03420. Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego).

Rzeczywiste warunki wilgotnościowe w okresie badań nie były jednak aż tak zróżnicowane. Z przedstawionych na rysunkach 6.15 wynika, że wilgotność względna zmieniała się w zakresie od 15 do 75%, a udział wilgoci w powietrzu wilgotnym między 2,5 a 15 g/kgps (rys. 6.16). Zmiana wilgotności powietrza wpływa na zmianę aktywności  $w_{nz}$  w sposób wyraźny. Wzrost wilgotności względnej powoduje obniżenie wskaźników PPS,  $Q_{max}$  i PDI, przy czym najsilniej na zmiany wilgotności reaguje wskaźnik PPS oraz PDI. Zmiana wilgotności w bardzo małym stopniu wpływa na zmianę wskaźnika  $Q_{max}$ . W izolacji uzwojeń fazy A i C są te zmiany na tyle małe, że trudno mówić o jakiegokolwiek zależności. W przypadku izolacji uzwojeń fazy B współczynnik kierunkowy funkcji liniowej jest znacznie wyraźniejszy (rys. 6.16e). W odróżnieniu do pozostałych przebiegów, współczynnik ten wykazuje ujemny wpływ zawartości wilgoci w powietrzu na amplitudę wyładowań  $Q_{max}$ .

Inny przebieg mają diagramy korelacyjne, na których wielkość emisji  $w_{nz}$  uzależniono od zawartości wilgoci w powietrzu (rys. 6.16). Na tych wykresach wzrost zawartości wilgoci w powietrzu powoduje wyraźny wzrost aktywności wyładowań przejawiający się wzrostem ilości rejestrowanych impulsów w czasie (PPS) oraz wzrostem mocy wyładowań (PDI).

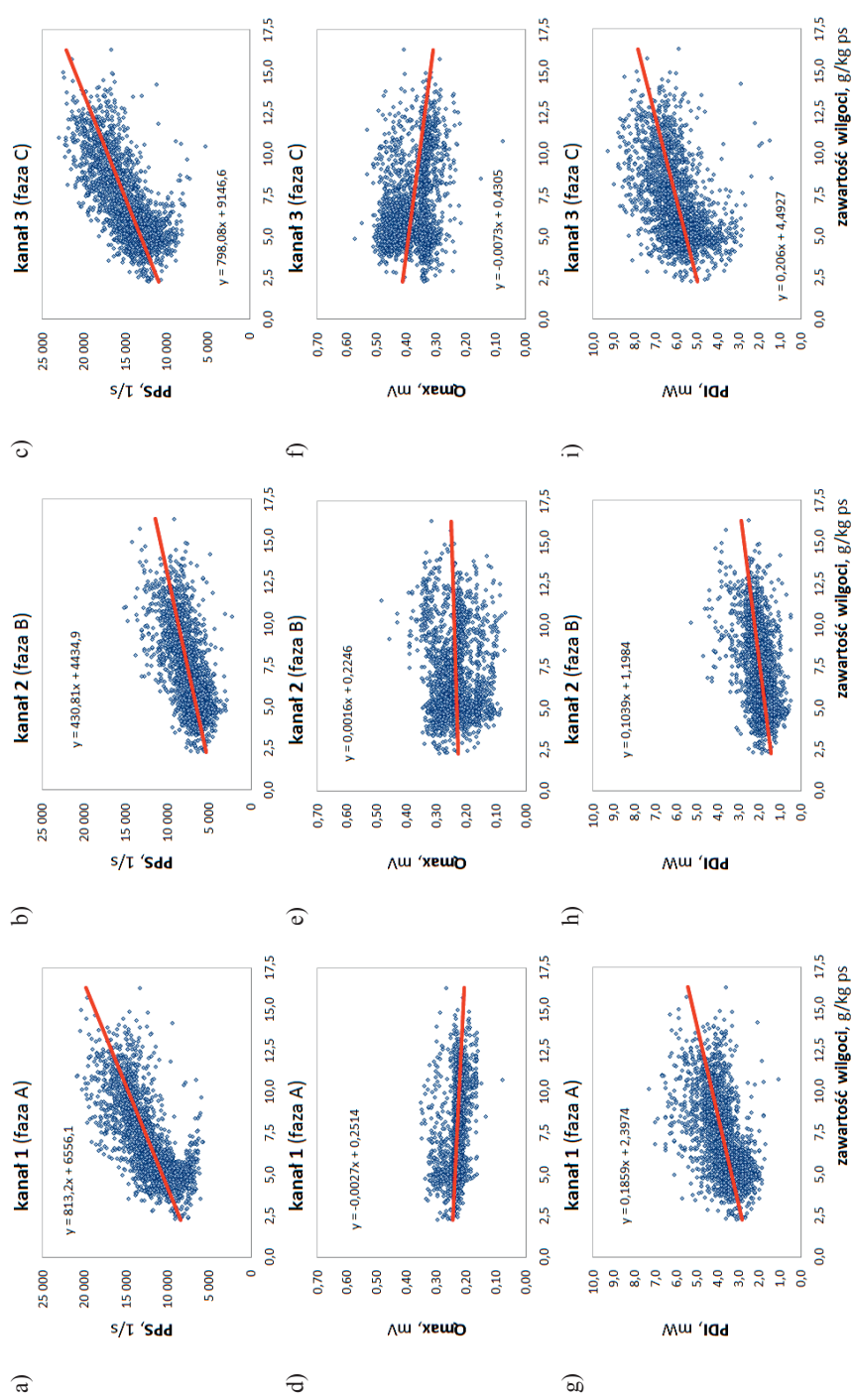
Odmienne trendy wpływu wilgotności względnej i wilgotności bezwzględnej na emisję wyładowań niepełnych należy interpretować, analizując omawiane korelogramy łącznie z przebiegiem wpływu temperatury powietrza na aktywność  $w_{nz}$ . Gdy temperatura powietrza rośnie przy tej samej zawartości wilgoci w powietrzu, wówczas wilgotność względna powietrza maleje. Może ona maleć również wówczas, gdy wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się udział wilgoci w powietrzu wilgotnym, ale jedynie w określonym zakresie. W przeważającym okresie z takim zjawiskiem mamy do czynienia przy zmieniających się warunkach klimatu zewnętrznego. Na rysunku 6.18 przedstawiono wyniki pomiarów temperatury i wilgotności zrealizowane w ramach badań. Wynika z nich, że wzrostowi temperatury zewnętrznej towarzyszy wzrost zawartości wilgoci w powietrzu wilgotnym przy jednoczesnym obniżaniu się wilgotności względnej (rys. 6.18). Wzajemna relacja parametrów oceniających wilgotność powietrza względem temperatury tłumaczy przeciwne znaki współczynników kierunkowych równań.

Izolacja uzwojeń generatora ulega procesowi starzenia się. Zanotowany wzrost emisji wyładowań na przestrzeni pięciu lat eksploatacji generatora SE-3, w odniesieniu do zmian wilgotności powietrza, przedstawiono na rysunku 6.17. Przyrost aktywności  $w_{nz}$  jest dużo bardziej zauważalny w okresach występowania niskiej wilgotności względnej oraz wysokiej zawartości wilgoci w powietrzu. W niekorzystnych okresach nastąpił ponaddwukrotny wzrost mocy wyładowań (PDI). Pozostałe wskaźniki  $w_{nz}$  osiągnęły w tych okresach nieco niższy wzrost, ale również bardzo zauważalny (wzrost o 40÷60%).



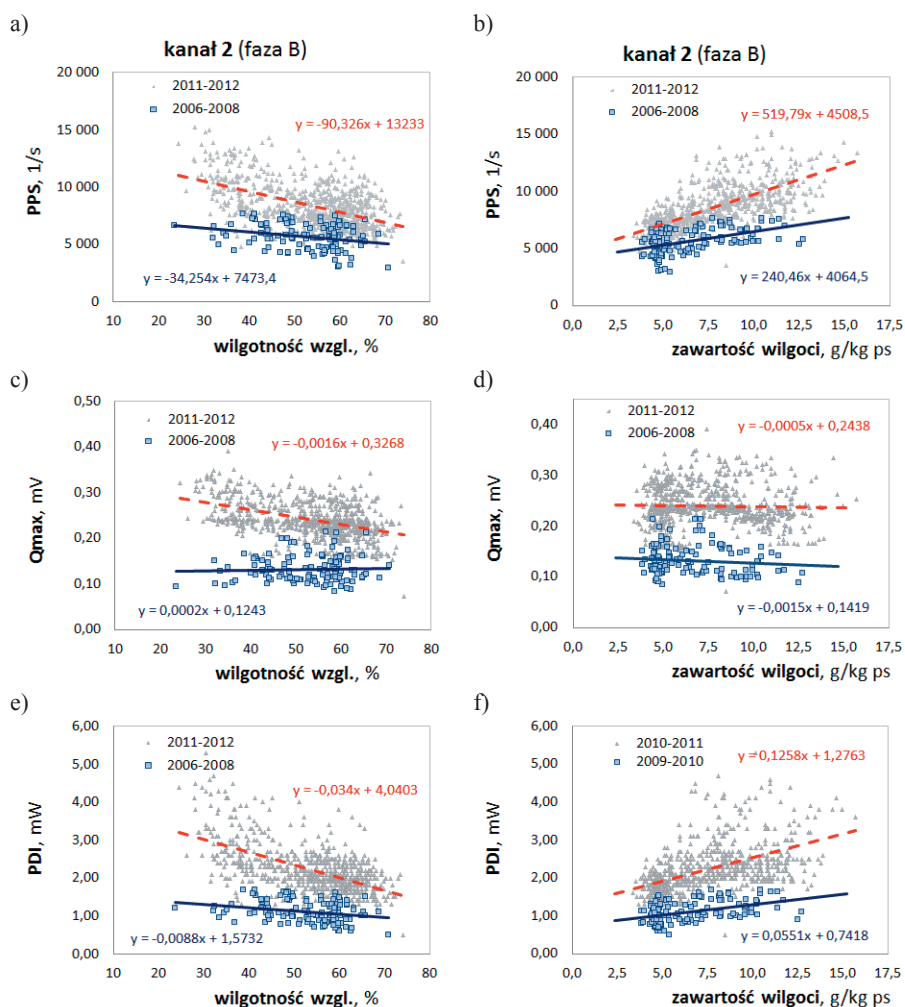
Rys. 6.15. Wpływ RH na wskaźniki *wiz* opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r., gen. SE-3





**Rys. 6.16.** Wpływ X na wskaźniki *wiz* opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r., gen. SE-3



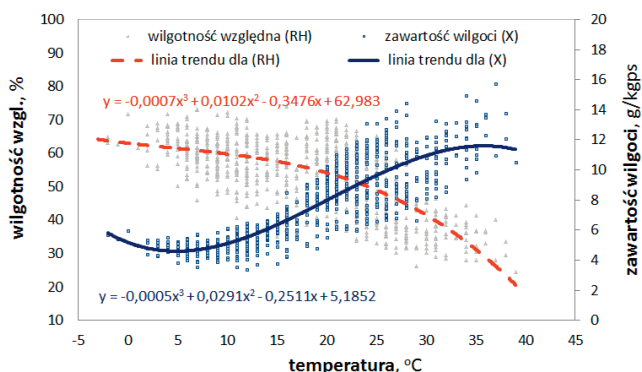


Rys. 6.17. Diagramy korelacyjne wskaźników  $w_{nz}$  w funkcji wilgotności względnej powietrza (a, c) oraz udziału wilgoci w powietrzu (b, d) z uwzględnieniem procesu starzenia się izolacji uzwojeń fazy B

### 6.3. Wpływ zapylenia na emisję $w_{nz}$

W hali, w której pracuje silnik SE-1, stopień zapylenia powietrza wynika z charakteru procesu technologicznego realizowanego w pobliżu pomieszczenia pracy silnika oraz cech systemu przewietrzania (chłodzenia) silnika. Źródłem zanieczyszczenia jest emisja pyłu pochodząca z nieszczelności urządzeń technologicznych. Pracy układu technologicznego towarzyszy zjawisko indukcji powietrza wzdłuż całej drogi transportu wewnątrz pracujących urządzeń. Tworzo-

ne w tym układzie nadszczelnienie skutkuje wydobywaniem się pyłu przez wszelkiego rodzaju nieszczelności i otwory w obudowie.



Rys. 6.18. Wpływ temperatury na zmianę wilgotności względnej i udziału wilgoci w powietrzu wilgotnym w okresie prowadzenia badań

Stężenie pyłu w powietrzu hali pracującego silnika SE-1 jest skutkiem przedostającego się pyłu oraz intensywnej cyrkulacji powietrza wywołanej pracą systemu przewietrzania silnika. Podczas pracy silnika wzrasta prędkość powietrza do poziomu, przy którym następuje unoszenie pyłu i rozprzestrzenianie go po pomieszczeniu. Zanieczyszczenie występuje w powietrzu w postaci rozproszonej, tworząc z powietrzem wielofazowy układ, w którym powietrze jest ośrodkiem dyspersyjnym, a zanieczyszczenie stanowi fazę rozproszoną w tym ośrodku. Pył cementowy należy traktować jako zanieczyszczenie cząstkami stałymi, które rozproszone w powietrzu tworzy układ zwany aerozolem. W unoszonym pyłe należy wyróżnić dwie frakcje: lżejszą i cięższą. Fazę lżejszą stanowią aerozole o średnicy ziaren mniejszych niż  $2\mu\text{m}$ , cięższą – o średnicy większej niż  $2\mu\text{m}$ . Faza lżejsza tworzy stabilny układ wielofazowy z powietrzem. Cięższe frakcje są okresowo unoszone, a następnie w obszarach kubatury pomieszczenia, w których prędkość jest mniejsza, wykazują tendencję do szybkiego opadania.

Pył zawieszony w powietrzu dostaje się do wnętrza silnika w wyniku pracy układu chłodzenia. Część tego pyłu jest usuwana na zewnątrz silnika wraz z powietrzem wywiewanym. Część pyłu cięższego, w wyniku przepływu przez wąskie i kręte kanały, w których dochodzi do zmniejszenia prędkości poniżej tak zwanej prędkości unoszenia, osadza się w szczelinach, tworząc wewnętrzne ogniska zanieczyszczeń. Pył pozostający wewnątrz obudowy często ulega jeszcze powolnemu przemieszczaniu się do miejsc, w których gromadzenie jest szczególnie ułatwione. Są to różnego rodzaju szczeliny i miejsca przez które nie przepływa powietrze chłodzące. W momencie zatrzymania pracy silnika, część tego pyłu opada w dolną część obudowy stojana i wirnika. Przy kolejnym uruchomieniu silnika ten pył jest ponownie wyrzucony na zewnątrz obudowy silnika wraz z powietrzem chłodzącym. Mechanizm ten jest odpowiedzialny za

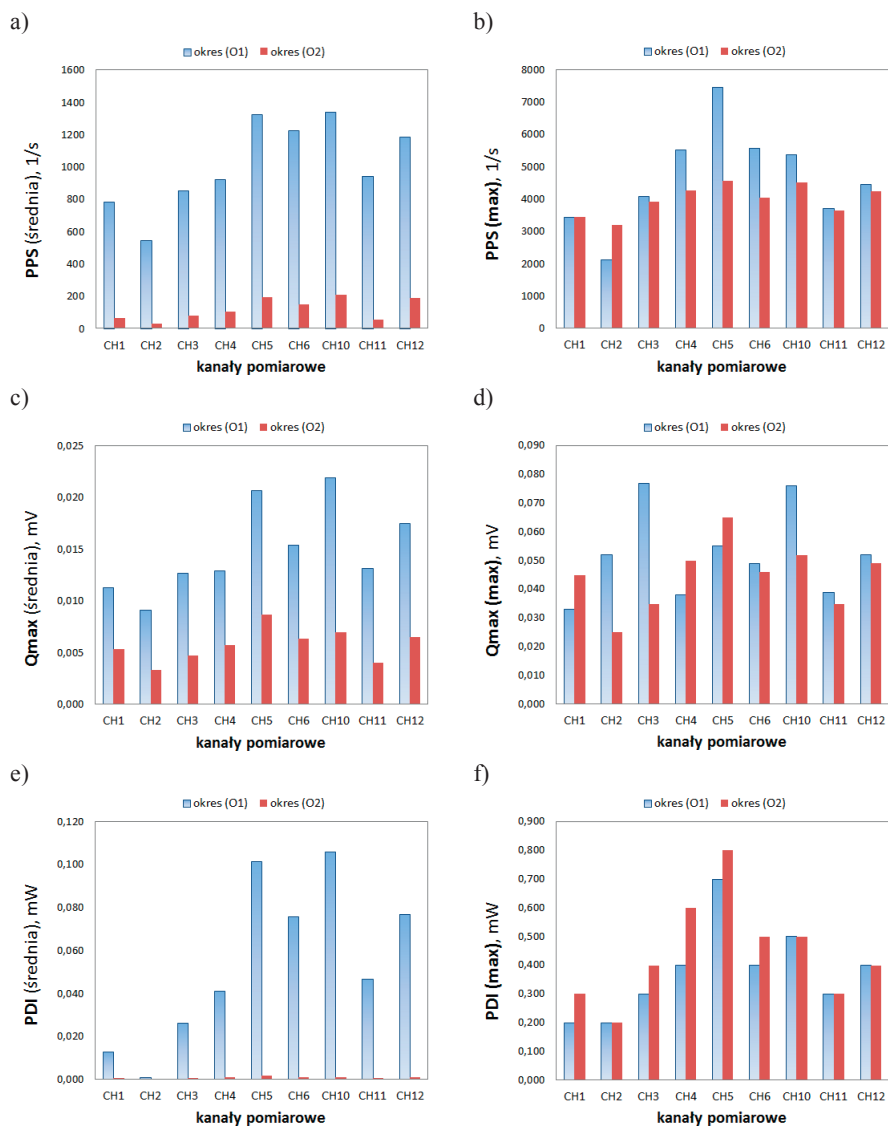
wzrost stężenia pyłu w powietrzu w pierwszym okresie po uruchomieniu silnika (wykazano to w rozdziale 5 przy okazji prezentowania wyników pomiaru stężenia pyłu w powietrzu hali).

Narażenie silnika na pracę w takich warunkach prowadzi do wzrostu temperatury uzwojeń z powodu pogorszenia warunków wymiany ciepła. Przy dużej wilgotności powietrza dochodzi do zjawiska polegającego na absorpcji wilgoci przez układ izolacyjny oraz pył, a to prowadzi do tworzenia się osadu cementowego na powierzchni izolacji uzwojeń. Zbyt niska wilgotność sprzyja zjawiskom powstawania niezrównoważonych ładunków elektrycznych na materiałach o małej przewodności elektrycznej, w tym również cząstkach pyłu. Ponadto w powietrzu tworzą się atomy lub cząstki naładowane elektrycznie (jony) poprzez odłączenie lub dołączenie pojedynczych elektronów, które z kolei wykazują skłonność do elektryzowania aerozoli.

Omówione powyżej zjawiska mają łączny wpływ na okresową zmianę w aktywności wyładowań niepełnych w badanym silniku. Zmiany te zostały dostrzeżone przy omawianiu wyników pomiaru wyładowań niepełnych silnika SE-1 w rozdziale 5. Poniżej przedstawiono w postaci tabelarycznej i rysunkowej ilościowy i jakościowy wpływ systematycznego oczyszczania silnika na wielkość emisji *wnz* (tabela 6.1 i rys. 6.19).

**Tabela 6.1.** Wpływ zmniejszonego zabrudzenia silnika pyłem cementowym na emisję *wnz*

Nazwa faza	CH1 B	CH2 A	CH3 C	CH4 C	CH5 A	CH6 B	CH10 C	CH11 A	CH12 B
<b>PPS, 1/s</b>									
średnia (O1)	785,7	548,8	854,6	927,1	1326,4	1227,6	1343,6	943,6	1189,2
średnia (O2)	61,9	30,0	80,0	104,8	190,7	149,6	208,9	53,1	188,8
redukcja	92,1%	94,5%	90,6%	88,7%	85,6%	87,8%	84,5%	94,4%	84,1%
maks. (O1)	3 457	2 140	4 080	5 539	7 463	5 586	5 385	3 724	4 454
maks. (O2)	3 439	3 188	3 928	4 277	4 570	4 030	4 514	3 638	4 247
redukcja	0,5%	-49,0%	3,7%	22,8%	38,8%	27,9%	16,2%	2,3%	4,6%
<b>Q<sub>max</sub>, mV</b>									
średnia (O1)	0,0113	0,0092	0,0127	0,0130	0,0207	0,0154	0,0220	0,0132	0,0175
średnia (O2)	0,0053	0,0033	0,0047	0,0057	0,0087	0,0063	0,0070	0,0040	0,0065
redukcja	53,0%	63,8%	62,9%	55,9%	58,0%	59,0%	68,3%	69,6%	62,8%
maks. (O1)	0,0330	0,0520	0,0770	0,0380	0,0550	0,0490	0,0760	0,0390	0,0520
maks. (O2)	0,0450	0,0250	0,0350	0,0500	0,0650	0,0460	0,0520	0,0350	0,0490
redukcja	-36,4%	51,9%	54,5%	-31,6%	-18,2%	6,1%	31,6%	10,3%	5,8%
<b>PDI, mW</b>									
średnia (O1)	0,0129	0,0011	0,0263	0,0412	0,1016	0,0759	0,1059	0,0467	0,0769
średnia (O2)	0,0005	0,0003	0,0006	0,0010	0,0019	0,0011	0,0012	0,0006	0,0010
redukcja	95,9%	73,4%	97,6%	97,6%	98,1%	98,5%	98,8%	98,8%	98,7%
maks. (O1)	0,2000	0,2000	0,3000	0,4000	0,7000	0,4000	0,5000	0,3000	0,4000
maks. (O2)	0,3000	0,2000	0,4000	0,6000	0,8000	0,5000	0,5000	0,3000	0,4000
redukcja	-50,0%	0,0%	-33,3%	-50,0%	-14,3%	-25,0%	0,0%	0,0%	0,0%



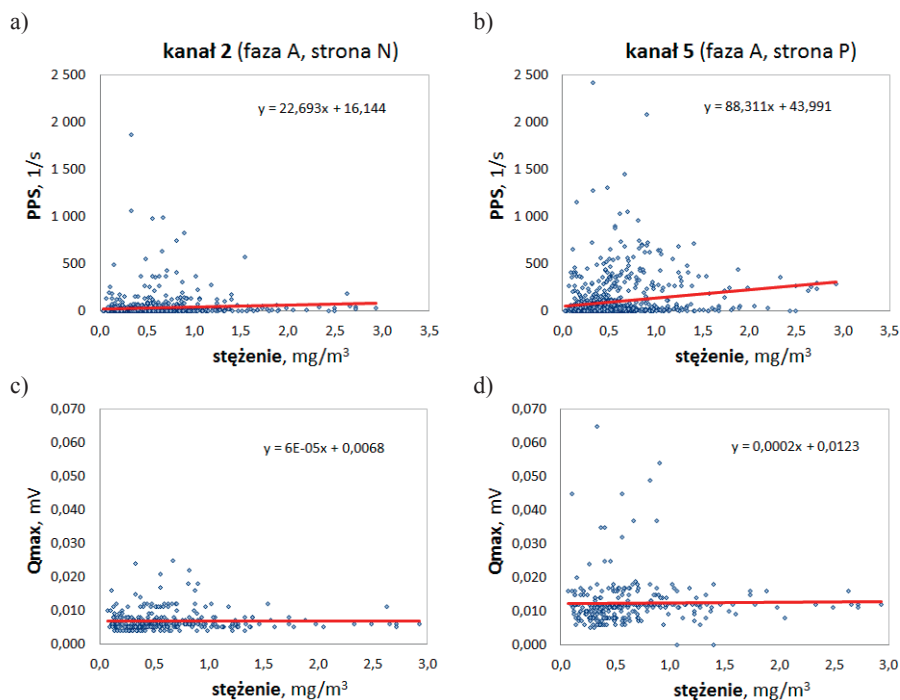
**Rys. 6.19.** Wpływ obniżenia zapylenia na średnie (a,c,e) i maksymalne (b,d,f) wartości mierzonych wskaźników *wnz* w poszczególnych kanałach pomiarowych (CH)

Z analizy prezentowanych wyników wypływa wniosek o znaczącym wpływie oddziaływania pyłu cementowego na aktywność *wnz*. Przedstawione w tabeli 6.1 wartości średnie wskaźników *wnz* uległy poważnemu obniżeniu. Najwięcej obniżyła się moc wyładowań PDI – średnio o 95÷98%, następnie ilość wyładowań PPS – między 85 a 94%. Najmniejsze obniżenie osiągnął wskaźnik  $Q_{max}$  – 53÷69%. Zmniejszenie wartości średniej wskaźników *wnz* świadczy o

ograniczeniu uciążliwości wynikającej z zapylenia. Zróznicowanie stopnia redukcji wskaźników  $w_{nz}$  w poszczególnych kanałach pomiarowych dowodzi o występowaniu we wnętrzu silnika warunków lokalnych. Prawdopodobnie to świadczy o niezachowaniu identycznej skuteczności oczyszczania wszystkich obszarów i elementów silnika.

Bardzo wyraźne obniżenie wartości średnich wskaźników  $w_{nz}$  to efekt bardzo pożądaný. Ocena efektu zmniejszenia wartości maksymalnych wskaźników  $w_{nz}$  nie jest już tak jednoznaczna. Jedyne wskaźnik PPS uległ zmniejszeniu we wszystkich mierzonych kanałach pomiarowych. Pozostałe wskaźniki osiągają redukcję wartości maksymalnych jedynie w części kanałów. W pozostałych obserwuje się wzrost emisji wyładowań i często jest to wzrost bardzo wyraźny (nawet o 50%). Na wzrost maksymalnych wartości wskaźnika  $Q_{max}$  i PDI mogą mieć wpływ zdarzenia losowe związane z występowaniem innych obciążeń, np. drgań mechanicznych czy chwilowych zmian obciążenia.

Autor przeprowadził również analizę oceny bezpośredniego wpływu zapylenia powietrza na wielkość emisji  $w_{nz}$  mierząc zapylenie w trakcie pracy silnika. Przykładowe wyniki tej analizy przedstawiono na rysunku 6.20. Na podstawie uzyskanych wyników trudno jednak o formułowanie wniosków związanych z występowaniem jakiejś korelacji – uzyskane współczynniki korelacji wzajemnej *Pearsona* osiągnęły wartości poniżej 0,1.



Rys. 6.20. Wpływ stężenia pyłu na zmianę wskaźników  $w_{nz}$  w izolacji uzwojeń fazy A na podstawie pomiarów wykonanych po stronie N (a, c) oraz P (b, d)

Podsumowując tę część rozważań można stwierdzić, że występuje związek między zapyleniem środowiska w jakim pracuje silnik a emisją wyładowań niezupełnych. Nie jest to jednak związek prosty. Na tym etapie badań nie wykazano bowiem zależności bezpośredniej między stopniem zapylenia powietrza w pomieszczeniu a emisją *wnz*. Pośrednio wykazano jednak efekt redukcji aktywności *wnz* dzięki stosowaniu czyszczenia wnętrza silnika. Zaobserwowana prawidłowość pozwala przypuszczać, że duży udział zapylenia wewnątrz silnika wraz ze zjawiskami, jakie temu towarzyszą, wpływa raczej na wzrost aktywności powierzchniowej *wnz*. Wzrost aktywności *wnz* wewnątrz izolacji jest raczej zjawiskiem towarzyszącym jedynie wówczas, kiedy zapylenie ma wpływ na zmianę warunków wymiany ciepła w silniku, prowadząc w konsekwencji do lokalnych zmian temperatury uzwojeń.

#### 6.4. Wpływ drgań mechanicznych na emisję *wnz*

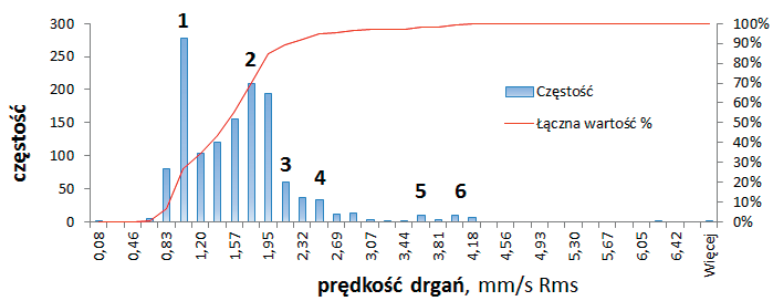
Drgania mechaniczne są nieodzowną cechą pracy maszyn wirujących [16, 17, 128, 139, 151, 155, 159]. W zależności od celu pomiaru oraz typów badanych maszyn, podstawowe znaczenie mają przebiegi czasowe przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań. Dla ogólnej oceny maszyny wirującej istotna jest wartość skuteczna (RMS) prędkości drgań, która w znacznym stopniu odzwierciedla energię niszczącą [83, 105, 159]. W celu wyznaczenia związku między poziomem drgań mechanicznych a emisją *wnz* w silniku SE-1 wykorzystano ten parametr, mierząc wartość skuteczną prędkości drgań stojana. Pomiaru dokonano przy wykorzystaniu aparatury pomiarowej opisanej w rozdziale 3. Czujnik drgań umieszczono na obudowie zewnętrznej stojana. Lokalizację dla zabudowy czujnika drgań wskazano po dokonaniu rozpoznania miejsc szczególnie narażonych na wielkość drgań. Ostatecznie wybrano miejsce charakteryzujące się największą wartością skuteczną prędkości drgań mechanicznych, jaką zmierzono na obudowie.

Zmierzenie RMS drgań najczęściej wiąże się z odniesieniem wartości pomiarowych do wartości granicznych podanych dla danej grupy maszyn. Dzięki temu możliwa jest ocena stanu dynamicznego urządzenia [160, 162, 163]. W tym przypadku cel jest inny. Ważną cechą prowadzonych badań było zapewnienie pomiaru prędkości drgań oraz wielkości emisji *wnz* w tym samym momencie. Biorąc pod uwagę fakt, iż pomiary były realizowane za pomocą dwóch różnych zestawów pomiarowych oraz to, że pomiar emisji *wnz* był realizowany w sposób ciągły już od znacznie dłuższego czasu, przyjęto pewną zasadę. Zegar układu pomiarowego do pomiaru drgań został zsynchronizowany z zegarem układu do pomiaru emisji *wnz*. Ponadto do analizy przyjmowano wartość skuteczną prędkości drgań wyznaczoną jako średnią z okresu 10 min poprzedzających pomiar emisji *wnz*.

Wyniki pomiarów wraz z ich analizą przedstawiono na rysunkach 6.21 i 6.22. Miarę położenia elementów oraz miarę zmienności położenia wartości prędkości skutecznej drgań mechanicznych stojana przedstawiono w postaci

histogramu i funkcji łącznego udziału procentowego zmian (rys. 6.21). Z uzyskanego rozkładu prędkości wynika, że występuje duża zmienność prędkości drgań obudowy stojana: od 0 do 6,5 mm/s. Częstość występowania niektórych prędkości wskazuje, że są to pewne wartości charakterystyczne. Pierwszą z nich jest prędkość 1,0 mm/s (1), następnie 1.8 (2), 2.1 (3), 2.5 (4), 3.6 (5) i 4,0 mm/s (6). Pierwsza i druga prędkość odpowiada wartościom, które występują najczęściej. Pozostałe, mimo małej częstości występowania, wskazują na istnienie pewnej zależności między prędkością drgań a emisją *wnz*.

Na rysunku 6.22 dokonano porównania funkcji gęstości prędkości drgań mechanicznych oraz relacji wzajemnej między prędkością skuteczną drgań i wskaźnikami oceniającymi aktywność *wnz*. Wpływ najczęściej występującej prędkości drgań (1) na emisję *wnz* jest znikomy. Przy drugiej prędkości (2) wyraźnie obserwuje się wyższy poziom wskaźnika PPS i  $Q_{max}$ . Najwyższy poziom wskaźników PPS,  $Q_{max}$  i PDI występuje przy zmianie prędkości od 1 do 1,8 mm/s. Świadczy to zatem raczej o wpływie zmian prędkości drgań mechanicznych na emisję *wnz*, aniżeli samej wartości prędkości drgań. Widać to wyraźnie w przypadku pozostałych prędkości drgań (3)-(6), które występują stosunkowo rzadko, a mimo to emisja *wnz* jest przy nich wyraźnie na wyższym poziomie. Prawidłowość ta jest dobrze widoczna przy prędkości skutecznej drgań zbliżonej do 4,0 mm/s. W tym przypadku rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia większych wartości wskaźników *wnz*.

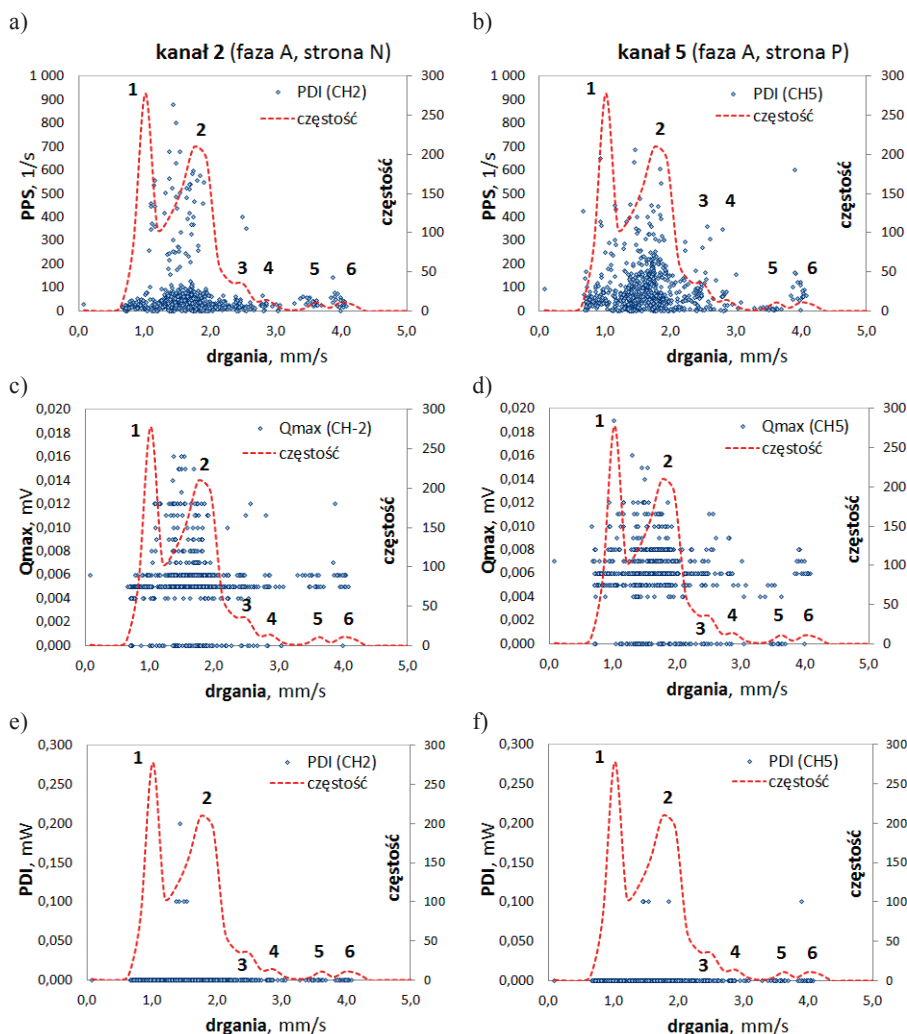


**Rys. 6.21.** Histogram zmian prędkości skutecznej drgań stojana dla danych zarejestrowanych w okresie od 01.04.2012 r. do 31.06.2012 r.

Długotrwałe oddziaływanie drgań mechanicznych na elementy izolacji uzwojeń powoduje wzrost przewodnictwa oraz zmniejszanie stopnia uporządkowania struktur wewnętrznych materiału izolacyjnego [65, 66, 131, 213]. Takie procesy na ogół sprzyjają rozwojowi drzewienia elektrycznego na granicy faz zastosowanych komponentów materiałowych, a to jest rejestrowane przez układ pomiarowy jako wzrost emisji *wnz*. Prawdopodobnie procesy takie następują również w izolacji badanego silnika, ale potwierdzenie takich przypuszczeń wymaga jednak dłuższego okresu obserwacji.

Ocenianie jakościowego wpływu drgań mechanicznych na wielkość emisji *wnz* w izolacji uzwojeń w warunkach przemysłowej eksploatacji silnika wyma-

ga prowadzenia długotrwałych eksperymentów. Przeprowadzone przez autora badania na tym etapie nie uprawniają jeszcze do formułowania jednoznacznych wniosków. Stanowią jednak potwierdzenie zasadności podjęcia tej tematyki. Kontynuacja prowadzenia badań w tym względzie pozwoli w przyszłości dokonać pełniejszej analizy wpływu drgań mechanicznych na emisję *wnz* z uwzględnieniem również innych parametrów drgań aniżeli tylko prędkości skutecznej drgań.



Rys. 6.22. Diagram korelacyjny wskaźników *wnz* zarejestrowanych w izolacji uzwojeń fazy A po stronie N (a, c, e) oraz P (b, d, f) w funkcji drgań mechanicznych obudowy stojana



## 6.5. Analiza wieloparametryczna

Analiza wpływu poszczególnych parametrów mikroklimatu na emisję *wnz* pozwoliła wskazać trendy, jakie się kształtują między tymi parametrami a wskaźnikami oceniającymi poziom wyladowań niepełnych w izolacji badanych maszyn. Wykazując te zależności wskazano jednocześnie na możliwość ograniczania wielkości emisji *wnz* poprzez wskazanie warunków mikroklimatu, przy których poziom emisji *wnz* jest najmniejszy. Można tego dokonać indywidualnie, analizując wpływ poszczególnych parametrów mikroklimatu. Chcąc jednak zachować należytą staranność oceny oraz mając na względzie wskazanie zalecanych warunków mikroklimatycznych dla eksploatacji maszyn, autor proponuje przeprowadzenie analizy wpływu mikroklimatu na wielkość emisji *wnz* łącznie trzech parametrów mikroklimatu, tj. temperatury, wilgotności względnej oraz zawartości wilgoci w powietrzu.

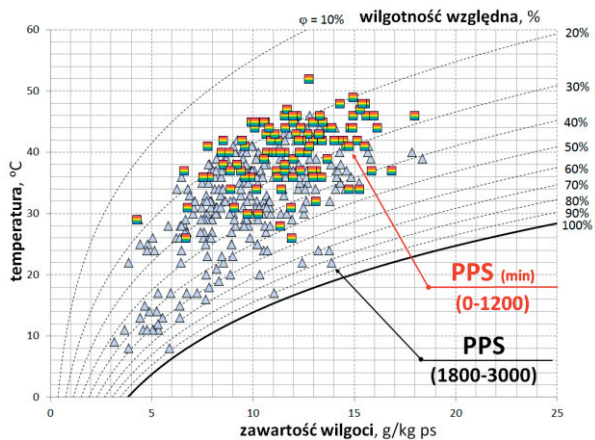
Dokonanie oceny wpływu mikroklimatu na emisję *wnz* w sposób uwzględniający łączne oddziaływanie powyższych parametrów najlepiej jest przedstawić na wykresach psychometrycznych powietrza wilgotnego. W tym celu dane pomiarowe pogrupowano względem wartości poszczególnych wskaźników oceny *wnz*, przyjmując kryterium podziału na cztery grupy. Tak podzielone dane nanesiono na wykresy psychometryczne, różnicując je kolorem i kształtem znaczników. Dla zapewnienia czytelności prezentowania wyników na wykresach przedstawiono po trzy lub dwa, w przypadku silnika SE-1, zakresy dla każdej z badanych wielkości. W ten sposób otrzymano obszary występowania wskaźników o zbliżonej wartości. Poniżej przedstawiono i omówiono uzyskane wyniki tak przeprowadzonej analizy.

### 6.5.1. Wyznaczenie obszarów występowania zróżnicowanej aktywności *wnz* ze względu na wskaźnik PPS

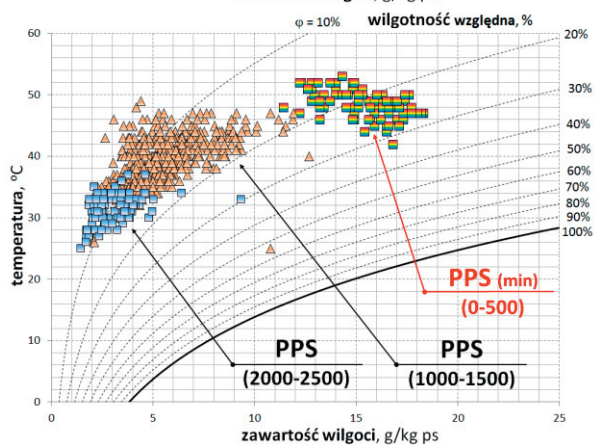
Wyniki grupowania danych pomiarowych względem liczebności wyladowań (PPS) przedstawiono na rysunku 6.23. Dla każdej z badanych maszyn obszar występowania zbliżonych wartości wskaźnika PPS występuje w nieco innym miejscu wykresu. Obszary te różnią się pod względem kształtu, wymiarów oraz gęstości występowania danych w badanym obszarze. Dodatkową cechą jest wzajemne przenikanie tych obszarów.

Występowanie obszarów o najbardziej zwartym kształcie i dużej gęstości jest cechą charakterystyczną silnika SE-2. Obszar występowania najmniejszych wartości PPS jest stosunkowo mały i zawiera się między temperaturą 42 i 53°C oraz między udziałem wilgoci w powietrzu 12 i 18 g/kgps. Odpowiada to zmianie wilgotności względnej w przedziale 15 i 30%. Obszar ten wyraźnie odstaje od pozostałych obszarów, w których wyladowania są znacznie aktywne. Wyraźny jest również obszar występowania wzmożonej aktywności *wnz*, który mieści się w granicach 25÷35°C, 2÷5 g/kgps oraz 5÷15%. Z tego punktu widzenia warunki mikroklimatyczne w tym obszarze najbardziej sprzyjają generacji wyladowań.

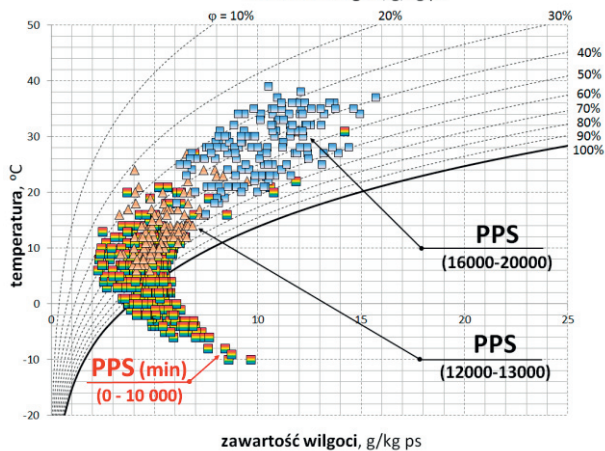
a)



b)

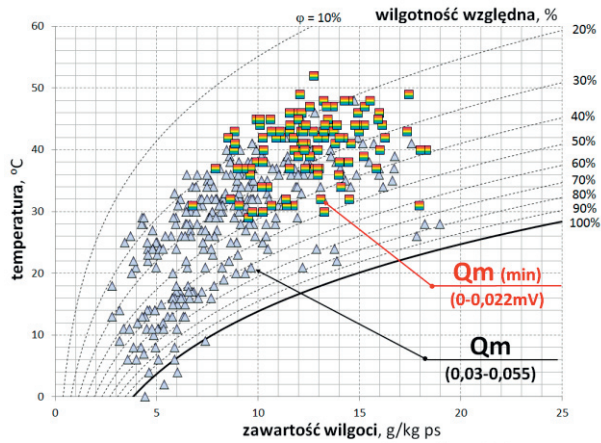


c)

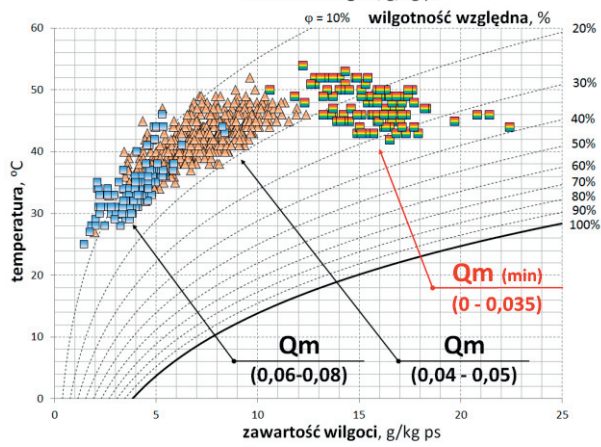


Rys. 6.23. Obszary występowania różnej aktywności  $w_{nz}$  ze względu na wskaźnik PPS:  
 a) silnik SE-1, b) silnik SE-2, c) generator SE-3

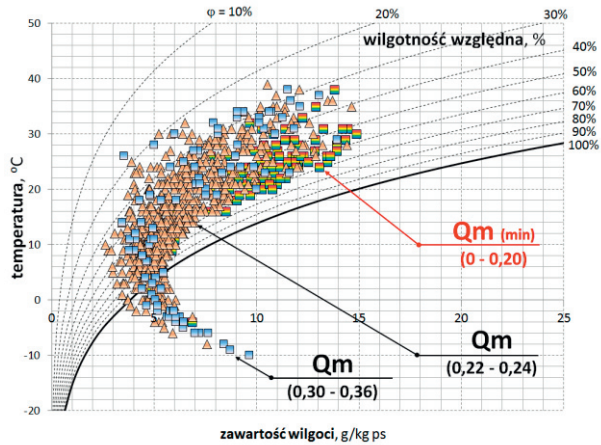
a)



b)

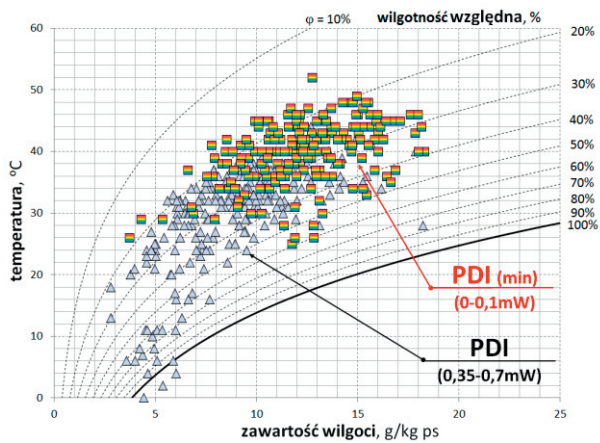


c)

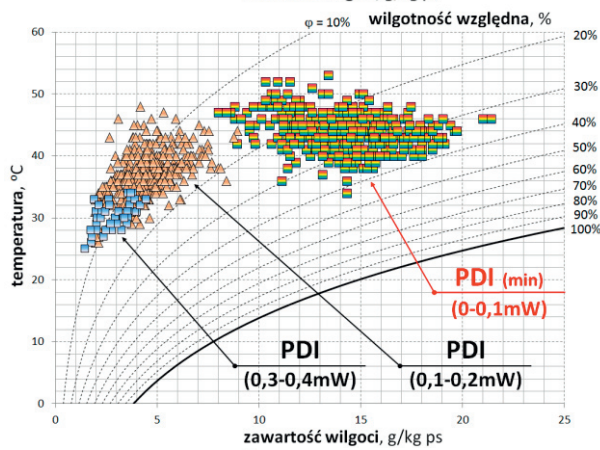


Rys. 6.24. Obszary występowania różnej aktywności  $w_{nZ}$  ze względu na wskaźnik  $Q_{max}$ :  
 a) silnik SE-1, b) silnik SE-2, c) generator SE-3

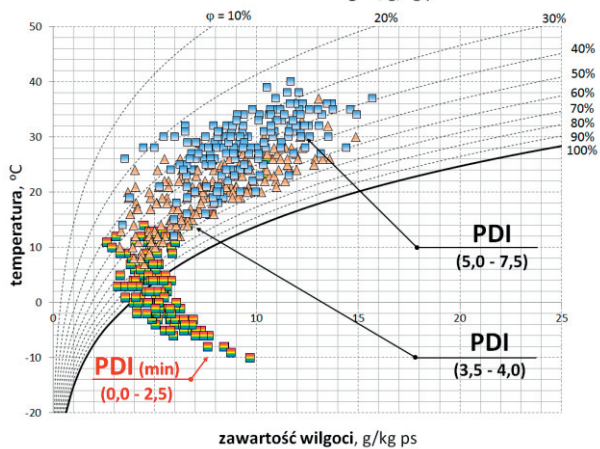
a)



b)



c)



Rys. 6.25. Obszary występowania różnej aktywności *w<sub>nz</sub>* ze względu na wskaźnik PDI:  
 a) silnik SE-1, b) silnik SE-2, c) generator SE-3



W przypadku generatora SE-2 obszary występowania podobnych wartości PPS są również bardzo wyraźne. Trudniejszym jednak w interpretacji jest fakt nakładania się obszarów odpowiadających najniższemu i średniemu poziomowi wartości wskaźnika PPS. Należy uznać, że w nakładającym się obszarze występują jeszcze inne czynniki, które decydują o poziomie emisji *wnz*. Tymi czynnikami mogą być, np. ciśnienie atmosferyczne, wiatr, promieniowanie słoneczne oraz opady atmosferyczne w przypadku parametrów klimatycznych oraz względy eksploatacyjne wynikające na przykład z szybkich zmian obciążenia. Za najkorzystniejsze warunki klimatyczne dla poprawnej pracy generatora należy uznać przedział od 0 do 10°C w zakresie temperatury, od 2 do 6g/kgps w zakresie wilgotności bezwzględnej oraz od 30 do 100% w zakresie wilgotności względnej. Obszar znikomej aktywności *wnz* w warunkach występowania kondensacji pary wodnej (obszar poniżej krzywej nasycenia  $\varphi=100\%$ ) należy odrzucić jako zalecany do pracy. Za główną przyczynę należy uznać względy bezpieczeństwa. W tych warunkach istnieje zagrożenie powstania przebiec i przepięć wywołanych złym stanem technicznym izolacji lub nieszczelnością obudowy.

Silnik SE-1 cechuje również wrażliwość na warunki mikroklimatyczne. Wraz ze zmianą temperatury i wilgotności zmienia się aktywność *wnz*. Wyznaczenie w tym przypadku wyraźnych granic dla występujących wartości wskaźnika PPS jest bardzo trudne. Wyniki te zdają się potwierdzać obserwacje poczynione już na etapie analizowania bezpośrednich oddziaływań parametrów mikroklimatu. Izolacja uzwojeń tego silnika w mniejszym stopniu wykazuje wrażliwość na zmianę temperatury i wilgotności. Wykazuje natomiast istotną wrażliwość na częste zmiany obciążenia, stopień zanieczyszczenia oraz drgania mechaniczne. Niemniej tu również można wskazać obszar występowania parametrów mikroklimatycznych, przy których emisja *wnz* jest na bardzo niskim poziomie. Dla badanego silnika jest to temperatura zmieniająca się w zakresie 30 do 40°C, wilgotność bezwzględna między 10 i 15 g/kgps oraz wilgotność względna w przedziale od 20 do 40%.

### **6.5.2. Wyznaczenie obszarów występowania zróżnicowanej aktywności *wnz* ze względu na wskaźnik $Q_{\max}$**

Na rysunku 6.24 przedstawiono wyznaczone obszary występowania zbliżonych wartości wskaźnika  $Q_{\max}$  dla badanych maszyn elektrycznych. W przypadku silników SE-1 i SE-2 uzyskano wykresy bardzo zbliżone do tych, które otrzymano przy okazji oddziaływania wskaźnika PPS. Podobieństwo dotyczy zarówno wielkości i kształtów uzyskanych obszarów, jak również rozkładu gęstości. W mocy także pozostają wskazane poprzednio przedziały parametrów mikroklimatu.

W przypadku generatora SE-3 uzyskano zupełnie inny obraz. Główna różnica polega na braku możliwości wskazania granicy między przedziałami środkowych i wysokich wartości  $Q_{\max}$ . W całym obszarze występowania wskaźnika pojawiają się obok siebie wartości o odmiennych wartościach. Ważną obserwacją

cją jest zmiana położenia obszaru występowania wartości minimalnych  $Q_{\max}$ . Występują one przy temperaturach i wilgotnościach powietrza odpowiednio z przedziałów: od 15 do 35°C, od 8 do 15 g/kgps oraz od 40 do 80%. Obszar występowania wartości minimalnych w tym zakresie zbliżył się do obszarów wyznaczonych dla silników SE-1 i SE-2. Biorąc pod uwagę odmienność konstrukcyjną badanych maszyn oraz różnice we właściwościach zastosowanych materiałów izolacyjnych oraz ich zróżnicowany stan techniczny, podobieństwo wynika z wpływu temperatury powietrza na zmniejszenie się wielkości i głębokości degradacji izolacji w najgorszym miejscu badanego uzwojenia w wyniku rozszerzalności objętościowej zastosowanych materiałów.

### **6.5.3. Wyznaczenie obszarów występowania zróżnicowanej aktywności *wnz* ze względu na wskaźnik PDI**

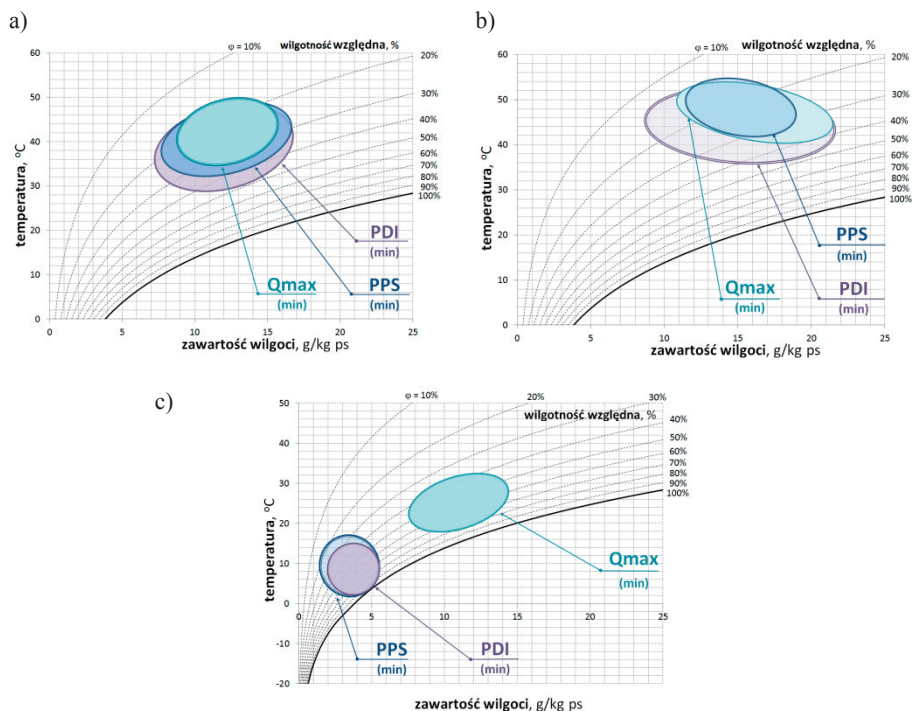
Zmiany wartości mocy wyładowań PDI na tle zmieniających się parametrów mikroklimatu przedstawiono na rysunku 6.25. Wykres psychometryczny wskazuje obszary występowania wzmożonej i osłabionej aktywności *wnz*. Uzyskane wyniki są bardzo zbliżone do wyznaczonych dla wskaźnika PPS. Drobne różnice występują jedynie w wymiarach obszarów ograniczających występowanie poszczególnych poziomów wartości.

### **6.5.4. Wyznaczenie zalecanych warunków mikroklimatycznych dla pracy maszyn elektrycznych**

Uzyskane wyniki analizy wieloparametrycznej dowodzą istnienia takich warunków mikroklimatycznych, w których poziom aktywności *wnz* może zostać zredukowany do bardzo niskiego poziomu. Ważne jest, aby warunki mikroklimatyczne, przy których następuje wyraźna redukcja emisji *wnz* nie wpływały negatywnie na pozostałe parametry eksploatacyjne maszyn elektrycznych. Chodzi tu głównie o zachowanie wysokiej sprawności przy jednoczesnym realizowaniu nadrzędnej funkcji, jaką jest zapewnienie wymaganego momentu napędowego. Niedopuszczalne jest również przekraczanie maksymalnej temperatury uzwojeń określonych przez producenta.

Jak wykazały przeprowadzone badania, każda z badanych maszyn posiada nieco inne cechy związane z oddziaływaniem warunków mikroklimatycznych na emisję *wnz*. Polegają one na tym, iż w ściśle określonej temperaturze i wilgotności powietrza następuje jakościowa redukcja poziomu wyładowań niezupełnych. Redukcja poszczególnych wskaźników *wnz* następuje przy nieco innych parametrach mikroklimatycznych. Biorąc pod uwagę wszystkie opisane wyżej uwarunkowania, obszar zalecanych parametrów środowiskowych proponuje się ustalić poprzez wyznaczenie części wspólnej obszarów określonych indywidualnie dla każdego ze wskaźników emisji *wnz*. Jedynie w przypadku generatora SE-3 taki sposób jest niemożliwy do zastosowania. Przy wyborze zalecanych warunków mikroklimatu dla tej maszyny wykorzystano część

wspólną obszarów wyznaczonych dla wskaźnika PPS i PDI. Wyniki tak przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunku 6.26.



**Rys. 6.25.** Wyznaczenie zalecanych parametrów mikroklimatu ze względu na emisję *wnz*: a) silnik SE-1, b) silnik SE-2, c) generator SE-3

## 6.6. Wnioski

Przeprowadzona analiza wpływu wybranych wielkości mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych w izolacji maszyn elektrycznych w warunkach ich przemysłowej eksploatacji dostarczyła szeregu ważnych spostrzeżeń. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- Wyznaczenie korelacji wzajemnej określającej wpływ każdego parametru mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych. Wyznaczone według metody *Pearsona* wartości współczynników korelacji wzajemnej dostarczają informacji o jakości tych zależności. Dla przebadanych maszyn wyznaczone wartości współczynników zestawiono w tabeli 6.2. Na ich podstawie można stwierdzić między innymi to, iż każda z badanych maszyn wykazuje w tym względzie inne właściwości. Izolacja uzwojeń silnika SE-1 w najmniejszym stopniu wykazuje cechy izolacji, w której emisja *wnz* zależy od warunków mikroklimatycznych. Emisja *wnz* w izolacji tego silnika wyraźnie wzrasta, gdy spada wilgotność względna powietrza poniżej 20%. Pozostałe maszyny są wyposażone w izolację uzwojeń silnie reagują-

cą na zmiany mikroklimatu. W przypadku silnika SE-2, mimo zamkniętej budowy i stosunkowo małych zmian mikroklimatu, aktywność *wnz* w bardzo dużym stopniu zależy od warunków środowiskowych.

- Możliwość redukcji emisji *wnz* poprzez zapewnienie temperatury i wilgotności powietrza sprzyjających obniżeniu aktywności wyładowań niepełnych. Dla każdej z badanych maszyn zostały określone granice parametrów mikroklimatycznych, przy których emisja *wnz* nie powinna przekroczyć 25% obecnego zakresu zmian aktywności *wnz*. Wyniki tak przeprowadzonej analizy dla każdej z badanych maszyn przedstawiono w tabeli 6.3. Zapewnienie warunków mikroklimatycznych w podanym zakresie, zdaniem autora pozwoli znacznie wydłużyć czas bezawaryjnej eksploatacji tych maszyn. Aby zapewnić wymagane warunki cieplno-wilgotnościowe, niezbędna jest praca urządzeń grzewczo-wentylacyjnych realizujących algorytm zapewniający stabilizację tych warunków na zadanym poziomie.
- Zwrócono uwagę na prawidłowe funkcjonowanie układu chłodzenia maszyn elektrycznych. Dotyczy to głównie maszyn pracujących w układzie otwartym. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że w pomieszczeniach pracujących maszyn dochodzi do intensywnych zjawisk cieplno-przepływowych będących skutkiem pracy silnika i oddziaływań zewnętrznych. Ich skutkiem jest nierównomierność rozkładu temperatury, zmienność wektorowego pola prędkości. Zjawiska te mogą doprowadzić do zaburzenia pracy układu chłodzenia. Może dojść np. do nierównomiernego chłodzenia części uzwojeń silnika. Zjawiska te mogą również prowadzić do wzrostu stężenia pyłu przemysłowego w pomieszczeniu pracy tych maszyn.
- Nie udało się wykazać prostej zależności między stopniem zapylenia powietrza w pomieszczeniu a emisją *wnz*. Pośrednio wykazano jednak efekt redukcji aktywności *wnz* dzięki stosowaniu czyszczenia wnętrza silnika. Zaobserwowana prawidłowość pozwala przypuszczać, że duży udział zapylenia wewnątrz silnika wraz ze zjawiskami im towarzyszącymi wpływa na wzrost powierzchniowej aktywności *wnz*. Wzrost emisji *wnz* wewnątrz izolacji jest raczej zjawiskiem towarzyszącym. Występuje ono wówczas, kiedy wzrost zapylenia ma wpływ na zmianę warunków wymiany ciepła w silniku, prowadząc do nadmiernego wzrostu temperatury uzwojeń.
- Podjęto próbę oceny wpływu drgań mechanicznych na wielkość emisji *wnz* w jednym z badanych silników. Wykazała ona istnienie pewnych zależności, ale nie pozwoliła niestety na jakościową ocenę tego wpływu, ze względu na zbyt krótki okres prowadzonych badań i ich zakres. Badania te są nadal prowadzone, a ich zakres jest systematycznie rozszerzany celem dokonania takiej analizy w okresie późniejszym.



**Tabela 6.2.** Wpływ mikroklimatu na emisję *wnz* w izolacji uzwojeń badanych maszyn

Lp.	Parametr	SE-1	SE-2	SE-3
1.	typ	<b>SYUe-148r</b>	<b>AMS 800 LC</b>	<b>HXRG 450</b>
2.	klasa izolacji	B - 130°C	F - 155°C	F - 155°C
		korelacja wg <i>Pearsona</i>	korelacja wg <i>Pearsona</i>	korelacja wg <i>Pearsona</i>
3.	wpływ temperatury (T)			
	PPS = f(T)	ujemna (0,3 ÷ 0,4)	ujemna (0,8 ÷ 0,9)	dodatnia (0,8 ÷ 0,9)
	Q <sub>max</sub> = f(T)	ujemna (0,4 ÷ 0,6)	ujemna (0,2 ÷ 0,7)	mieszana (- 0,3 ÷ 0,3)
	PDI = f(T)	ujemna (0,3 ÷ 0,4)	ujemna (0,8 ÷ 0,9)	dodatnia (0,7 ÷ 0,8)
4.	wpływ wilgotności wzgl. (RH)			
	PPS = f(RH)	dodatnia (0,1 ÷ 0,2)	ujemna (0,3 ÷ 0,5)	ujemna (0,3 ÷ 0,4)
	Q <sub>max</sub> = f(RH)	dodatnia (0,3 ÷ 0,4)	ujemna (0,3 ÷ 0,5)	ujemna (0,1 ÷ 0,3)
	PDI = f(RH)	dodatnia (0,1 ÷ 0,2)	ujemna (0,3 ÷ 0,6)	ujemna (0,4 ÷ 0,6)
5.	wpływ wilgotności bezwgl. (X)			
	PPS = f(X)	ujemna (0,3 ÷ 0,5)	ujemna (0,7 ÷ 0,8)	dodatnia (0,5 ÷ 0,6)
	Q <sub>max</sub> = f(X)	ujemna (0,4 ÷ 0,4)	ujemna (0,4 ÷ 0,7)	ujemna (0,1 ÷ 0,3)
	PDI = f(X)	ujemna (0,1 ÷ 0,4)	ujemna (0,7 ÷ 0,8)	dodatnia (0,4 ÷ 0,6)
6.	ocena jakościowa wskaźników korelacji			
	wartość współ. korelacji		znaczenie	
	< 0,7 ÷ 1,0 >		silna dodatnia korelacja	
	< 0,3 ÷ 0,7 >		słaba dodatnia korelacja	
	( -0,3 ÷ 0,3 )		brak korelacji	
	< -0,3 ÷ -0,7 >		słaba ujemna korelacja	
	< -0,7 ÷ 1,0 >		silna ujemna korelacja	

**Tabela 6.3.** Zalecane warunki mikroklimatyczne dla pracy badanych maszyn elektrycznych

Lp.	Parametr	SE-1	SE-2	SE-3
1.	typ	<b>SYUe-148r</b>	<b>AMS 800 LC</b>	<b>HXRG 450</b>
2.	klasa izolacji	B - 130°C	F - 155°C	F - 155°C
3.	temperatura (T)			
	min.	34°C	40°C	2°C
	maks.	40°C	55°C	15°C
4.	wilgotność względna (RH)			
	min.	20%	15%	30%
	maks.	40%	30%	100%
5.	zawartość wilgoci (X)			
	min.	9 g/kg	12 g/kg	3 g/kg
	maks.	15 g/kg	16 g/kg	6 g/kg

- Przy ocenie wpływu warunków mikroklimatycznych na wielkość emisji *wnz* należy uwzględnić proces starzenia się izolacji. Podczas badań zwrócono uwagę na pewną prawidłowość. Polega ona na tym, że wzrost emisji *wnz* w rozpatrywanych zakresach temperatur i wilgotności nie jest jednokowy. Linie aproksymacyjne przecinają się przy pewnej wartości, co ozna-

cza, że obniżenie lub zwiększenie temperatury lub wilgotności od tej wartości powoduje większy wzrost lub obniżenie aktywności *wnz*. Takie zachowanie się izolacji w zmiennych warunkach mikroklimatycznych dowodzi, iż celowe jest okresowe korygowanie zalecanego zakresu zmian temperatury i wilgotności powietrza. Można by w ten sposób skutecznie obniżyć poziom emisji *wnz* mimo postępującego procesu starzenia się izolacji.

- Ocena stopnia starzenia się izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych przy wykorzystaniu metody wyładowań niezupełnych wymaga zachowania poprawności metodologicznej. Okresowa zmiana poziomu wyładowań wywołana zmianami warunków mikroklimatycznych może spowodować błędną interpretację uzyskanych wyników. W niektórych maszynach wzrost temperatury i wilgotności powietrza prowadzi do okresowego wzrostu lub obniżenia wyładowań. W celu zachowania obiektywizmu w ocenie procesu starzenia należy porównywać wskaźniki PPS,  $Q_{\max}$  i PDI mierzone w zbliżonych warunkach mikroklimatycznych i przy zbliżonych warunkach eksploatacyjnych (chodzi tu głównie o obciążenie).
- Wyniki oceny procesu starzenia się izolacji jednej z badanych maszyn przedstawiono w tabeli 6.4 i na rysunku 6.26. Do oceny wybrano izolację generatora SE-3. Wyboru tej maszyny dokonano ze względu na najdłuższą historię pomiarową. Krzywe dla poszczególnych wskaźników *wnz* zostały wyznaczone poprzez uśrednienie wartości w tych samych okresach letnich kolejnych lat. Ostatecznej oceny stanu izolacji, zgodnie z literaturą [1, 14, 15, 54, 163] powinno się dokonywać w oparciu o przebieg zmian amplitudy wyładowań  $Q_{\max}$  oraz mocy wyładowań PDI (6.26b i 6.26c). Na pełny proces starzenia się izolacji składa się pięć faz (rys. 6.26d). Pierwsza opisuje zachowanie się nowej izolacji (1), następne to: wolne eksploatacyjne zużywanie się izolacji (2), wyraźnie widoczne zużywanie się izolacji (3), przyśpieszone zużywanie się izolacji (4) oraz uszkodzenie izolacji (5). Na podstawie przeprowadzonych badań można uznać, iż izolacje uzwojeń badanych maszyn znajdują się w drugiej lub na początku trzeciej fazy procesu starzenia.

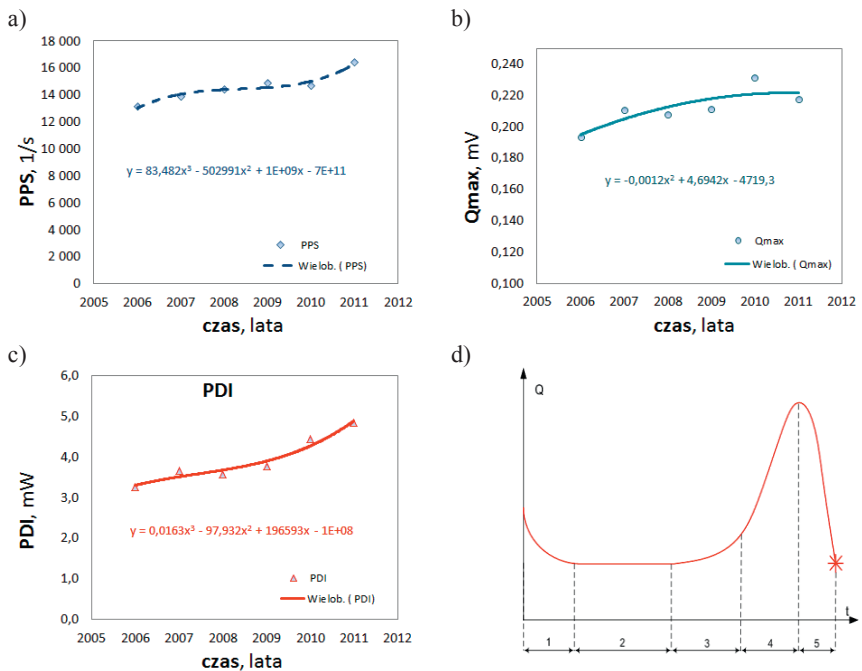
**Tabela 6.4.** Charakterystyka procesu starzenia się izolacji w generatorze SE-3

czas	PPS 1/s	przyrost wartości	$Q_{\max}$ mV	przyrost wartości	PDI mW	przyrost wartości
2006	13 097	---	0,194	---	3,249	---
2007	13 835	5,6%	0,211	9,0%	3,670	13,0%
2008	14 431	4,3%	0,208	-1,4%	3,581	-2,4%
2009	14 858	3,0%	0,212	1,8%	3,776	5,4%
2010	14 652	-1,4%	0,232	9,4%	4,444	17,7%
2011	16 386	11,8%	0,218	-6,1%	4,839	8,9%

- Bieżąca obserwacja wyładowań niezupełnych w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych pozwala dokładnie śledzić dynamikę zmian aktywności *wnz*. Na tej podstawie należy monitorować stan techniczny urządzeń. W świetle przeprowadzonej analizy nasuwa się wniosek,

aby informacje z pomiaru emisji *wnz* wykorzystać również do bieżącego wyznaczania zalecanych warunków mikroklimatycznych oraz do zarządzania pracą urządzeń odpowiedzialnych za kształtowanie warunków mikroklimatu w pomieszczeniu maszyn elektrycznych.

- Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań uprawnione jest wnioskowanie o wprowadzenie do elektrotechniki nowego pojęcia o nazwie *komfort cieplny maszyny elektrycznej*. Proponowana definicja mogłaby brzmieć: *komfort cieplny maszyny elektrycznej jest to stan określony przez poziom wartości takich parametrów fizycznych otoczenia jak temperatura i wilgotność powietrza, przy których aktywność wnz jest na akceptowalnie niskim poziomie*. Przez pojęcie *akceptowalnie niski poziom aktywności wnz* należy uznać poziom wyznaczony poprzez zastosowanie np. kryterium ekonomicznego. Przyjmując takie kryterium należałoby określić maksymalny poziom kosztów możliwych do ponoszenia z tytułu pracy urządzeń grzewczo-wentylacyjnych w celu zapewnienia warunków komfortu oraz uzysk w kosztach wynikających z przedłużonej eksploatacji maszyn.



**Rys. 6.26.** Przebieg procesu starzenia się izolacji uzwojeń generatora SE-3 wyznaczony w warunkach przemysłowej eksploatacji metodą *wnz* za pomocą wskaźników PPS (a),  $Q_{\max}$  (b), PDI (c) oraz ideogram przebiegu „życia” izolacji (d)



## **7. KONCEPCJA ROZBUDOWY SYSTEMU MONITOROWANIA EMISJI *wnz***

### **7.1. Uwarunkowania zewnętrzne**

Intensywnie rozwijająca się technika stwarza możliwości dla rozwoju systemów monitorowania urządzeń podczas ich normalnej pracy. Obecnie w eksploatacji znajduje się kilka rozwiązań opartych na pomiarze emisji *wnz* realizowanych w sposób ciągły podczas pracy maszyn. Systemy te pełnią funkcję diagnostyczną, których głównym celem jest śledzenie rozwoju zmian stanu izolacji uzwojeń. Prowadzony w ten sposób monitoring ułatwia zarządzanie tymi urządzeniami i zmniejsza ryzyko występowania awarii.

Efektywne korzystanie z systemów monitorujących emisję *wnz* wymaga sporej wiedzy i doświadczenia. Służby techniczne odpowiedzialne za eksploatację maszyn elektrycznych muszą często wspomagać się usługą wysoko wyspecjalizowanych osób i firm zewnętrznych. Najczęściej jest to usługa oferowana bezpośrednio przez producenta danego systemu. W ramach tej usługi oferują pomoc przy ocenie gromadzonych danych pomiarowych oraz biorą udział przy podejmowaniu decyzji związanych koniecznością wyłączenia maszyny i skierowania jej do remontu.

W skład każdego systemu diagnostycznego do monitorowania wyładowań niepełnych, oprócz urządzeń pomiarowych, wchodzi oprogramowanie komputerowe, za pomocą którego można obserwować wyniki pomiarów, zarządzać nimi oraz dokonywać analiz. Poziom zaawansowania dostępnych funkcji analitycznych związany jest z oceną zmian właściwości obserwowanej izolacji. Dokonuje się tego na podstawie przebiegów czasowych badanych wielkości, obserwacji położenia i wielkości impulsów *wnz* z uwzględnieniem zmian polaryzacji wyładowań na tle przebiegów rozdzielczo-fazowych napięcia probierczego. Oprogramowanie oferuje również możliwość wyznaczania współczynników korelacji wzajemnej między parametrami eksploatacyjnymi silnika a emisją *wnz*. Dla służb technicznych najważniejszym jednak parametrem kontrolnym jest poziom przyjętych wartości alarmowych. Na obecną chwilę brak jest jasnych kryteriów dla przyjmowania konkretnych wartości alarmowych. Dokonują tego najczęściej przedstawiciele firm sprzedających systemy. Wiedzę czerpią z własnych doświadczeń i wytycznych uzyskanych od projektantów tych urządzeń.

### **7.2. Proponowany zakres zmian**

Na podstawie zgromadzonej wiedzy z zakresu funkcjonowania istniejących systemów do monitorowania emisji *wnz* oraz doświadczeń zdobytych podczas realizacji własnych badań można sugerować rozbudowę obecnych systemów o nowe elementy.

Propozycja autora, w tym względzie dotyczy głównie:

- Rozbudowy infrastruktury pomiarowej. Zdaniem autora powinna ona obejmować:
  - czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza w ilości pozwalającej śledzić zmiany mikroklimatu w całym pomieszczeniu pracujących maszyn;
  - czujniki do pomiaru temperatury, wilgotności i prędkości powietrza przewidziane do zabudowy w kanałach wentylacyjnych badanych maszyn w celu wyznaczenia i kontrolowania skuteczności działania układu chłodzenia; w silnikach o budowie otwartej może to być system analogiczny do tego, który został przedstawiony w rozdziale 3; w maszynach o budowie zamkniętej liczba i rodzaj czujników oraz lokalizacja ich zabudowy powinna pozwolić na wyznaczenie bilansu cieplnego maszyny poprzez wyznaczenie strumienia cieplnego czynnika chłodzącego;
  - czujniki do pomiaru temperatury uzwojeń stojana; mogą do tego celu zostać wykorzystane czujniki RTD, które już obecnie są stosowane w układach kontroli i zabezpieczenia maszyn – ich funkcja będzie jednak nieco inna; informacja o rozkładzie temperatury wewnątrz silnika powinna służyć do sterowania pracą układu chłodzenia maszyny w kontekście sterowania komfortem cieplnym w pomieszczeniu;
  - czujniki do pomiaru drgań mechanicznych obudowy stojana; pomiar ten pozwoli śledzić w dłuższym horyzoncie czasowym wpływy wibracji na aktywność *wnz*; kontrola tego parametru pozwoli również oceniać zmienność drgań np. w wyniku oddziaływań urządzeń napędzanych.

Realne zwiększenie liczebności czujników pomiarowych w systemie winno wynikać z uwarunkowań techniczno-ekonomicznych określonych dla konkretnego obiektu indywidualnie.

- Rozszerzenia funkcji analitycznych oprogramowania komputerowego o narzędzia do oceny wpływu mikroklimatu na emisję *wnz*. Funkcje te powinny obejmować przede wszystkim:
  - wyznaczanie optymalnych warunków mikroklimatycznych dla komfortowej pracy maszyn elektrycznych z uwzględnieniem postępującego procesu starzenia się izolacji,
  - wyznaczanie krzywych starzenia się izolacji dla uzwojeń każdej z faz oddzielnie, z uwzględnieniem poprawki wynikającej ze zmian mikroklimatu,
  - prognozowanie przebiegu procesu starzenia się izolacji w oparciu o gromadzoną bazę danych i uzupełnianą na bieżąco bazę wiedzy oraz poprzez zastosowanie modułu wnioskującego, posiadającego procedury objaśniające.
- Zapewnienia współpracy z innymi systemami diagnostycznymi, w tym z systemami do monitorowania stanu łożysk, celem integrowania środowisk diagnostycznych.

- Zapewnienia współpracy z zewnętrznymi systemami zarządzającymi pracą urządzeń grzewczo-wentylacyjnych na poziomie wymiany informacji o wymaganych warunkach mikroklimatycznych lub opracowanie własnego modułu zarządzania mikroklimatem.
- Opracowania w dłuższej perspektywie czasu dedykowanego systemu eksperckiego, pozwalającego na bieżącą ocenę uzyskiwanych wyników pomiarowych, głównie pod kątem diagnostycznej oceny stanu izolacji uzwojeń badanych maszyn. Idea proponowanego systemu polega na przeniesieniu dostępnej wiedzy, zgromadzonej przez najlepszych ekspertów na świecie z tej dziedziny, do programu komputerowego, wyposażonego w bazę danych, konkretne reguły wnioskowania oraz przystępny język komunikacji z użytkownikiem.

Aplikacja winna zawierać moduły funkcjonalne pozwalające na:

- szerszą niż obecnie interpretację danych pomiarowych;
- dokonywanie prognozy zdarzeń w najbliższej i dłuższej perspektywie czasowej;
- ocenę diagnostyczną w zakresie wykrywania uszkodzeń i utrzymywania zdolności produkcyjnej;
- planowanie rutynowych czynności serwisowych oraz okresowych napraw i remontów;
- monitorowanie procesów w sposób ciągły z dynamicznym doborem częstotliwości dokonywania pomiarów;
- sterowanie urządzeniami pomocniczymi mającymi wpływ na pracę danej maszyny;
- instruowanie obsługi w zakresie podejmowania czynności i decyzji.

Biorąc pod uwagę ilość zaproponowanych wyżej zmian zmierzających do poprawy funkcjonowania i lepszego wykorzystania obecnych systemów diagnostyki stanu izolacji uzwojeń bazujących na pomiarze emisji *wnz*, poniżej podano sugerowany sposób realizacji niektórych z nich.

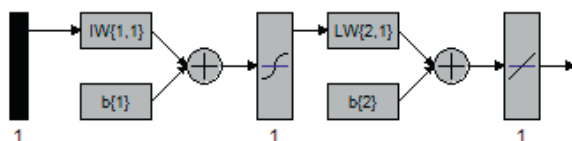
### **7.3. Koncepcja modułu prognozowania emisji *wnz* oparta na zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych**

Za kluczowe uznaje się rozwiązanie problemu prognozowania emisji *wnz*, a tym samym procesu starzenia się izolacji uzwojeń, w wyniku przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych na podstawie znajomości obecnego stanu technicznego izolacji oraz przebiegu tych zmian, jakie obserwowano w okresie minionym. Biorąc pod uwagę ilość zmiennych parametrów zewnętrznych mających wpływ na procesy starzenia się izolacji oraz brak jednoznacznych zależności opisujących te wpływy na proces starzenia, prognozowanie emisji *wnz* można realizować jedynie metodami przybliżonymi [14, 37, 40, 80]. Dokonując przeglądu metod, które mogą realizować tak określone zadanie oraz wykorzy-

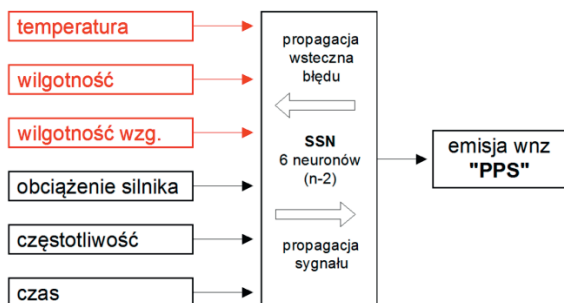
stując własne doświadczenia, proponuje się wykorzystać do tego celu sztuczne sieci neuronowe (SSN).

Istotą działania sieci neuronowej jest przetwarzanie informacji w sposób równoległy. Wykorzystują one cechę uczenia, polegającą w rzeczywistości na długotrwałym dostrajaniu dużej ilości liczb wążących przetwarzane sygnały, zwanych wagami synaptycznymi. Nauczona sieć to układ, który na określone sygnały wejściowe odpowiada we właściwy sposób i może w związku z tym stanowić model pewnego zjawiska lub procesu technologicznego, przewidując np. jego przyszły przebieg. Informacje przechowywane w sieci mają charakter rozproszony, tzn. trudne jest stwierdzenie, który fragment sieci odzwierciedla określoną cechę. Konsekwencją tego jest stosunkowo duża odporność SSN na uszkodzenia [201, 232, 251].

Dla potrzeb oceny przydatności SSN w prognozowaniu emisji *wnz* przeprowadzono własny eksperyment. Polegał on na sprawdzeniu działania jednokierunkowej struktury SSN składającej się z trzech warstw, tj. warstwy wejściowej, warstwy ukrytej i warstwy wyjściowej. Przyjęty schemat obliczeniowy wraz ze strukturą SSN przedstawiono na rysunkach 7.1÷7.2.



Rys. 7.1. Przyjęty schemat obliczeniowy, struktura SSN – jednokierunkowa, wielowarstwową (warstwa wejściowa, warstwa ukryta oraz warstwa wyjściowa)



Rys. 7.2. Schemat analizy danych wykorzystany do wyznaczenia prognozowanej wartości wskaźnika PPS przy 6 neuronach warstwy wyjściowej

Pierwszy etap eksperymentu polegał na procesie uczenia sieci neuronowej. Wykorzystano do tego celu część zgromadzonych wyników pomiarowych pochodzących z badań emisji *wnz* silnika SE-2. Proces uczenia prowadzono w kilku wariantach. Warstwa wejściowa miała od 4 do 6 neuronów w zależności



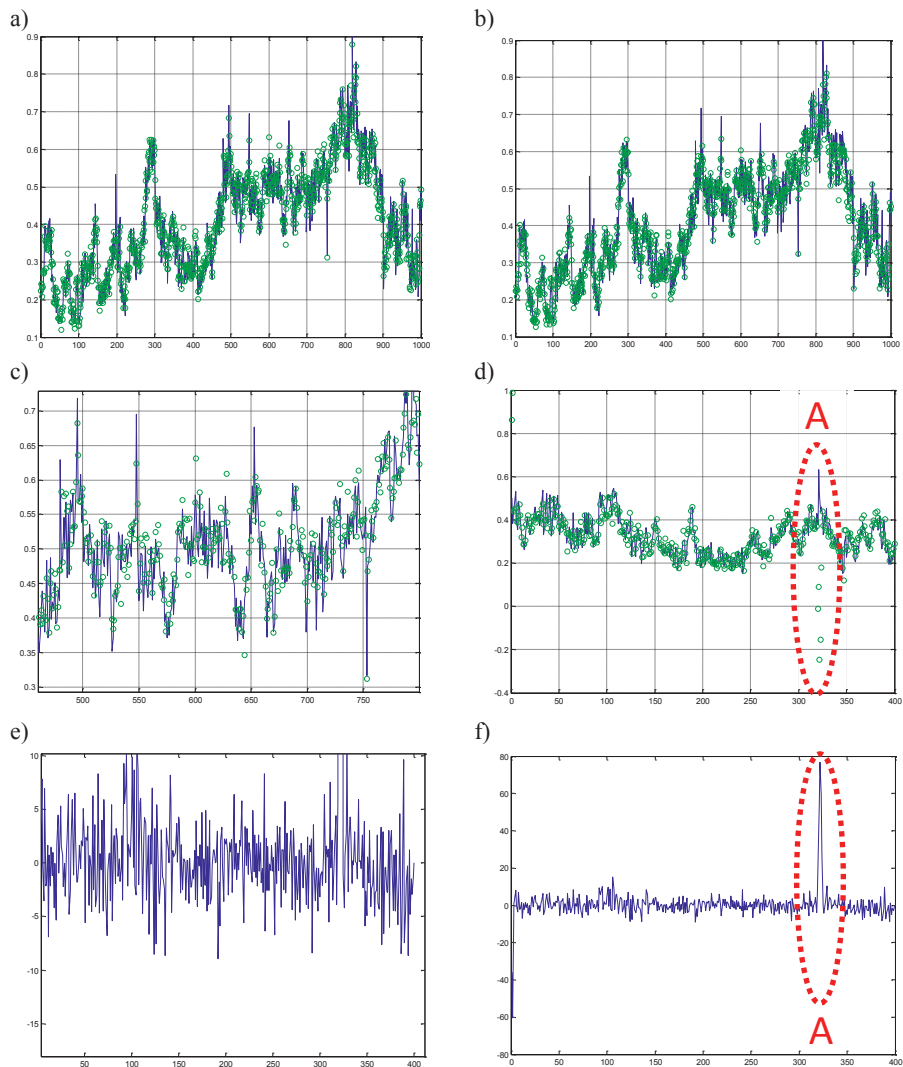
od liczby uwzględnianych wymuszeń. W pierwszej kolejności uwzględniono wyniki pomiarów temperatury i wilgotności względnej powietrza, wilgotności bezwzględnej oraz obciążenia silnika. W kolejnych wersjach obliczeń zwiększono liczbę neuronów wejściowych o kolejny jeden parametr, a mianowicie: czas i częstotliwość napięcia. W warstwie wyjściowej zdefiniowano jeden neuron odpowiadający wskaźnikowi  $Q_{\max}$ . Liczba neuronów w warstwie ukrytej została dobrana w wyniku przeprowadzenia testów wstępnych, gdyż niestety nie ma łatwej metody na dobranie optymalnej liczby neuronów. Zawsze istnieje niebezpieczeństwo, że zastosowana liczba neuronów może prowadzić do zbyt daleko idących uproszczeń, gdy liczba neuronów jest za mała lub nastąpi uzyskanie efektu „przeuczenia” sieci, gdy neuronów jest zbyt dużo. Ta ostatnia sytuacja może prowadzić do tego, że SSN zostanie wyuczona rozpoznawania specyficznych cech właściwych tylko dla tych konkretnych danych. Ostatecznie do dalszych badań przyjęto sześć neuronów w warstwie ukrytej.

Sam proces uczenia sieci polega na ciągłym dobieraniu współczynników wag tak, aby wartości na wyjściu SSN odpowiadały wartościom wyjściowym z pliku uczącego. Dokonano tego poprzez zastosowanie algorytmu *backpropagation*, czyli wstecznej propagacji wag. Istota tego algorytmu polega na odwrotnym kierunku poprawiania wag – od wag neuronów warstwy wyjściowej do wag neuronów pierwszej warstwy ukrytej. Po zakończeniu procesu uczenia otrzymuje się po jednej macierzy współczynników wag dla pierwszej i drugiej warstwy. W macierzy pierwszej warstwy występuje jeszcze wektor przesunięcia. Jako funkcję aktywacji w obliczeniach wykorzystano funkcję *arctg*. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem pakietu *Simulink Matlab*.

Przykładowe wyniki obliczeń uzyskane w procesie uczenia SSN na danych historycznych oraz wynik testu działania SNN na danych niewidzianych przez SNN przedstawiono na rysunku 7.3. Linia niebieską oznaczono wyniki pomiarów, a zielonymi kropkami wartości uzyskane na drodze obliczeń SSN. Dla porównania przedstawiono dwa warianty obliczeń, wykonane przy 5 i 6 parametrach wejściowych. Wielkością uwzględnioną jako szóstą to częstotliwość napięcia. W celu oceny jakościowej działania SSN podano dla nich wykresy uśrednionego błędu kwadratowego, który wyznaczono jako wartość średnią z kwadratów różnic pomiędzy wartością wygenerowaną przez SSN a rzeczywistą pochodzącą z pomiarów.

Uzyskane wyniki w obu wariantach są nad wyraz zadowalające. W pierwszym przypadku średni błąd kwadratowy wynosił przeciętnie +/-5%, w drugim +/-3%. Wartości obliczone w pierwszym wariantcie są nieco gorsze. Ilość zielonych punktów niepokrywających się z przebiegiem wartości zmierzonych jest większy. Uwzględnienie na wejściu SSN dodatkowego parametru, mimo bardzo niewielkich zmian częstotliwości, pozwoliło znacznie poprawić efekt prognozowania. Poprawa jakości prognozowania wskaźnika  $Q_{\max}$  nie jest jednak w stanie zagwarantować poprawności działania w sytuacjach ponadstandardowych. Zakreślony na rysunku 7.3d obszar oznaczony literą A dowodzi o istnieniu innych przyczyn wyładowań niepełnych aniżeli te, które wykorzystano w

procesie uczenia. W świetle już wcześniej przedstawianych analiz, bardzo jest prawdopodobne, że przyczyną wystąpienia różnic jest brak pomiaru któregoś z parametrów drgań mechanicznych.



**Rys. 7.3.** Ocena działania SSN: a) i b) wyniki procesu uczenia SSN na danych historycznych przy 5 i 6 parametrach wejściowych, c) i d) wynik testu działania SSN na danych niewidzianych przez SSN dla obu przypadków, e) i f) wykres błędów

## 7.4. Wskazówki do projektowania systemów grzewczo-wentylacyjnych pomieszczeń pracy maszyn elektrycznych

W świetle prezentowanych wyników badań oraz szczegółowej analizy zjawisk towarzyszących pracy maszyn elektrycznych bardzo ważne jest zwrócenie szczególnej uwagi na sposób, w jaki powinny być kształtowane warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych. W praktyce eksploatacyjnej nagminnie jest lekceważenie tych zagadnień. Często wynika to z braku konkretnych wytycznych. W innych przypadkach jest to wynikiem braku należytej infrastruktury technicznej lub odpowiednich narzędzi programowych do realizacji funkcji regulacyjnych. Często bywa również tak, iż urządzenia grzewczo-wentylacyjne zostały zaprojektowane i wybudowane w oparciu o zupełnie inne założenia funkcjonalno-użytkowe pomieszczenia.

Projektując system grzewczo-wentylacyjny w pomieszczeniu przewidzianym do pracy maszyn elektrycznych projektant powinien postępować zgodnie z następującą procedurą:

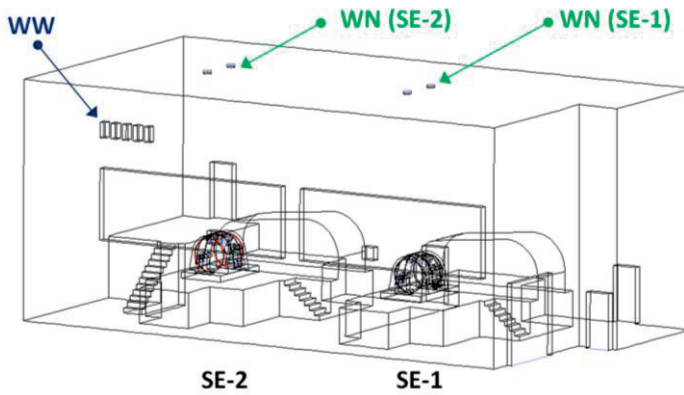
- Etap 1 – faza koncepcyjna, obejmująca:
  - a) określenie najważniejszych celów, w tym uzyskanie wytycznych od producenta urządzeń niezbędnych do określenia wielkości generowanych zysków cieplnych w różnych warunkach obciążeniowych maszyny oraz wymaganych warunków *komfortu cieplnego maszyny elektrycznej*;
  - b) określenie uwarunkowań wynikających z lokalizacji pomieszczenia;
  - c) określenie uwarunkowań wynikających z możliwości pozyskania źródeł zasilania w ciepło, chłód, energię elektryczną, gaz lub olej opałowy;
  - d) analiza możliwych do zastosowania rozwiązań technicznych uwzględniających powyższe uwarunkowania;
  - e) wariantowa propozycja rozwiązań technicznych i organizacyjnych;
  - f) analiza techniczno-ekonomiczna mająca na celu wskazanie wariantu realizacyjnego; wyboru wariantu należy dokonać w oparciu o wyznaczone wskaźniki oceny efektywności inwestycji z uwzględnieniem wymagań *Prawa budowlanego*, *Warunków technicznych* oraz innych przepisów formalno-prawnych.
- Etap 2 – faza projektowa:
  - a) opracowanie projektu budowlanego;
  - b) opracowanie projektu wykonawczego;
  - c) uzyskanie niezbędnych uzgodnień i pozwoleń.
- Etap 3 – faza realizacyjna:
  - a) techniczna realizacja projektu;
  - b) rozruch próbny i gwarancyjny;
  - c) szkolenie personelu i przekazanie inwestycji.
- Etap 4 – faza wstępnej eksploatacji:
  - a) pomiary warunków komfortu cieplnego w różnych warunkach eksploatacyjnych;

- b) weryfikacja nastaw i blokad;
- c) okresowa kontrola pracy urządzeń wraz z oceną ich skuteczności działania.

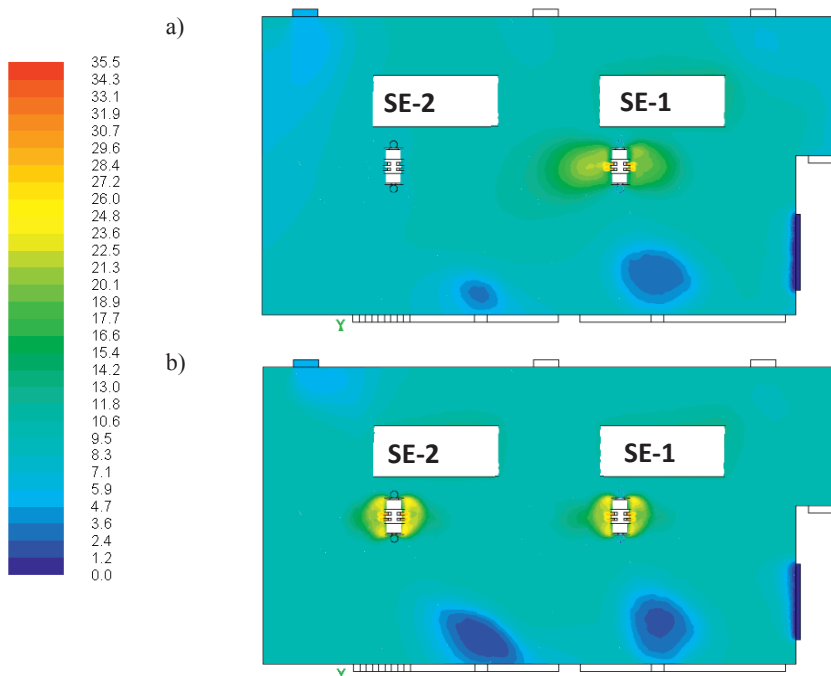
Przedstawiony scenariusz postępowania narzuca na zespół projektowy zachowanie wysokiego poziomu wiedzy technicznej i organizacyjnej. Przez wysoki poziom wiedzy technicznej, oprócz klasycznego rozumienia, należy również uznać umiejętność posługiwania się narzędziami do komputerowego wspomaganie procesu projektowego. Chodzi tu głównie o narzędzia z zakresu modelowania zjawisk ciepłno-przepływowych, dzięki którym można wirtualnie analizować pracę projektowanego systemu i eliminować na etapie projektu rozwiązań wadliwych. Przykładem takiego narzędzia jest program ANSYS, który przestaje być programem przeznaczonym jedynie do zastosowań badawczych, a staje się programem użytkowym dedykowanych dla inżynierów projektantów [2, 3, 199].

Dla zilustrowania zalet stosowania tego programu przy rozwiązywaniu zagadnień projektowych na rysunkach 7.4÷7.6 przedstawiono propozycję rozwiązania problemu nierównomiernego chłodzenia silnika SE-1. W tym celu zaprojektowano na dachu hali maszyn otwory nawiewne zakończone nawiewnikami (rys. 7.4), dzięki którym można bezkanałowo transportować powietrze o odpowiedniej temperaturze i wilgotności w strefę chłodzonego silnika (rys. 7.6). Różnicując poziom temperatury i prędkości powietrza nawiewanego w poszczególnych kanałach wentylacyjnych można uzyskać równomierny rozkład temperatury w płaszczyźnie poziomej hali maszyn na wysokości otworów przewietrzających silnik (rys. 7.5). Zaproponowany system wentylacji nawiewnej zakłada możliwość współpracy silników SE-1 i SE-2 z dwoma niezależnymi strefami nawiewu dzięki czemu można indywidualnie, w obrębie każdego z silników, kształtować zadane (na przykład przez obsługę) warunki mikroklimatu.

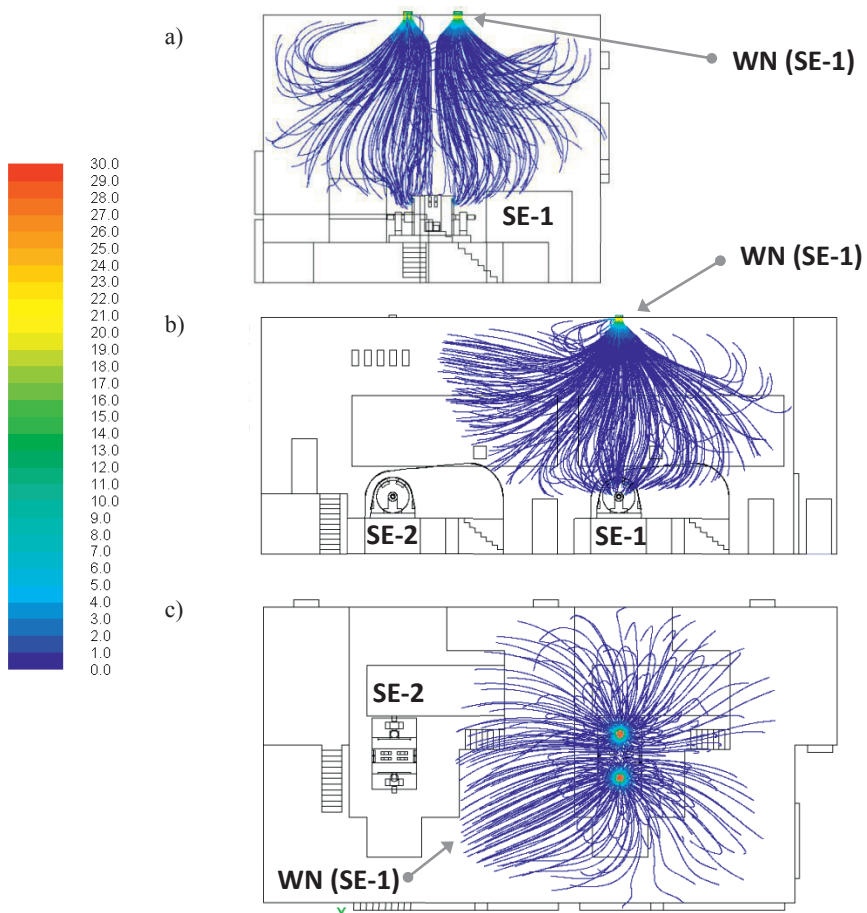
Utrzymywanie zalecanych warunków mikroklimatycznych w pomieszczeniach pracy maszyn elektrycznych wymaga stosowania efektywnych układów automatycznej regulacji mikroklimatu. Układy te mogą być realizowane przy wykorzystaniu sterowników swobodnie programowalnych klasy PCL wyposażonych w funkcje regulacji nadążnej. Rozwój systemów do monitorowania emisji *wnz* może w przyszłości pozwolić na korzystanie z wyników analizy wpływu mikroklimatu na wielkość wyładowań, a to pozwoli na aktualizowanie nastaw regulacyjnych urządzeń grzewczo-wentylacyjnych w sposób automatyczny.



Rys. 7.4. Projekt zmiany organizacji wentylacji hali maszyn elektrycznych, gdzie: WN – nawiewniki, WW – kratki wywiewne, SE1 i SE2 – oznaczenie silników



Rys. 7.5. Wpływ zmiany sposobu organizacji wentylacji na rozkład temperatury powietrza w płaszczyźnie poziomej hali maszyn ( $h=2.5\text{m}$ ) przy pracy: a) jednego silnika (SE-1), b) dwóch silników (SE-1 i SE-2);  $T_{zew}=0^{\circ}\text{C}$ , skala kolorów odpowiada temperaturze wyrażonej w  $^{\circ}\text{C}$



**Rys. 7.6.** Trajektorie ruchu cząstek powietrza po zmianie sposobu organizacji wentylacji hali maszyn: a) przekrój poprzeczny hali, b) przekrój podłużny hali, c) rzut poziomy; pracuje silnik SE-1,  $T_{zew}=0^{\circ}\text{C}$ , skala kolorów odpowiada prędkości wyrażonej w m/s

## 8. PODSUMOWANIE

Głównym celem realizowanych prac była analiza wpływu wybranych parametrów mikroklimatu na wielkość emisji *wnz* w izolacjach uzwojeń maszyn elektrycznych w warunkach ich przemysłowej eksploatacji. Badania ograniczono do indukcyjnych maszyn elektrycznych wirujących, będących napędami maszyn i urządzeń, oraz do maszyn służących do konwersji energii mechanicznej na energię elektryczną.

Zdaniem autora udało się osiągnąć ten główny cel pracy. Wyniki badań wraz z analizą w dużej mierze zostały opisane w kolejnych rozdziałach niniejszej monografii. I tak, w pierwszych dwóch rozdziałach scharakteryzowano aktualny stan wiedzy w przedmiotowym zakresie. Podano najważniejsze informacje z zakresu diagnostyki stanu izolacji uzwojeń, przedstawiając między innymi obecne rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe systemów izolacyjnych, przyczyny występowania uszkodzeń izolacji, uwarunkowania dla poprawnej eksploatacji maszyn elektrycznych oraz metody oceny stanu ich izolacji.

W rozdziale trzecim przedstawiono opis, strukturę i zakres prowadzenia badań wraz z wyborem i charakterystyką obiektów badań. Przedstawiono opis wykorzystanych narzędzi pomiarowych wraz z podaniem najważniejszych cech metrologicznych instalacji do pomiaru emisji *wnz* oraz instalacji towarzyszących, w tym między innymi: instalacji do pomiaru mikroklimatu, instalacji do pomiaru drgań mechanicznych i wielkości procesowych niezbędnych do wykonania cieplnych obliczeń bilansowych. Omówiono również inne urządzenia pomiarowe, których udział okazał się niezbędny, takie jak kamera termowizyjna, laserowy skaner przestrzeni czy dalmierz laserowy.

Rozdział czwarty poświęcono w całości zagadnieniom związanym z modelowaniem zjawisk cieplnych i przepływowych. W pierwszej kolejności podano własną koncepcję opisu zjawisk w trójwymiarowej geometrii pomieszczenia, po czym dokonano wyboru, a następnie opisu modeli wykorzystanych w badaniach symulacyjnych. Zastosowano modele do opisu wymiany ciepła na drodze przewodzenia, konwekcji i promieniowania w ośrodkach stałych i płynnych z możliwością uwzględnienia przepływów wielofazowych. Następnie zaimplementowano model w zbliżonej do rzeczywistej geometrii z zachowaniem kształtów i wymiarów. Opracowana geometria uwzględnia elementy istotne z punktu widzenia wymiany ciepła i masy, czyli przegrody budowlane, okna, drzwi, instalację wentylacyjną oraz istotne urządzenia znajdujące się wewnątrz. Dla oceny przydatności uzyskiwanych wyników przeprowadzono weryfikację, która polegała na porównaniu wyników pomiarowych z wynikami obliczeń numerycznych. Obliczenia wykonano po zdefiniowaniu warunków brzegowych w stanie ustalonym. Za kryterium oceny przyjęto zgodność obliczonego i zmierzonego rozkładu temperatury. Ostatecznie, mimo wystąpienia pewnych różnic ilościowych, uznano dokładność obliczeń za zadowalającą.



Wyniki uzyskanych pomiarów oraz badań symulacyjnych przedstawiono w rozdziale 5, oddzielnie dla każdej z badanych maszyn. Wraz z prezentacją wyników na bieżąco starano się je omawiać, dyskutować i dokonywać krótkich podsumowań. Najważniejsze spostrzeżenia dotyczą następujących obszarów:

- Praca maszyn elektrycznych intensywnie wpływa na zmianę warunków mikroklimatycznych w pomieszczeniu, które dotyczą temperatury powietrza, temperatury promieniowania, temperatury punktu rosy, wilgotności bezwzględnej i względnej oraz stopnia zapylenia pyłem przemysłowym. Pracy tych urządzeń towarzyszy również emisja drgań mechanicznych. Łącznie parametry te tworzą środowisko pracy, w którym okresowo dochodzi do wzrostu lub obniżenia emisji wyładowań niezupełnych. W badanych urządzeniach zaobserwowano okresowe zmiany emisji *wnz* rzędu 200÷300%, a nawet 500%;
- Maszyny elektryczne pracujące w określonych warunkach technologicznych narażone są na częste zmiany obciążenia. Duża jego zmienność prowadzi do zaburzenia pracy układu chłodzącego. Sytuacja ta przekłada się na dynamiczne zmiany temperatury wewnątrz tych maszyn, a to skutkuje powstawaniem naprężeń termicznych i mechanicznych. Sytuacja taka sprzyja rozwojowi aktywności *wnz* we wszystkich badanych maszynach. Najwyraźniej te wpływy są widoczne w silniku o budowie otwartej. Jego układ chłodzenia nie jest w stanie zapewnić stałej temperatury uzwojeń. Emisja wyładowań przy zmiennym obciążeniu silnika SE-1 generuje pojedyncze, ale bardzo silne wyładowania. Są one większe nierzadko o 5, a nawet 10 razy aniżeli te, które towarzyszą pracy w warunkach ustalonych. W przypadku pozostałych maszyn takiego zjawiska nie zaobserwowano, ale one pracowały prawie ze stałym obciążeniem (zmiany ca +/- 10%);
- Na skuteczność działania układu chłodzenia mają wpływ również inne wielkości. W przypadku silnika o budowie otwartej stwierdzono dwie przyczyny. Pierwsza z nich została wykazana przy omawianiu obliczeń symulacyjnych, a wynika z intensywności zjawisk ciepłno-przepływowych, które towarzyszą pracy silnika. Nierównomierność rozkładu temperatury w pomieszczeniu powoduje zróżnicowanie temperatury powietrza w układzie chłodzenia. Różnice sięgają nierzadko 5°C. Drugą przyczyną zaburzenia pracy jest zmniejszenie strumienia powietrza przepływającego przez jedną z części silnika. Razem obie przyczyny powodują wyraźny wzrost emisji *wnz* w izolacjach uzwojeń gorzej chłodzonych. W dłuższym okresie czasu doprowadzi to do szybszego uszkodzenia tej części izolacji. Jak wykazały badania, izolacja gorzej chłodzona generuje dwukrotnie większą ilość wyładowań, a ich amplituda jest prawie trzy razy większa.
- Wykazano przydatność instalacji do pomiaru wielkości procesowych. Dzięki temu możliwe jest bieżące wyznaczanie bilansu cieplnego maszyny elektrycznej podczas różnych warunków pracy. Monitorowanie tej wielkości pozwala oceniać jakość pracy układu chłodzenia przy zmiennych wa-



runkach mikroklimatycznych. Wykazano, że w zakresie przeciętnych warunków pracy skuteczność układu chłodzenia jest zadowalająca. O takim postrzeganiu może świadczyć fakt, iż mimo wzrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu utrzymywany jest odbiór ciepła na bardzo stabilnym poziomie 35÷40 kW (silnik SE-1). Ponadto instalacja ta może być wykorzystywana do szacowania sprawności całkowitej silnika przy założeniu, że znamy również pozostałe strumienie ciepłne, tj. strumień przepływu ciepła na drodze przenikania i promieniowania. Z przeprowadzonej analizy wynika, że badany silnik pracował ze średnią sprawnością 94÷94,5% w zakresie zmian obciążenia od 70 do 100%.

- Dużą uciążliwość w pracy jednego z badanych silników (SE-1) jest zapylenie powietrza. Specyfika tych warunków polega na tym, że to zapylenie jest zmienne i to w bardzo szerokim zakresie i po części wynika z pracy samego silnika. W tej części badań pośrednio wykazano wpływ zanieczyszczenia silnika na wielkość emisji *wnz*. Systematyczne czyszczenie silnika skutkuje wyraźną redukcją emisji *wnz* we wszystkich obszarach oceny wyładowań. Zmalała znacząco zarówno intensywność wyładowań PPS średnio o 90%, amplituda wyładowań  $Q_{\max}$  o 60% oraz moc wyładowań PDI o 97%. Ważny odnotowania jest jednak fakt, iż w chwili obecnej wartości maksymalne wskaźników są wyższe, lecz występują bardzo rzadko.
- Niemożliwe byłoby przeprowadzenie tak dokładnej analizy zjawisk cieplnych i przepływowych w pomieszczeniu pracy maszyn, gdyby nie wykorzystano do tego celu badań symulacyjnych. Dzięki zamodelowaniu geometrii trójwymiarowej oraz zachowaniu podobieństwa wymiarów i kształtów możliwe stało się lepsze zrozumienie zachodzących procesów. Wykazano między innymi jak wpływa temperatura zewnętrzna na przestrzenny rozkład temperatury powietrza przy pracującym jednym silniku i kiedy pracują dwa silniki. Wyznaczono rozkłady temperatur na powierzchniach przegród budowlanych oraz urządzeń znajdujących się wewnątrz, dzięki czemu zwrócono uwagę na konieczność stosowania ekranów ograniczających promieniowanie gorących powierzchni. Wyznaczenie trajektorii ruchu cząstek symbolizujących przemieszczanie się lżejszych frakcji pyłu wskazuje, gdzie należy lokalizować zabudowę urządzeń nawiewnych i wiewnych w pomieszczeniu. O przydatności uzyskanych wyników może świadczyć również szereg zaleceń, jakie poczyniono. Jednym z nich jest zastosowanie wentylatorów nawiewnych o większej wydajności oraz innych elementów nawiewnych (dysze dalekiego zasięgu).

Zasadniczą część monografii stanowi rozdział 6. Przeprowadzono w nim szczegółową analizę wpływu parametrów środowiska na emisję *wnz*. Badania przeprowadzono dla trzech maszyn elektrycznych. W pierwszej części oceniano wpływ temperatury, wilgotności względnej i bezwzględnej, zapylenia oraz drgań mechanicznych. Druga część to analiza wieloparametryczna, w której

oceniano łączny wpływ trzech wielkości, tj. temperatury, wilgotności względnej i bezwzględnej.

Z wykonanych badań wynikają następujące wnioski:

- Charakter *wnz* towarzyszących pracy maszyn elektrycznych jest bardzo złożony. Duży w tym udział mają zmienne warunki mikroklimatyczne otoczenia, w którym te maszyny pracują. Świadczą o tym opracowane diagramy korelacyjne wraz z wyznaczonymi przebiegami funkcji oraz współczynnikami korelacji wzajemnej. Z analizy korelogramów stwierdzono, między innymi to, iż pod wpływem zmian mikroklimatu izolacja uzwojeń w każdej z badanych maszyn zachowuje się inaczej. Jest to o tyle dziwne, że w dwóch maszynach, tj. SE-2 i SE-3, zastosowana jest identyczna izolacja *micadur compact*, którą wykonano w tej samej technologii *VPI*. Mimo to przy zmianach temperatury i wilgotności bezwzględnej korelacje są odmiennych znaków. Wyładowania w obu izolacjach zmieniają się liniowo w funkcji temperatury i wilgotności. Współczynniki korelacji są na poziomie  $0,6 \div 0,8$ . Inaczej jest z silnikiem SE-1. W zakresie średnich temperatur powietrza, tj. między 15 a 35°C, aktywność *wnz* zmienia się w bardzo małym stopniu w wyniku zmiany temperatury i wilgotności. Wyładowania silnie rosną dopiero przy spadku temperatury poniżej 15°C. Poziom emisji rośnie wówczas 4 ÷ 5 krotnie. Podobnie jest przy spadku wilgotności względnej powietrza poniżej 20%. Izolacja silnika SE-1 silnie reaguje natomiast na szybkie zmiany obciążenia. W ich wyniku dochodzi do pojedynczych silnych wyładowań. Skutkiem zmian obciążenia silnika jest okresowy wzrost drgań mechanicznych. Mimo iż nie wykazano na tym etapie badań zależności opisującej ich wpływ, to poczynione obserwacje raczej potwierdzają o ich znaczącym udziale w emisji *wnz*.
- Dzięki wyznaczeniu zależności opisującej wpływ zmian temperatury i wilgotności powietrza na emisję *wnz* można wyznaczyć tak zwane warunki komfortu cieplnego maszyn elektrycznych. Autor zaproponował takie określenie dla wyrażenia temperatury i wilgotności powietrza, przy których poziom emisji *wnz* jest na „niskim” poziomie. Na obecnym poziomie wiedzy bardzo trudne jest zdefiniowanie granicznego poziomu wyładowań, od którego można uznać, że warunki są już komfortowe. Za takie kryterium można by przyjąć kryterium ekonomiczne, w którym należałoby określić maksymalne koszty, jakie można ponosić z tytułu pracy urządzeń grzewczo-wentylacyjnych w celu zapewnienia warunków komfortu i uzyskanie korzyści finansowej z przedłużonej eksploatacji maszyny. Trudność polega jednak na wyznaczeniu krzywej starzenia się izolacji w funkcji zmian temperatury i wilgotności. Wiedzę taką będzie można osiągnąć dopiero po zbadaniu co najmniej kilku pełnych cykli „życia izolacji” w maszynach o zbliżonych rozwiązaniach konstrukcyjnych i pracujących w podobnych warunkach.
- Stało się możliwe wyznaczenie warunków komfortu cieplnego dla każdej z trzech badanych maszyn dzięki przyjęciu własnego kryterium. Założono w

nim, że w warunkach komfortu cieplnego średni poziom emisji *wnz* nie przekroczy 25% średniej wartości wyładowań obserwowanych obecnie, czyli w okresie kiedy warunki mikroklimatu nie są normowane. Wyznaczenie warunków komfortu cieplnego dokonano na wykresach psychometrycznych powietrza wilgotnego, wskazując obszary występowania odpowiednio niskiej emisji *wnz*. Przy wyznaczaniu obszarów komfortu wzięto pod uwagę wszystkie wskaźniki oceniające aktywność *wnz*, czyli PPS,  $Q_{\max}$  i PDI. Analizy wyboru warunków komfortu wykonano dla izolacji, którą cechował najwyższy poziom emisji *wnz* w danej maszynie.

- Podjęta próba oceny wpływu drgań mechanicznych na wielkość emisji *wnz* w jednym z badanych silników wykazała istnienie pewnych prawidłowości. Jednak jakościowej oceny tego wpływu na tym etapie badań niestety nie można przeprowadzić, ze względu na zbyt krótki okres prowadzonych badań. Badania te są prowadzone nadal celem wykonania takiej analizy w okresie późniejszym.
- Przy ocenie wpływu warunków mikroklimatycznych na wielkość emisji *wnz* należy uwzględnić proces starzenia się izolacji. Podczas badań zwrócono uwagę na pewną prawidłowość. Polega ona na tym, że wzrost emisji *wnz* w rozpatrywanym zakresie zmian temperatur i wilgotności nie jest jednakowy. Funkcje liniowe przecinają się w pewnym charakterystycznym punkcie, co oznacza, że obniżenie lub zwiększenie temperatury lub wilgotności spowoduje wzrost lub obniżenie aktywności *wnz*. Takie zachowanie się izolacji podczas starzenia powinno zachęcać do okresowego korygowania zalecanych warunków komfortu cieplnego.
- Poprawna ocena stopnia degradacji izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych przy wykorzystaniu metody wyładowań niepełnych wymaga zachowania poprawności metodologicznej. Okresowa zmiana poziomu wyładowań wywołana zmianami warunków mikroklimatycznych może spowodować błędną ocenę uzyskanych wyników. W badanych maszynach wzrost temperatury i wilgotności powietrza prowadzi do okresowego wzrostu lub obniżenia wyładowań. Jak już wcześniej podano są to zmiany istotne. W celu zapewnienia poprawnej oceny starzenia należy porównywać wskaźniki PPS,  $Q_{\max}$  i PDI mierzone w prawie identycznych warunkach mikroklimatycznych i przy zbliżonych warunkach eksploatacyjnych. Dla przykładu wyznaczono tą metodą krzywą starzenia się izolacji dla jednej z badanych maszyn (SE-3).
- Bieżąca obserwacja wyładowań niepełnych w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych pozwala dokładnie śledzić dynamikę zmian aktywności *wnz*. Na tej podstawie należy monitorować stan techniczny urządzeń. W świetle przeprowadzonej analizy nasuwa się wniosek, aby informacje z pomiaru emisji *wnz* wykorzystać również do bieżącego wyznaczania zalecanych warunków komfortu cieplnego oraz do zarządzania pracą urządzeń odpowiedzialnych za kształtowanie warunków mikroklimatu w pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych.

- Zapewnienie odpowiednich warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniu pracy maszyn elektrycznych wymaga stosowania urządzeń grzewczo-wentylacyjnych. O skuteczności działania będą decydować przyjęte rozwiązania techniczne, a w szczególności konfiguracja sekcji nawiewnej i wywiewnej oraz układ regulacji. W skład sekcji nawiewnej powinny wchodzić: wentylator, nagrzewnica, chłodnica, nawilżacz powietrza, zespół filtrów oraz armatura odcinająco-regulacyjna. Sekcja wywiewna powinna się składać z wentylatora, zespołu filtrów oraz armatury odcinająco-regulacyjnej. Gdy wydajność poszczególnych sekcji przekroczy 10 tys. m<sup>3</sup>/h, to zgodnie z aktualnymi wymaganiami *Warunków technicznych* w skład zestawu musi wchodzić urządzenie do odzysku energii z powietrza wywiewanego z hali. Jako urządzenie odzyskujące ciepło mogą zostać wykorzystane wymienniki krzyżowe, obrotowe, wymienniki z rurką ciepła lub układ wymienników z czynnikiem pośrednim. Ostatecznego wyboru systemu powinien dokonać projektant z zachowaniem wymagań określonych w rozdziale 7.

Rozdział 7 przeznaczono do wskazania najistotniejszych zmian, jakie należy zrealizować, zdaniem autora, w obecnych systemach monitorowania emisji *wnz*. W świetle uzyskanych wyników badań oraz przeprowadzonych analiz, zmiany te powinny dotyczyć przede wszystkim: rozbudowy funkcjonalnej oprogramowania służącego do prowadzenia analiz, rozbudowy układu pomiarowego o elementy pozwalające realizować szerszy zakres obserwacji, zapewnienia współpracy systemu z innymi systemami diagnostycznymi obejmującymi kontrolę tej samej maszyny elektrycznej. Ponadto zaproponowano rozbudowę o moduł umożliwiający współpracę z systemami odpowiedzialnymi za kształtowanie warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach pracy maszyn. W dłuższej perspektywie uznaje się za celowe opracowanie dedykowanego systemu eksperckiego, który umożliwi służbom technicznym lepiej pełnić nadzór na prawidłową eksploatacją maszyn. W rozdziale tym przedstawiono również autorską koncepcję modułu przeznaczonego do prognozowania procesu starzenia się izolacji uzwojeń. Zaproponowano wykorzystanie do tego celu sztucznych sieci neuronowych. Uzasadniono ten wybór przykładem, który pozwolił skutecznie prognozować wskaźnik  $Q_{\max}$  na podstawie zmieniających się parametrów wymuszających. W przykładzie tym udowodniono również zasadność rozbudowy układu pomiarowego o ciągły pomiar obciążenia i częstotliwości napięcia.

Za najważniejsze swoje osiągnięcia przedstawione w monografii autor uważa:

- opracowanie strategii długookresowych badań w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych w celu zgromadzenia dużej liczby danych pomiarowych, niezbędnych do przeprowadzenia przedmiotowej analizy;

- opracowanie histogramów wielkości badanych przy wykorzystaniu narzędzi analitycznych i statystycznych;
- opracowanie modelu matematycznego pozwalającego analizować przebieg zjawisk cieplnych i przepływowych w pomieszczeniu pracujących maszyn elektrycznych wraz z dokonaniem weryfikacji jakościowej otrzymanych wyników;
- wykonanie wielowariantowych obliczeń symulacyjnych odpowiadających warunkom pracy jednego z badanych silników z zachowaniem kształtu i trójwymiarowej przestrzeni pomieszczenia i przy zachowaniu zbliżonych do rzeczywistych warunków otoczenia, co miało wpływ na dobór i definicje warunków brzegowych;
- opracowanie diagramów korelacyjnych wraz z wyznaczeniem równań funkcji, współczynników korelacji wzajemnej oraz oceną jakościową prezentowanych wyników;
- przeprowadzenie analizy wpływu poszczególnych wielkości środowiskowych na wielkość emisji *w<sub>nz</sub>* wraz z określeniem istotnych prawidłowości;
- opracowanie własnej metodyki prowadzenia analizy wpływu temperatury oraz wilgotności względnej i bezwzględnej powietrza na emisję *w<sub>nz</sub>*;
- przeprowadzenie wieloparametrycznej analizy wpływu mikroklimatu na emisję *w<sub>nz</sub>* trzech różnych maszyn elektrycznych;
- opracowanie metodyki wyznaczania warunków komfortu cieplnego maszyn elektrycznych w oparciu o pomiar ciągły *w<sub>nz</sub>* realizowany w warunkach przemysłowej eksploatacji;
- wyznaczenie warunków komfortu cieplnego dla trzech badanych maszyn elektrycznych w oparciu o własne kryterium oceny emisji *w<sub>nz</sub>* i warunków mikroklimatycznych;
- opracowanie metodyki oceny procesu starzenia się izolacji metodą ciągłego pomiaru *w<sub>nz</sub>* ze względu na wpływ mikroklimatu na wielkości pomiarowe wraz z wyznaczeniem krzywej starzenia się izolacji dla jednej z badanych maszyn;
- opracowanie metodyki prognozowania emisji *w<sub>nz</sub>* w oparciu o pomiar mikroklimatu i wielkości elektrycznych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

### **Kierunki dalszych badań**

Badania związane z opracowywaniem monografii doprowadziły autora do następujących wyników:

- zdobycie doświadczeń w zakresie sprawnej organizacji prac badawczych na obiektach przemysłowych;
- przeprowadzenie badań w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych stanowiących istotne i ważne napędy z punktu widzenia realizowanych procesów technologicznych; uzyskane wyniki stają się tym samym wiarygodne i cenne, nie tylko z punktu widzenia prowadzonej ana-

lizy, ale również z punktu widzenia wykorzystania ich w kolejnych pracach naukowych;

- określenia reguł projektowanie maszyn elektrycznych oraz pomieszczeń ich pracy, projektowania instalacji grzewczo-wentylacyjnych z wykorzystaniem modelowania zjawisk fizycznych i opracowanie wskazówek dla prawidłowej eksploatacji tych maszyn;
- opanowania zróżnicowanych narzędzi badawczych i analitycznych; w pracy wykorzystywano komercyjne urządzenia do konkretnych zastosowań, ale również dokonywano adaptacji systemów już istniejących oraz projektowano i wykonywano aparaturę pomiarową samodzielnie;
- korzystanie z zaawansowanych programów komputerowych przeznaczonych do modelowania zjawisk fizycznych, analizy danych pomiarowych oraz analizy statystycznej dużych zbiorów danych (najważniejsze z używanych programów to: *Ansys*, *Ansys-Fluent*, *Autocad*, *Inventor*, *Matlab Simulink*, pakiet *Statistica*, program *Analysis ToolPak* wchodzący w skład pakietu *MS Excel*, programy bazodanowe *MySQL Server*, *MS Access* i *Oracle*, oraz programy do monitorowania i analizy sygnałów pomiarowych *In-sulgard*, *SKF Monitor*, *SKF @ptitude Observer*, *SKF Analyzer*).

Problem diagnostyki dużych maszyn elektrycznych wymaga dalszych badań dla racjonalnej aplikacji przemysłowej własnych rozwiązań w polskim przemyśle. Zdaniem autora dalsze badania winny dotyczyć:

- kontynuowania obecnie prowadzonych badań celem rozszerzenia baz danych pomiarowych i uzupełniania (aktualizowania) wyników analizy wpływu mikroklimatu na emisję *wnz*;
- dokonania oceny wpływu drgań mechanicznych poprzez określenie między innymi jakościowego i ilościowego wpływu prędkości skutecznej i przyspieszenia drgań na emisję *wnz* w warunkach przemysłowej eksploatacji maszyn elektrycznych;
- pomiaru i analizy wpływu na emisję *wnz* innych wielkości mikroklimatu, takich jak: średnia temperatura promieniowania, temperatura punktu rosy czy temperatury operacyjnej;
- pomiaru i analizy wpływu przepięć w układzie zasilania silników elektrycznych na emisję *wnz*;
- aspektów ekonomicznych stosowania monitoringu i optymalizacji ekonomicznej przy określaniu optymalnych warunków komfortu cieplnego maszyn elektrycznych;
- optymalizacji informatycznej i standaryzacji systemu monitoringu *wnz* z wykorzystaniem elementów systemów eksperckich.

## LITERATURA

- [1] Adwel: PD monitoring, Nota Aplikacyjna 2003.
- [2] Ansys Corporate Brochure, November 2011, źródło: [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
- [3] Ansys 14.0 Capabilities Brochure, November 2011, źródło: [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
- [4] Ansys Fluent 12.0 User's Guide, April 2009.
- [5] Ansys Fluent 12.0 in Workbench User's Guide, April 2009.
- [6] Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, Theory manual, April 2009.
- [7] Ansys Fluent Tutorial Guide, November 2011.
- [8] ALMAND D.: Fault Zone Analysis „INSULATION”. Motor Reliability Technical Conference 2004, PdMA Corporation, pp.2–20.
- [9] BACH H., FEIL H.: Umweltbedingungen Umweltprüfungen – Klimatische Umwelteinflüsse und Simulationsverfahren für die Erprobung technischer Produkte, Siemens Aktiengesellschaft, ISBN 3-8009-1288-0, Berlin und München 1979.
- [10] BAKINOWSKA K. i inni: Pomiary cieplne. WNT, Warszawa 1995.
- [11] BALCERZAK A.: Narażenia przepięciowe izolacji silników elektrycznych i ich ochrona. Wyd. BOBRME, Katowice 1993, Maszyny Elektryczne, nr 46, 1993, str. 33–35.
- [12] BASTA J., KULDA V., MERICKA J. i inni : Badanie maszyn elektrycznych WNT, Warszawa 1964.
- [13] BASZTURA Cz.: Komputerowe systemy diagnostyki akustycznej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [14] BATKO W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej. ZN, AGH, seria Mechanika, nr 4, 1984, Kraków.
- [15] BELL B.: Condensation of Water Vapor from Humid Air. Fluent Inc 2002.
- [16] Bently Nevada Corporation: How to minimize electrical runout during rotor manufacturing. Applications Note. Minden, 1979.
- [17] Bently Nevada Corporation: Rotating Machinery Information Systems and Services. Applications Note. Minden, 1990.
- [18] BERNATT M.: Ekspertyzy i oceny przyczyn uszkodzeń silników elektrycznych dużej mocy. Wyd. BOBRME, Katowice 2003, Maszyny Elektryczne, nr 65, 2003, str. 47–54.
- [19] BERNATT M.: O awaryjności silników klatkowych wysokiego napięcia. Wyd. BOBRME, Katowice 2004, Maszyny Elektryczne, nr 68, 2004, str. 37–40.
- [20] BERNATT J., BERNATT M.: Ekspertyzy i oceny przyczyn uszkodzeń silników elektrycznych dużej mocy – cz. 2. Wyd. BOBRME, Katowice 2004, Maszyny Elektryczne, nr 68, 2004, str. 41–46.
- [21] BERTENSHAW D., SASIC M.: On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.



- [22] BIERNACKI A., ZIELONKA A.: Metody diagnozowania stanu izolacji silników elektrycznych wysokiego napięcia” *Wiadomości Elektrotechniczne* 1996, nr 12.
- [23] BLOKHINTSEV M., GOLOVKOV A., GOLUBEV C., KANE: Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment, *IEEE PES'98*, February 1–5, Tampa 1998.
- [24] BLOKHINTSEV I., PATTERSON C.: Continuous Partial Discharge Monitoring on rotating Machines, *75<sup>th</sup> Annual International Doble Client Conference*, 2008.
- [25] BOCZAR T.: Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niepełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie*, z. 146, Opole 2003.
- [26] BOCZAR T.: Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyładowań niepełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie*, z. 149, Opole 2003.
- [27] BOCZAR T.: Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wyładowań niepełnych, *Studia i Monografie z. 259*, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Politechnika Opolska* 2010.
- [28] BORECKI H.: Narażenia izolacji i innych elementów konstrukcyjnych maszyn elektrycznych WN. *Wyd. BOBRME, Katowice 2003, Maszyny Elektryczne*, nr 65, 2003, str.55–62.
- [29] BORECKI H.: Kontrola jakości izolacji elementarnych przewodów uzwojenia prętowego stojana. *Wyd. BOBRME, Katowice 2005, Maszyny Elektryczne*, nr 72, 2005, str. 87–90.
- [30] BRUETSCH R., TARI M., ISOLA R., FROEHLICH K., WEIERS T., VOGEL-SANG R.: High Voltage Insulation Failure Mechanisms. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC Canada, June 8–11, 2008*.
- [31] BRÜEL & KJÆR: Systematic Machine Condition Monitoring. Application notes BO 0299-11.
- [32] Cantoni Group: Silniki IE2 o zwiększonej mocy, 2012, [www.inducta.com.pl](http://www.inducta.com.pl).
- [33] Cantoni Group: Silniki dużej mocy - seria Sf-E, Sfw, 2012, [www.inducta.com.pl](http://www.inducta.com.pl).
- [34] CELMA: Katalog trójfazowych silników indukcyjnych, Cieszyn 1999.
- [35] CEMPEL Cz. Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. *Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań* 1985.
- [36] CEMPEL Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. *PWN, Warszawa* 1989.
- [37] CEMPEL Cz., Tomaszewski F. i inni: Diagnostyka maszyn. *Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*. *Wyd. MCNEMT, Radom* 1992.
- [38] CHMELIK K.: Awaryjność silników i układów napędowych. *Wyd. BOBRME, Katowice 2000, Maszyny Elektryczne*, nr 61, 2000, str.7–10.
- [39] CHMELIK K.: Organizowanie konserwacji i napraw maszyn elektrycznych w zakładzie przemysłowym. *Wyd. BOBRME, Katowice 1999, Maszyny Elektryczne*, nr 58, 1999, str. 135–137.



- [40] CHOLEWA W.: Systemy doradcze. Wyd. Energopomiar, Gliwice 1988, Materiały Konferencyjne str.135–145, III Konferencja Naukowo-Techniczna Metrologia w energetyce, Świnoujście 11–15.04.1988.
- [41] CHOLEWA W., MOCZULSKI W.: Systemy doradcze w diagnostyce technicznej. Istota działania. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 2–3, 1990, str. 331–342.
- [42] CZUCZMAN J. Systemy zautomatyzowane do monitoringu ciągłego stanu gotowości technicznej, diagnozowania i prób zdawczo-odbiorczych maszyn elektrycznych. Wyd. BOBRME, Katowice 2000, Maszyny Elektryczne, nr 61, 2000, str. 21–28.
- [43] DĄBAŁA K.: Propozycje nowych metod wyznaczania sprawności silników indukcyjnych klatkowych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 75/2006.
- [44] DĄBROWSKI M.: Konstrukcja maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1965, 1997.
- [45] DĄBROWSKI M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT Warszawa 1988 i 1994.
- [46] DĄBROWSKI Z., KOMORSKA I., PUCHALSKI A.: Diagnozowanie błędów wykonania i montażu układów wirujących. Wyd. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2001.
- [47] DESRAYAUND G., LAURIAT G.: Heat and mass transfer analogy for condensation of humid air in vertical channel. Heat and Mass Transfer, Springer – Verlag 2001
- [48] Doble engineering Company: Application for PD Monitoring on Generators, 76<sup>th</sup> Annual International Doble Client Conference, 2009.
- [49] DOLMEL: Dokumentacja techniczna i konstrukcyjna silnika SYUe-148r (nr fabryczny 844940198), WEMA, Warszawa 1974.
- [50] DOLMEL: Instrukcja Ruchowa – DTR WX4-023001, WEMA, Warszawa, 1987.
- [51] DRAK B.: Analiza przyczyn awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych. Wyd. BOBRME, Katowice 1995, Maszyny Elektryczne, nr 50, 1995, str. 121–126.
- [52] DRAK B.: Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy. Wyd. BOBRME, Katowice 1997, Maszyny Elektryczne, nr 54, 1997, str. 82–87.
- [53] DRAK B.: Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego. Monografia, Wyd. Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe Elektryka, zeszyt nr 163, Gliwice, 1998.
- [54] DRAK B., RUT R.: Naprężenia termiczne w klatkach silników indukcyjnych dużej mocy. Wyd. BOBRME Katowice, 1999, Maszyny Elektryczne, nr 58, 1999, str.123–130.
- [55] DRAK B.: Przyczyny awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych i elektrociepłowni. Wyd. BOBRME, Katowice 2000, Maszyny Elektryczne, nr 61, 2000, str. 11–16.

- [56] DRAK B.: Zagadnienia projektowania kształtu i usztywnień czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Wyd. BOBRME, Katowice 2002, *Maszyny Elektryczne*, nr 64, 2002, str. 99–104.
- [57] DRAK B.: Statystyka uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych. Wyd. BOBRME, Katowice 2003, *Maszyny Elektryczne*, nr 65, 2003, str. 41–46.
- [58] DUPUIS M., DERNEDDE E., CLARKE D.: Turbulence modeling of air circulation in an enclosure with multiple openings and local heat sources, Alcan International Limited, Arvida and Development Centre Jonquiere, Quebec, Canada 2000.
- [59] DZIERŻANOWSKI A., SZYMANIEC S.: Diagnostyka eksploatacyjna silników elektrycznych, doświadczenia własne. XXXII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kraków 26–29.06.1996, *Materiały Konferencyjne*, str. 37–42.
- [60] DZIERŻANOWSKI A., SZCZOT F., SZYMANIEC S.: Wykorzystanie cewek Rogowskiego oraz układów optoelektronicznych i światłowodowych do pomiarów prądu i diagnostyki prądowej maszyn elektrycznych. Wyd. BOBRME, Katowice 2003, *Maszyny Elektryczne*, nr 65, 2003, str. 143–148.
- [61] Eaton, broszury informacyjne i karty katalogowe, źródło [www.eaton.com](http://www.eaton.com), 2012
- [62] FENGER M., STONE G.C.: Investigation of the effect of humidity on partial discharge activity in stator windings. Iris Power Engineering, Toronto, ON-M9C1B2, Nota aplikacyjna 2002.
- [63] FENGER M., STONE G.C., LLOYD B.: Continuous on-line PD monitoring for motors, switchgear and dry-type transformers. Iris Power Engineering, Toronto, ON-M9C1B2, Nota aplikacyjna 2003.
- [64] FLESZYŃSKI J.: Diagnostyka izolacji urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia CIGRE 96. *Energetyka*, nr 11, 1997, str. 601–605.
- [65] FLORKOWSKA B.: Wylądowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów, Polska Akademia Nauk Instytut Podstawowych problemów techniki, Warszawa 1997.
- [66] FLORKOWSKA B., FLORKOWSKI M., WŁODEK R., ZYDRON P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wylądowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Polska Akademia Nauk Instytut Podstawowych problemów techniki, Warszawa 2001.
- [67] FLORKOWSKI M.: Wpływ harmonicznego wysokiego napięcia na obrazy wylądowań niezupełnych, Jakość i użytkowanie energii elektrycznej, Tom VIII, zeszyt 1/2, rok 2002, str. 17–21.
- [68] Fluid Dynamics Analysis Package, FIDAP Theory manual revision 8.0, Fluid Dynamics Corp, 1999.
- [69] FOLTAŃSKA-WERSZKO D.: Teoria systemów cieplnych – termodynamika – podstawy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [70] GAWIN D.: Komputerowa symulacja procesów wymiany masy i energii w budynku, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1998.
- [71] GIEMKE R.G.: Niedomagania maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1962.

- [72] GLINKA T.: Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń stojana silników indukcyjnych wysokiego napięcia. Wyd. BOBRME, Katowice 1992, *Maszyny Elektryczne*, nr 45, 1992, str. 17–21.
- [73] GLINKA T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Wyd. BOBRME, Katowice 1998.
- [74] GLINKA T., BERNATT J.: Doświadczenia z badań diagnostycznych izolacji uzwojeń WN napięciem stałym. IV seminarium Techniczne „Materiały i układy elektroizolacyjne w przemyśle”, Ustroń 7–9.10.1998. str. 102–109, *Materiały Konferencyjne*.
- [75] GLINKA T.: Przepięcia łączeniowe w maszynach elektrycznych. Wyd. BOBRME, Katowice 1998, *Maszyny Elektryczne*, nr 55, 1998, str. 152–156.
- [76] GLINKA T., KULESZ B.: Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Politechniki Wrocławskiej* Nr 49 – Diagnostyka Maszyn Elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [77] GLINKA T.: Porównanie parametrów układu izolacyjnego maszyn elektrycznych o różnym stopniu zużycia. Wyd. BOBRME, Katowice 2000, *Maszyny Elektryczne*, nr 61, 2000, str. 115–118.
- [78] GLINKA T., JAKUBIEC M., KŁAPCIŃSKI K., KULESZ B.: Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej maszyn elektrycznych zasilanych z falowników PWM. Wyd. BOBRME, Katowice 2001, *Maszyny Elektryczne*, nr 62, 2001.
- [79] GLINKA T.: Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Wyd. BOBRME, Katowice 2004, *Maszyny Elektryczne*, nr 68, 2004, str. 13–18.
- [80] GŁOWACKI J., GOŃKA J., RUSEK J.: System automatycznej diagnostyki maszyn elektrycznych. Wyd. BOBRME, Katowice 1997, *Maszyny Elektryczne*, nr 54, 1997, str. 95–99.
- [81] GOLUBEV A, PAOLETTI G.: Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment. 2000 IEEE. Reprinted, with permission, from Paper 99–25 presented at the IAS 34th Annual Meeting, Oct 3–7, '99, Phoenix, AZ.
- [82] GREEN V.: Results from US Utilities Using New Instrument for Continuous On-Line Partial Discharge Measurement. Fourth Int. Conf. on Generator and Motor Partial Discharge Testing, Houston, Texas. USA.
- [83] GRYBOŚ R.: Dynamika maszyn wirnikowych. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 1994.
- [84] GULSKI E.: Diagnostowanie wyładowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [85] HANDZEL Z., ZIEMBA S.: Fizyczne aspekty trwałości i niezawodności obiektów technicznych. IPPT PAN, Warszawa 1976.
- [86] HAVILAND R.P.: Niezawodność urządzeń technicznych. PWN, Warszawa 1968.
- [87] HOLBOLL J.T., HENRIKSEN M., JENSEN A.: Motor insulation diagnostics by high frequency PD detection. Asnaes Power Station SK Power Company, Kallundborg, Denmark 1994.

- [88] HOOF M., LANZ S.: PD Diagnostics on Rotating Machines – Possibilities and Limitations. Electrical Insulation Conf., Cincinnati, October 26–28, 1999.
- [89] HICKIEWICZ J. i inni: Opracowanie kompleksowego systemu diagnostyki wytopianych obiektów w ZCW Góraździe, 1991–1992, materiały niepublikowane.
- [90] IEC 60034-1 Maszyny elektryczne wirujące, Część 1 – Dane znamionowe i parametry.
- [91] IEC 60034-18 Maszyny elektryczne wirujące – cz. 18: Podstawa oceny układów elektroizolacyjnych.
- [92] IEC 60085 Materiały elektroizolacje – klasyfikacja temperaturowa.
- [93] IEC 62114 Układy elektroizolacyjne – klasyfikacja temperaturowa.
- [94] IEC 60216 Materiały elektroizolacyjne – oznaczenia ciepłoodporności.
- [95] IEC 60505 Ocena i kwalifikacja układów elektroizolacyjnych.
- [96] IEC/TR 61026 Materiały elektroizolacyjne - wytyczne dotyczące stosowania badań analitycznych.
- [97] IEC 60493-1 Analiza statystyczna danych opisujących starzenie izolacji – cz.1: Metody oparte na średnich wartościach rozkładu normalnego.
- [98] IEC 60034-18-31 cz. 31: Maszyny elektryczne wirujące, Ocena termiczna i klasyfikacja układów izolacyjnych stosowanych w maszynach o mocy do 50 MVA i napięciu do 15 kV włącznie.
- [99] IEC 60034-18-34 Maszyny elektryczne wirujące, cz. 34: Procedury badawcze uzwojeń z zezwojów ukształtowanych – Ocena trwałości termomechanicznej układów izolacyjnych.
- [100] IEC 60610 Główne aspekty oceny funkcjonalna układów elektroizolacyjnych – mechanizmy starzenia i procedury diagnostyczne.
- [101] IEC 60611 Przygotowanie procedur badawczych dla oceny wytrzymałości termicznej układów elektroizolacyjnych.
- [102] INDUKTA: Silniki indukcyjne, Katalog TG-02/98 Edycja 1.
- [103] IRIS, broszury informacyjne i karty katalogowe, źródło [www.irispower.com](http://www.irispower.com), 2012.
- [104] IRD Mechanalysis: Using Spike Energy. For Fault Analysis And Machine Condition Monitoring. Technical Report 11, Inc. Columbus, Ohio 1990.
- [105] ISO 2372. Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s – Basis for specifying evaluation standards.
- [106] JACH K., i inni: Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobody, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [107] JAKUBOWSKI J., SZTENCEL R.: Wstęp do teorii prawdopodobieństwa, wydanie IV, SCRIPT, Warszawa 2010.
- [108] JEŻOWIECKA-KABSCH K., SZEWCZYK H.: Mechanika płynów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [109] KABZA Z., PLUTECKI Z.: Prognozowanie komfortu cieplnego w pomieszczeniu. Journal of Transdisciplinary Systems Science „Systems” Volume 9, Special Issue 2/1 2004, str. 452÷460, Copyright by Polish Systems Society, Wrocław 2004.

- [110] KABZA Z., PLUTECKI Z.: Thermischer Komfort In Gebäuden. "Energie Przyszłości", Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej Nr 319, Seria Inżynieria Środowiska z. 5, Opole, 2006, str. 177–187.
- [111] KALINOWSKI E.: Przekazywanie ciepła i wymienniki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [112] KANE C., POZONSKY J., CARNEY S., BLOKHINTSEV I.: Advantages of Continuous Monitoring of Partial Discharges in Rotating Equipment and Switchgear. 2003 AISE Meeting, Pittsburgh, PA, Sept. 2003.
- [113] KANE C., GOLUBEV A., BLOKHINTSEV I., PATTERSON C.: Our Response – Use of Resistive Temperature Detectors as Partial Discharge Sensor in Rotating Equipment. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007, str.183–188.
- [114] KAŻMIERKOWSKI P., KALUS M., ZWIERCHANOWSKI R.: Polski program efektywnego wykorzystania energii w napędach elektrycznych, KAPE, Warszawa 2004
- [115] KHEIRMAND A.: Partial Discharges in Large Rotating Machines. Academic dissertation, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2002.
- [116] KIELBAŚIŃSKI A., SCHWETLICK H.: Numeryczna algebra liniowa – wprowadzenie do obliczeń zautomatyzowanych, wydanie drugie, WNT, Warszawa 1992.
- [117] KLEIBER M.: Mechanika Techniczna, Komputerowe Metody Mechaniki, PWN, Warszawa 1995.
- [118] KLIMAN G.B.: The detection of faulted rotor bars in operating induction motors. Proc. of ICEM'86, München 1986, pp. 496–499.
- [119] KMIOTEK M.: Przegląd Solverów Numerycznych Stosowanych w Mechanice Obliczeniowej, Scientific Bulletin of Chełm, Section of Mathematics and Computer Science, No 1/2008, str.151–158.
- [120] KOŁODZIEJ J.A.: Wybrane zagadnienia z mechaniki płynów w ujęciu komputerowym, WPP, Poznań 2003.
- [121] KORBICZ J., KOŚCIELNY J.M., KOWALCZUK Z., CHOLEWA W.: Diagnostyka Procesów, Modele, Metody sztucznej inteligencji, Zastosowania. WNT, Warszawa, 2002.
- [122] KORONACKI J., MIELNICZUK J.: Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych, wydanie III, WNT 2006.
- [123] KOUADRIA D., RYDER D.M., MILLER R., THOMPSON A.I.: On-site application of a computer aided system for PD measurement and interpretation in electrical machines. 9th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering and Management (COMADEM), Sheffield University, UK 1996.
- [124] KUAN-TZONG L., HON-LING T., WEI-MON Y.: Mixed Convection Heat and Mass transfer in vertical rectangular ducts. Heat and Mass Transfer, Elsevier Science, 1996.

- [125] KRAFTHFER B., SHAH D.J.: Implications of room air motion on control of thermal comfort in rooms with natural convection heat sources, Honeywell Technology center, Minneapolis, USA 2000.
- [126] KRATOCHWIL Z., ZEMBRZUSKI J.: Uzwojenia silników indukcyjnych. PWT, Warszawa 1961.
- [127] KRATOCHWIL Z.: Technologia wytwarzania maszyn elektrycznych wirujących. WNT, Warszawa 1973.
- [128] KRZEMINSKI - FREDA H.: Łożyska toczne. PWN, Warszawa 1989.
- [129] LATEK W.: Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle. WNT, Warszawa 1987.
- [130] LAUNDER B.E. SPALDING D.B.: Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London, England, 1972.
- [131] LECHOWSKI Z.: Budowa maszyn elektrycznych. Układy izolacyjne uzwojeń maszyn prądu przemiennego. Wyd. Uczelniane Politechniki Poznańskiej, Poznań 1973.
- [132] LECHOWSKI Z.: Analiza wyładowań niepełnych w badaniach układów izolacyjnych uzwojeń maszyn elektrycznych. Prace Instytutu Energetyki, zeszyt 9, Warszawa 1980.
- [133] LECHOWSKI Z.: Narażenia uzwojeń stojanów generatorów dużej mocy. PWN, Warszawa – Poznań 1982.
- [134] LEMKE E., STREHL T.: On-line und *Off-line* Diagnose rotierender Hochspannungsmaschinen. Lemke Diagnostics GmbH Volkersdorf Deutschland.
- [135] LEMKE E., STREHL T.: PC-gestützte Messung und Analyse von Teilentladungen zur *On-line* und *Off-line* Diagnose rotierender Hochspannungsmaschinen. Lemke Diagnostics GmbH Volkersdorf Deutschland, 1989.
- [136] LEMKE E.: Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270, CIGRE, copyright 2008.
- [137] LI Y., FUCHS L., BAI X.: Accurate numerical simulation of air flows in ventilated multi-rooms, Department of Gasdynamics The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 1999.
- [138] LISOWSKI M.: Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [139] LIPOWCZAN A. i inni: Wibroakustyczna diagnostyka maszyn i urządzeń górniczych. Praca zbiorowa, Wyd. GIG 1986.
- [140] LITTELFUSE: Motor Protection for Medium Voltage Application (above 600Volts), Technical Application Guide, 2010 Littelfuse POWR-GARD Products, [www.littelfuse.com](http://www.littelfuse.com).
- [141] LUCAS J.R.: High Voltage Engineering, Ebook 2001.
- [142] MEGGS R.W., DAFFEY K.: Partial Discharge Monitoring in Marine HV Systems. IMAREST 2011.
- [143] MACZEK K., SCHNOTALE J., SKRZYNIOWSKA D., Sikorska-Bączek R.: Uzdatnianie powietrza w inżynierii środowiska dla wentylacji i klimatyzacji. Politechnika Krakowska 2004.

- [144] MAJCHRZAK E., MOCHNACKI B.: Metody numeryczne – podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [145] MENTER F.R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605, August 1994.
- [146] METHA D.P., WOODS J.E.: An Experimental Validation of a Rational Model for Dynamic Responses of Building, *ASHRAE Transaction* 1980 part 2, volume 86.
- [147] MNICH T.: Wykorzystanie modeli cieplnych silników indukcyjnych do estymacji prędkości obrotowej. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 77/2007, str.237–241.
- [148] MNICH T.: Ocena możliwości zastosowania określonego schematu cieplnego silnika indukcyjnego w szerszym zakresie mocy znamionowej. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 80/2008, str. 205–209.
- [149] MNICH T.: Wykorzystanie modeli cieplnych silników indukcyjnych do estymacji prędkości obrotowej. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 82/2009, str. 153–158.
- [150] MOCZULSKI W.: Typowe relacje diagnostyczne. Wyd. Energopomiar, Gliwice 1988, III Konferencja Naukowo - Techniczna Metrologia w energetyce, Świnoujście, 04.1988, Materiały Konferencyjne str. 38–50.
- [151] MOREL J.: Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego. Wyd. PTDT, Warszawa 1992.
- [152] MUKOSIEJ J., ZAPAŚNIK R.: Badania cieplne i wentylacyjne maszyn elektrycznych. WNT 1964.
- [153] MUSZALSKI Z., RAFALSKI W., WILK A.: Wpływ dynamicznych zmian obciążenia maszyn budowy zamkniętej na obniżenie stopnia niezawodności pracy izolacji, XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kazimierz Dolny, 13–17 czerwca 1994, str. 354–359.
- [154] NABATI H.: Investigation on Numerical Modeling of Water Vapour Condensation from a Flue Gas with High CO<sub>2</sub> Content. *Energy and Power Engineering*, 2011, str. 181–189.
- [155] Norma IEC 34-1. Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania.
- [156] OKOŁOWICZ-GRABOWSKA B., TURLEJSKI S.: Model matematyczny procesów wymiany ciepła w pomieszczeniu, *Badania i rozwiązania w ogrzewnictwie, ciepłownictwie, wentylacji i klimatyzacji*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987.
- [157] PEŁCZEWSKI W.: Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych. PWN 1956.
- [158] PN-88/E-06701. Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania.
- [159] PN-88/E-06714. Maszyny elektryczne wirujące. Drgania. Metody badań i dopuszczalna intensywność.
- [160] PN-90/N-01358. Drgania. Metody pomiarów i oceny drgań maszyn.
- [161] PN-98/E-04700. Urządzenia i układy elektryczne. Wytyczne przeprowadzenia pomontażowych badań odbiorczych.



- [162] PN-IEC 34-14. Maszyny elektryczne wirujące. Drgania mechaniczne określonych maszyn o wzniosach osi wału 56 mm i większych. Pomiar, ocena i wartości graniczne drgań.
- [163] PN-ISO 10816-1. Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących. Wytyczne ogólne.
- [164] PN-85/N-08013/ISO 7730: Środowiska termicznie umiarkowane, Określanie wskaźników PMV, PPD i wymagań dotyczących komfortu termicznego.
- [165] PN-EN/ISO/6946: Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [166] PN-82/B-02402: Temperatury ogrzewanych pomieszczeń w budynkach.
- [167] PN-82/B-02403: Temperatury obliczeniowe zewnętrzne.
- [168] PN-87/N-08016 / ISO 7726: Pomiary i metody pomiaru wielkości fizycznych.
- [169] PLUTECKI Z.: Analiza zjawisk ciepłno-przepływowych w ogrzewanym pomieszczeniu. Archiwum energetyki, tom XXXIII 2004 nr 1–2, Wydawnictwo Komitetu Problemów Energetyki przy Prezydium Polskiej Akademii Nauk, str., Gdańsk 2004.
- [170] PLUTECKI Z.: Modelowanie złożonej wymiany ciepła w pomieszczeniu. rozdział 9 str. 251–266, (Modelowanie matematyczne procesów zaopatrzenia w ciepło i energię) Wydawnictwo Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Energetyka i Środowisko, Warszawa 2006.
- [171] PLUTECKI Z.: Symulacja rozkładu temperatury na powierzchni przegród budowlanych. XI Międzynarodowe Forum Energetyków, Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej Nr 323/2008 seria Elektryka z. 60, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2008, str.195–196.
- [172] PLUTECKI Z.: Modeling of Heat Transfer In The Heating Rooms by a not Stationary Conditions. XII International Conference AIR Conditioning Protection & District Heating 2008, Edition PZITS Nr 879, Wrocław–Szklarska Poręba 26 ÷ 29 June 2008, str. 367–372.
- [173] PLUTECKI Z.: Wieloparametryczna ocena warunków komfortu cieplnego. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 02/2011, ISSN 0032-4140, str. 153–156.
- [174] PLUTECKI Z.: Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych w maszynach elektrycznych. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 90 (2/2011), 2011, str. 35–40.
- [175] PLUTECKI. Z., SZYMANIEC S.: Pomiary i monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle - doświadczenia własne. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 89 (1/2011), 2011, str. 33–38.
- [176] PLUTECKI Z., NOWOSIELSKI G.: Badania symulacyjne przepływów dwufazowych w instalacji suszącej węgiel brunatny metodą fluidalną. Zarządzanie Energią i Teleinformacją, Materiały i Studia, Redakcja Rynku Energii - KAPRINT 2011, SDN 978-83-927680-9-8, str.129–138.



- [177] PLUTECKI Z., SZYMANIEC S.: Pomiary i monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle – doświadczenia własne. Przegląd Elektrotechniczny, vol 2012, Nr 4a, str. 56–59.
- [178] PLUTECKI Z.: Analiza wpływu warunków otoczenia na emisję wyładowań niezupełnych w maszynach elektrycznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 95 (2/2012), 2012, str. 147–152.
- [179] PLUTECKI Z.: Analiza zjawisk ciepłno-przepływowych kształtujących się w otoczeniu pracujących maszyn elektrycznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 96 (3/2012), 2012, str. 19–24.
- [180] PROCZEK M.: Układ izolacyjny dla stojanów silników wysokiego napięcia. Wyd. BOBRME, Katowice 1992, Maszyny Elektryczne, nr 45, 1992.
- [181] Przepisy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Dział I, zeszyt 8. Eksploatacja elektrycznych urządzeń napędowych. Wyd. Instytut Energetyki, Warszawa 1988.
- [182] PRZYBYSZ J., SZYDŁOWSKI M.: Diagnostyka układów izolacyjnych uzwojeń stojanów generatorów, VI Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów izolacyjnych Wysokiego Napięcia, Zakopane, 23–25 października 1997, str. 277–284.
- [183] PRZYBYSZ J.: Diagnostyka izolacji uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, Studia i materiały, nr 21, 2000.
- [184] RADKOWSKI S., ZAWISZA M.: Kurtoza jako parametr diagnostyczny – możliwości i ograniczenia. Przegląd Mechaniczny, nr 8, 1996.
- [185] RAMS W., RUSEK J.: Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych. Wyd. BOBRME, Katowice 2004, Maszyny Elektryczne, nr 68, 2004, str. 1–6.
- [186] RAMOS J.A.E., MARTINHO N.A.G., PITARMA R.A., CARVALHO M.G.: Three-dimensional natural convection in rooms connected to the outside through large openings, Departamento de Engenharia Mecanica, ESTG-Instituto Pilitecnico de Leiria, Portugal 1998.
- [187] RANDALI R.B.: Frequency Analysis. Bruel & Kjaer 1987.
- [188] RICHTR J., KATOLICKY J., JICHA M.: Numerical modeling of the influence of angle adjustment of A/C diffuser vanes on thermal comfort in computer room, International Conference on Building simulation, Rio de Janeiro, Brasil, 13–15 August 2001.
- [189] Rockwell Automation, Basics for practical operation Motor protection, 2008
- [190] RUSOW W.A.: Zmierzenie ciastycznych pazriadow w izolacji wysokowoltnowo oborudowania, Dimrus, ISBN No 978-5-94614-177-2, B.A. Rusow 2011.
- [191] RUSOW W.A.: Diagnosticeskij monitoring wysokowoltnych silowych transformatorow, Dimrus, B.A. Rusow, 2012.
- [192] SASIC M.: Partial discharge measurement on rotating machines. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, Veracruz, Mexico 1999.

- [193] SASIC M., BERTENSHAW D.: On-line Partial Discharge Monitoring on MV Motors –Case Studies on Improved Sensitivity Couplers and Interpretation Methods, SDEMPED, ITALY 1–3 Sept. 2001 pp. 1–5.
- [194] SENN F., MUHR M., LADSTATTER W., GRUBELNIK W.: Complexity of Determining Factors for the Thermal Evaluation of High Voltage Insulation Systems on the Example of Rotating Machines, DISEE, Demanovska Dolina, Slovakia 2008.
- [195] SEZAI I., MOHAMAD A.A.: Natural convection from a discrete heat source on the bottom of horizontal enclosure, I.J.H.M.T., 43, p.2257-2266, 2000.
- [196] SHIH T.H., LIOU W.W., SHABBIR A., ZHU J.: A new  $k-\epsilon$  eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation, Computers Fluids, 24(3):227-238, 1995.
- [197] SIEGEL R., HOWELL J.R.: Thermal radiation heat transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C., 1992.
- [198] Simpson J.: Shock Pulse Monitoring, Routine Condition monitoring Material. MRDE Report Bretby U.K. ANG. 1984.
- [199] SIUTA T.: Możliwości wykorzystania programu Fluent w pracach realizowanych w Instytucie Nafty i Gazu, Nafta-Gaz, nr 1/2011, str. 53–63
- [200] SKF, broszury informacyjne i karty katalogowe, źródło [www.skf.com](http://www.skf.com), 2012.
- [201] SKUBALSKA-RAFAJŁOWICZ E.: Sieci neuronowe w przetwarzaniu strumieni danych, Struktury sieci i algorytmy uczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [202] SKUBIS J.: Diagnostyka wzn metodą EA w transformatorach dużej mocy podczas ich eksploatacji. Energetyka nr 6, 1997, str. 286–291.
- [203] SKUBIS J.: Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1998 r.
- [204] SKUBIS J.: EA w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. IPPT-PAN, Studia i Monografie nr 99, Opole 1998.
- [205] STANISZEWSKI B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne, PWN, Warszawa 1980
- [206] STONE G.C.: In-service evaluation of motor and generator windings usings partial discharge tests. IEEE Transactions on Industry Applications 31(2), 1995, pp. 299–303.
- [207] STONE G.C.: The Use of Partial Discharge Measurements to Assess the Condition of Rotating Machine Insulation. DEIS. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12, No.4, 1996, pp. 23–27.
- [208] STONE G.C., BOULTER E.A., CULBERT I., DHIRANI H.: Electrical insulation for rotating machines. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [209] STONE G.C, CAMPBELL S.R.: Digital Methods of Eliminating Noise in On-Line Generator PD Measurements, IEEE Winter Power Meeting, Publication 92-THO-425-9-PWR, February 1992.

- [210] STONE G.C., SEDDING H.G., COSTELLO M.J.,: Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, March/April 1996, pp. 459-464.
- [211] SUBOCZ J.: Rozproszenie dielektryczne w izolacji maszyn WN – pomiary eksploatacyjne. Przegląd Elektrotechniczny, nr 10s, rok 2002.
- [212] SUBOCZ J.: Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej. Monografia, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 580, Instytut Elektrotechniki nr 30, Szczecin 2003.
- [213] SUBOCZ J.: Ocena jakości wykonania izolacji maszyn WN na podstawie pomiarów niskoczęstotliwościowych, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 76/2007.
- [214] SUBOCZ J., SZROT M.: Nowoczesne metody diagnostyki izolacji maszyn WN. XIV Konferencja Remontowa Energetyki, Książ, 7-9.09.2005, materiały konferencyjne, str. 303–314.
- [215] SUBOCZ J., SZROT M., PŁOWUCHA J.: Nowoczesne metody diagnostyki izolacji silników i generatorów WN. Wyd. BOBRME, Katowice 2006, Maszyny Elektryczne, nr 74, 2006, str. 121–128.
- [216] SULIMA T.: Materiały i układy izolacyjne maszyn i aparatów elektrycznych. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987.
- [217] SUMEREDER C., MUHR M., GROBALBER M., AHRER A., BALBER H., KORBLER B.: Observation of Dielectric Parameters at generator Stator Windings Under Changing Environmental Condition, Proceeding of 16<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage engineering, Innes House, Johannesburg SAIEE 2009.
- [218] SZARGUT J. i inni: Modelowanie numeryczne pól temperatury, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
- [219] SZYMANIEC S.: Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego. Wyd. BOBRME, Katowice 2005, Maszyny Elektryczne, nr 72, 2005, str. 167–172.
- [220] SZYMANIEC S.: Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Studia i Monografie z. 193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
- [221] SZYMANIEC S.: Pomiary *on-line* stanu izolacji uzwojeń silników wysokonapięciowych indukcyjnych klatkowych, Wyd. BOBRME, Katowice 2008, Maszyny Elektryczne, nr 79, 2008, str. 91–96.
- [222] SZYMANIEC S.: Eksploatacja silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych w przemyśle. Napędy i Sterowanie, 2008, nr 12, str. 28–35.
- [223] SZYMANIEC S.: Diagnostyka w przemysłowych napędach elektrycznych. Napędy i Sterowanie, 2009, nr 4, str. 26–32.
- [224] SZYMANIEC S.: Eksploatacja i diagnostyka silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych w przemyśle. Śląskie Wiadomości Elektryczne, 2009, nr 2, str. 16–21.

- [225] SZYMANIEC S.: Eksploatacja i diagnostyka silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych w przemyśle. XLV International Symposium on Electrical Machines - SME 2009, Rzeszów - Krasiczyn, 23-26.06.2009, Wyd. BOBRME, Katowice 2009, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 84 str. 127–132.
- [226] SZYMANIEC S.: Eksploatacja i diagnostyka maszyn w przemysłowych napędach elektrycznych. Wiadomości Elektrotechniczne, 2009, nr 10, str. 3–9.
- [227] SZYMANIEC S.: Diagnostyka w przemysłowych napędach elektrycznych. Wirtualny Nowy Przemysł, www.wnp.pl –2009.12.16.
- [228] SZYMANIEC S.: Eksploatacja diagnostyka i remonty silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych w przemyśle i w energetyce. Energetyka 2010, nr 5, str. 285–290.
- [229] SZYMANIEC S., PLUTECKI Z.: Praca maszyn elektrycznych w różnych warunkach mikroklimatycznych. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych Tom 2, Studia i materiały, Oficyna PWR, Wrocław 2012, str. 189–199.
- [230] SZYMANIEC S., PLUTECKI Z.: Wpływ warunków otoczenia na emisję wyładowań niezupełnych w maszynach elektrycznych. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, tom 2, Studia i Materiały, Oficyna PWR, Wrocław 2012, str. 200–210.
- [231] ŚLIWOWSKI L.: Mikroklimat wnętrza i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [232] TADEUSIEWICZ R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
- [233] TARNOWSKI W., BARTKIEWICZ S.: Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2000.
- [234] TAVNER P.J., PENMAN J.: Condition Monitoring of Electrical Machines. Research Studies Press Ltd, Letchworth, Hertfordshire, 1987.
- [235] TOMMASINI D.: Dielectric Insulation & High Voltage Issues, CERN, Bruges 16–25 June 2009.
- [236] TUŁODZIECKA E., ANDRZEJEWSKI K., PIETRZAK K.: Monitorowanie układów izolacyjnych uzwojeń stojanów turbogeneratorów GTHW-360 w Elektrowni Bełchatów na podstawie pomiarów *wnz* w systemie off-line. XIV Konferencja Energetyki, Książ 7–9.09.2005, Materiały Konferencyjne, str. 331–350.
- [237] UHL T.: Współczesne trendy rozwojowe systemów monitorowania i diagnozowania maszyn. Pomiary-Automatyka Kontrolna, 1999, nr 4.
- [238] WARREN V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Iris Rotating Machinery Conference, USA, Santa Monica, June 2003, pp. 1–13.
- [239] WARREN V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Statistical Evaluation of PD Data, PD Progress Report, IRMC 2009.
- [240] WARREN V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Statistical Evaluation of PD Data, PD Progress Report, IRMC 2010.

- [241] WARREN V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Statistical Evaluation of PD Data, PD Progress Report, IRMC 2011.
- [242] WILCOX D.C.: Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998.
- [243] WIŚNIEWSKI W.: Diagnostyka techniczna wytwórczych urządzeń energetycznych w elektrowniach. PWN, Warszawa, 1991.
- [244] WIŚNIEWSKI S.: Termodynamika techniczna, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
- [245] WIŚNIEWSKI S., WIŚNIEWSKI S.T.: Wymiana ciepła, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [246] VENKATARAMAN B., GODSEY B., PREMERLANI W., SHULMAN E., THAKUR M., MIDENCE R.: Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Application in Motor Protection, 58<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers (IEEE Cat. No.05EX997), 2005, str. 127–144.
- [247] VOGELSANG R., WEIERS T., FROHLICH K., BRUTSCH R.: Electrical Breakdown in High-Voltage Winding Insulation of Different Manufacturing Qualities, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2005 – Vol. 22, No.3, str. 5–12.
- [248] YUFEREV V.S., VASIL'EV E.N., KOLESNIKOVA E.N.: New discrete P1-approximation approach to solution radiative transfer equation in multidimensional an complex domains, Technical Institute of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia 2001.
- [249] ZAPAŚNIK R.: Współczesne trendy rozwojowe przemysłowych silników indukcyjnych. Wyd. BOBRME, Katowice 2002, Maszyny Elektryczne, nr 64, 2002, str. 1–8.
- [250] ZEMBRZUSKI J.: Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych. WNT, Warszawa 1992.
- [251] ŻURADA J., BARSKI M., JĘDRUCH.: Sztuczne sieci neuronowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996 r.
- [252] ŻYSZKOWSKI Z.: Miernictwo akustyczne. WNT, Warszawa 1987.



## Spis załączników

- Załącznik 1** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanych zbiorów danych, pomiary dla silników: SE-1, SE-2 i SE-3 (**tab. 1÷9**)
- Załącznik 2** Diagramy korelacyjne przedstawiające wpływ temperatury powietrza na wskaźniki PPS,  $Q_{\max}$  i PDI opracowane dla silnika SE-1 (**rys. 1÷6**)
- Załącznik 3** Diagramy korelacyjne przedstawiające wpływ wilgotności względnej RH na wskaźniki PPS,  $Q_{\max}$  i PDI opracowane dla silnika SE-1 (**rys. 7÷12**)
- Załącznik 4** Diagramy korelacyjne przedstawiające wpływ zawartości wilgotności w powietrzu X na wskaźniki PPS,  $Q_{\max}$  i PDI opracowane dla silnika SE-1 (**rys. 13÷18**)



## Załącznik 1

- Tabela 1.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.) – intensywność wyładowań niezupełnych **PPS** (SE-1)
- Tabela 2.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.) – amplituda wyładowań niezupełnych **Q<sub>max</sub>** (SE-1)
- Tabela 3.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.) – moc wyładowań niezupełnych **PDI** (SE-1)
- Tabela 4.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.) – silnik SE-2
- Tabela 5.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.) – silnik SE-2, okres letni
- Tabela 6.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.) – silnik SE-2, okres zimowy
- Tabela 7.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.) – generator SE-3
- Tabela 8.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.) – generator SE-3, okres letni
- Tabela 9.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.) – generator SE-3, okres zimowy



**Tabela 2.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiaru zgromadzone w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.) – amplituda wyładowań niezupełnych  $Q_{max}$  (silnik SE-1)

kanal faza	1		2		3		4		5		6		10		11		12	
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	A	B
Średnia	0,0075	0,0055	0,0077	0,0084	0,0131	0,0097	0,0125	0,0074	0,0106	0,0131	0,0097	0,0125	0,0074	0,0125	0,0074	0,0106	0,0074	0,0106
Błąd standardowy	8,3E-05	7,4E-05	9,8E-05	9,9E-05	1,5E-04	1,1E-04	1,8E-04	1,1E-04	1,3E-04	1,5E-04	1,1E-04	1,8E-04	1,1E-04	1,8E-04	1,1E-04	1,3E-04	1,1E-04	1,3E-04
Mediana	0,006	0,005	0,006	0,008	0,011	0,008	0,01	0,006	0,009	0,011	0,008	0,01	0,006	0,01	0,006	0,009	0,006	0,009
Tryb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Odchylenie standardowe	0,00579	0,00513	0,00681	0,00690	0,01032	0,00799	0,01223	0,00756	0,00936	0,01032	0,00799	0,01223	0,00756	0,01223	0,00756	0,00936	0,00756	0,00936
Wariancja próbki	0,00003	0,00003	0,00005	0,00005	0,00011	0,00006	0,00015	0,00006	0,00009	0,00011	0,00006	0,00015	0,00006	0,00015	0,00006	0,00009	0,00006	0,00009
Kurtozja	-0,345	0,607	1,453	0,698	0,170	0,141	-0,169	-0,310	-0,463	0,170	0,141	-0,169	-0,310	-0,169	-0,310	-0,463	-0,310	-0,463
Skośność	0,434	0,601	0,766	0,721	0,737	0,731	0,903	0,853	0,643	0,737	0,731	0,903	0,853	0,903	0,853	0,643	0,853	0,643
Zakres	0,045	0,052	0,077	0,05	0,065	0,049	0,076	0,039	0,052	0,065	0,049	0,076	0,039	0,076	0,039	0,052	0,039	0,052
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimum	0,045	0,052	0,077	0,05	0,065	0,049	0,076	0,039	0,052	0,065	0,049	0,076	0,039	0,076	0,039	0,052	0,039	0,052
Suma	36,6	26,6	37,2	40,8	63,8	47,1	60,9	36,0	51,4	63,8	47,1	60,9	36,0	60,9	36,0	51,4	36,0	51,4
Licznik	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855
Poziom ufności (95,0%)	0,00016	0,00014	0,00019	0,00019	0,00029	0,00022	0,00034	0,00021	0,00026	0,00029	0,00022	0,00034	0,00021	0,00034	0,00021	0,00026	0,00021	0,00026

**Tabela 3.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarzy zgromadzone w okresie od 28.08.2009 r. do 31.01.2012 r.) – moc wyładowań niezupełnych **PDI (silnik SE-1)**

kanal faza	1		2		3		4		5		6		10		11		12			
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	
Średnia	0,0051	0,0006	0,0102	0,0159	0,0389	0,0389	0,0289	0,0401	0,0177	0,0292	0,0004	0,0001	0,0005	0,0006	0,0011	0,0008	0,0011	0,0006	0,0008	0,0008
Błąd standardowy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mediana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tryb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Odechylenie standardowe	0,0247	0,0085	0,0322	0,0419	0,0761	0,0761	0,0534	0,0750	0,0402	0,0531	0,0006	0,0001	0,0018	0,0058	0,0029	0,0016	0,0056	0,0016	0,0028	0,0028
Wariancja próbki	0,0006	0,0001	0,0010	0,0018	0,0058	0,0058	0,0029	0,0056	0,0016	0,0028	0,0004	0,0001	0,0018	0,0058	0,0029	0,0016	0,0056	0,0016	0,0028	0,0028
Kurtoza	35,61	277,02	14,25	21,76	11,09	11,09	5,50	2,58	4,51	4,00	5,52	15,73	3,40	3,56	2,02	1,80	1,80	2,15	1,86	1,86
Skośność	0,3000	0,2000	0,4000	0,6000	0,8000	0,8000	0,5000	0,5000	0,3000	0,4000	0,3000	0,2000	0,4000	0,6000	0,8000	0,5000	0,5000	0,3000	0,4000	0,4000
Zakres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Minimum	0,3000	0,2000	0,4000	0,6000	0,8000	0,8000	0,5000	0,5000	0,3000	0,4000	0,3000	0,2000	0,4000	0,6000	0,8000	0,5000	0,5000	0,3000	0,4000	0,4000
Maksimum	24,80	2,90	49,30	77,30	189,00	189,00	140,20	194,70	85,90	141,60	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855
Suma	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855	4855
Licznik	0,0006	0,0002	0,0009	0,0011	0,0021	0,0021	0,0015	0,0021	0,0011	0,0014	0,0006	0,0002	0,0009	0,0011	0,0021	0,0011	0,0021	0,0011	0,0014	0,0014
Poziom ufności (95,0%)																				

**Tabela 4.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgrоmadzone w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.) – cały rozpatrywany okres (**silnik SE-2**)

wskaźnik faza	PPS			Qmax			PDI		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Srednia	1194	1132	1583	0,0497	0,0430	0,0526	0,1493	0,1339	0,2174
Błąd standardowy	10	9	12	0,0002	0,0002	0,0004	0,0020	0,0016	0,0023
Mediana	1130	1094	1581	0,0510	0,0410	0,0510	0,1000	0,1000	0,2000
Tryb	1389	1217	1038	0,0540	0,0370	0,0770	0,1000	0,1000	0,3000
Odczylenie standardowe	478	420	575	0,0081	0,0087	0,0184	0,0948	0,0777	0,1077
Wariancja próbki	228 257	176 370	330 325	0,0001	0,0001	0,0003	0,0090	0,0060	0,0116
Kurtoza	-0,5	-0,5	-0,9	0,3638	1,1065	-0,6936	-0,3267	-0,1684	-0,9441
Skośność	0,4	0,4	0,0	-0,0256	0,8617	0,4907	0,4416	0,2730	-0,0197
Zakres	2800	2458	3082	0,0530	0,0590	0,0940	0,4000	0,4000	0,5000
Minimum	193	255	239	0,0240	0,0240	0,0180	0,0000	0,0000	0,0000
Maksimum	2993	2713	3321	0,0770	0,0830	0,1120	0,4000	0,4000	0,5000
Suma	2 713 178	2 572 886	3 599 233	113	98	119	339	304	494
Licznik	2273	2273	2273	2273	2273	2273	2273	2273	2273
Poziom ufności (95,0%)	19,7	17,3	23,6	0,0003	0,0004	0,0008	0,0039	0,0032	0,0044

**Tabela 5.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgrupowane w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.) – okresy letnie (**silnik SE-2**)

wskaznik faza	PPS			Qmax			PDI		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Średnia	799	828	1051	0,0411	0,0363	0,0412	0,0699	0,0770	0,1140
Błąd standardowy	10	11	14	0,0002	0,0002	0,0007	0,0021	0,0023	0,0025
Mediana	774	785	1038	0,0410	0,0360	0,0340	0,1000	0,1000	0,1000
Tryb	871	785	992	0,0370	0,0370	0,0340	0,1000	0,1000	0,1000
Odchylenie standardowe	264	291	349	0,0055	0,0053	0,0181	0,0544	0,0586	0,0645
Wariancja próbki	69 558	84 482	122 108	0,0000	0,0000	0,0003	0,0030	0,0034	0,0042
Kurtoza	0,4889	0,7619	0,0107	0,1765	1,1626	1,6747	-0,2064	0,0405	0,4971
Skośność	0,5696	0,6955	0,2280	0,0127	0,6566	1,6106	0,0589	0,2193	0,3749
Zakres	1865	1992	2209	0,0380	0,0300	0,0940	0,3000	0,3000	0,3000
Minimum	193	255	239	0,0240	0,0240	0,0180	0,0000	0,0000	0,0000
Maksimum	2058	2247	2448	0,0620	0,0540	0,1120	0,3000	0,3000	0,3000
Suma	522 508	541 294	687 613	26,9	23,7	26,9	45,6	50,3	74,5
Licznik	654	654	654	654	654	654	654	654	654
Poziom ufności (95,0%)	20,3	22,3	26,8	0,0004	0,0004	0,0014	0,0042	0,0045	0,0050

**Tabela 6.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarы zgromadzone w okresie od 29.07.2008 r. do 05.01.2012 r.) – okresy zimowe (**silnik SE-2**)

wskaźnik faza	PPS			Qmax			PDI		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Średnia	1 705	1 571	2 237	0,0558	0,0506	0,0530	0,2461	0,2105	0,3306
Błąd standardowy	16	14	12	0,0002	0,0004	0,0004	0,0032	0,0027	0,0025
Mediana	1 671	1 556	2 247	0,0540	0,0500	0,0520	0,2179	0,2000	0,3000
Tryb	1 634	1 689	2 239	0,0540	0,0530	0,0530	0,2000	0,2000	0,3000
Odchylenie standardowe	340	298	263	0,0048	0,0082	0,0087	0,0691	0,0577	0,0533
Wariancja próbki	115 577	88 946	69 017	0,0000	0,0001	0,0001	0,0048	0,0033	0,0028
Kurtoza	0,5375	0,9534	3,6315	1,3639	1,4275	5,5483	-0,2047	0,4720	-0,0656
Skośność	0,2396	-0,2077	-0,8808	1,4080	0,8374	1,8972	-0,0301	0,1034	-0,0199
Zakres	2353	2267	2363	0,0250	0,0440	0,0720	0,3000	0,3900	0,3000
Minimum	640	420	793	0,0460	0,0360	0,0370	0,1000	0,0100	0,1000
Maksimum	2993	2687	3156	0,0710	0,0800	0,1090	0,4000	0,4000	0,4000
Suma	778 964	717 743	1 022 211	25,5	23,1	24,2	112,5	96,2	151,1
Licznik	457	457	457	457	457	457	457	457	457
Poziom ufności (95,0%)	31,3	27,4	24,2	0,0004	0,0008	0,0008	0,0063	0,0053	0,0049

**Tabela 7.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarzy zgromadzone w okresie od 12.07.2006r. do 05.01.2012r.) – cały rozpatrywany okres (**generator SE-3**)

wskaźnik faza	PPS			Qmax			PDI		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Średnia	12 194	7 422	14 680	0,2325	0,2359	0,3799	3,6860	1,9186	5,9212
Błąd standardowy	58	36	58	0,0005	0,0011	0,0012	0,0174	0,0115	0,0216
Mediana	12 132	7 120	14 357	0,2310	0,2350	0,3660	3,6000	1,8000	5,9000
Tryb	10 352	6 543	15 973	0,2320	0,2430	0,3520	3,5000	1,8000	5,7000
Odchylenie standardowe	2 854	1 753	2 830	0,0256	0,0548	0,0604	0,8507	0,5622	1,0532
Wariancja próbki	8 146 390	3 074 085	8 008 585	0,0007	0,0030	0,0036	0,7236	0,3161	1,1093
Kurtoza	-0,4076	1,1824	-0,3804	4,5943	0,5333	-0,5784	0,8322	3,2324	0,5906
Skośność	0,2441	0,8598	0,2875	1,1206	-0,0675	0,1004	0,7568	1,1995	-0,1183
Zakres	15 164	12 857	17 604	0,2740	0,4160	0,4980	6,2000	4,8000	7,9000
Minimum	5 730	2 334	5 387	0,0780	0,0710	0,0750	1,1000	0,5000	1,4000
Maksimum	20 894	15 191	22 991	0,3520	0,4870	0,5730	7,3000	5,3000	9,3000
Suma	29 070 954	17 693 671	34 996 867	554	562	906	8 788	4 574	14 116
Licznik	2 384	2 384	2 384	2 384	2 384	2 384	2 384	2 384	2 384
Poziom ufności (95,0%)	115	70	114	0,0010	0,0022	0,0024	0,0342	0,0226	0,0423



**Tabela 8.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiarzy zgromadzone w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.) – okresy letnie (**generator SE-3**)

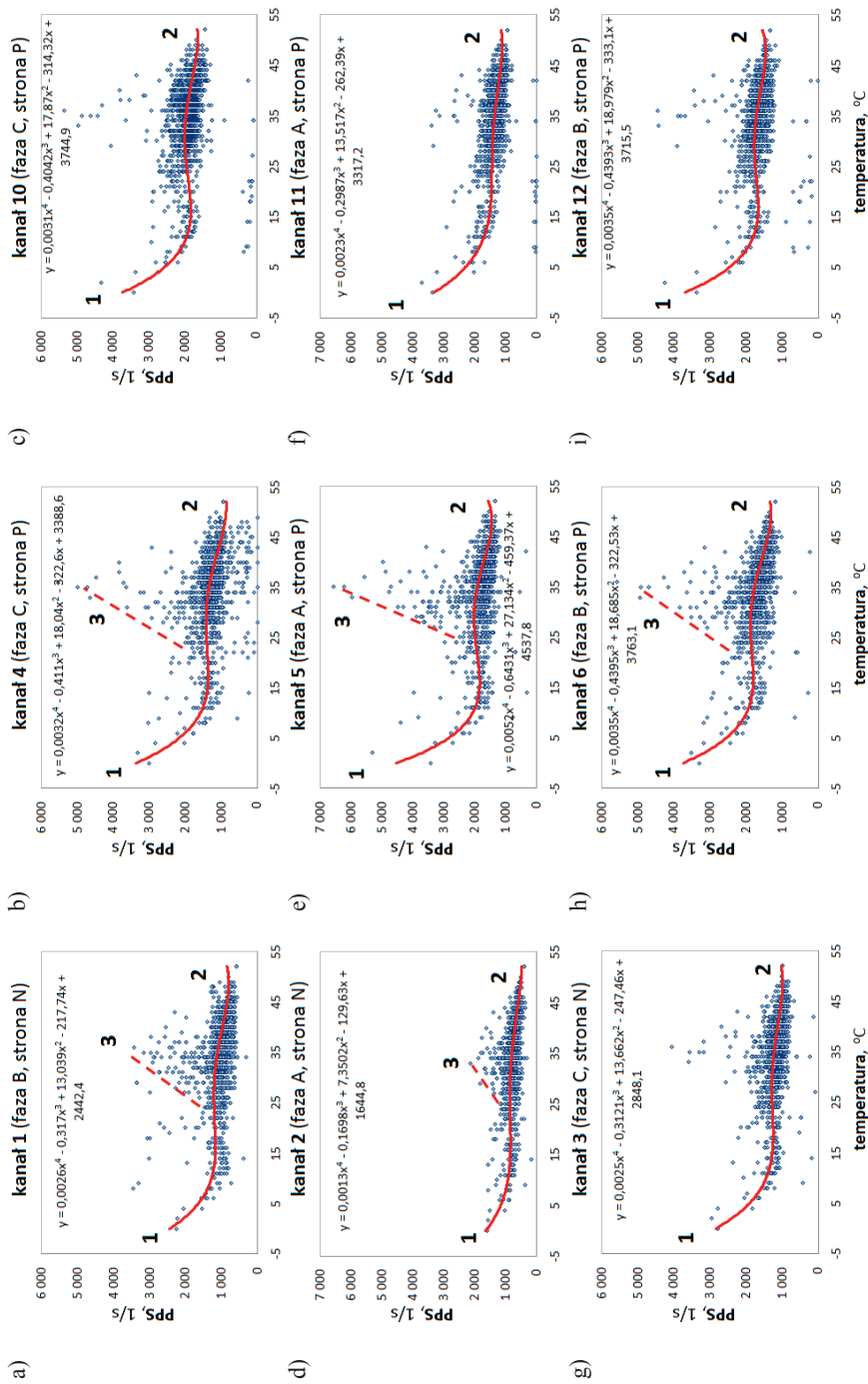
wskaźnik faza	PPS			Qmax			PDI		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Średnia	14 796	8 859	17 133	0,2238	0,2468	0,3534	4,3438	2,2961	6,6588
Błąd standardowy	83	71	92	0,0012	0,0025	0,0022	0,0324	0,0262	0,0369
Mediana	14 729	8 722	17 230	0,2240	0,2370	0,3400	4,2000	2,2000	6,6000
Tryb	13 946	7 435	15 973	0,2310	0,2430	0,3520	4,1000	2,1000	6,4000
Odchylenie standardowe	2 185	1 860	2 414	0,0304	0,0660	0,0583	0,8534	0,6905	0,9732
Wariancja próbek	4 774 365	3 460 489	5 828 201	0,0009	0,0044	0,0034	0,7283	0,4767	0,9472
Kurtoza	0,1322	0,4662	0,8122	4,1871	0,1458	0,9836	0,6483	1,3733	3,8638
Skośność	0,0581	0,4112	-0,4300	0,9708	0,0493	0,5332	0,5213	0,8225	-0,7515
Zakres	14 267	12 857	17 604	0,2740	0,4160	0,4590	6,2000	4,8000	7,9000
Minimum	6 627	2 334	5 387	0,0780	0,0710	0,0750	1,1000	0,5000	1,4000
Maksimum	20 894	15 191	22 991	0,3520	0,4870	0,5340	7,3000	5,3000	9,3000
Suma	10 283 252	6 157 201	11 907 394	156	172	246	3 019	1 596	4 628
Licznik	695	695	695	695	695	695	695	695	695
Poziom ufności (95,0%)	163	139	180	0,0023	0,0049	0,0043	0,0636	0,0514	0,0725

**Tabela 9.** Zestawienie parametrów opisu statystycznego rozpatrywanego zbioru danych (pomiaru zgromadzone w okresie od 12.07.2006 r. do 05.01.2012 r.) – okresy zimowe (**generator SE-3**)

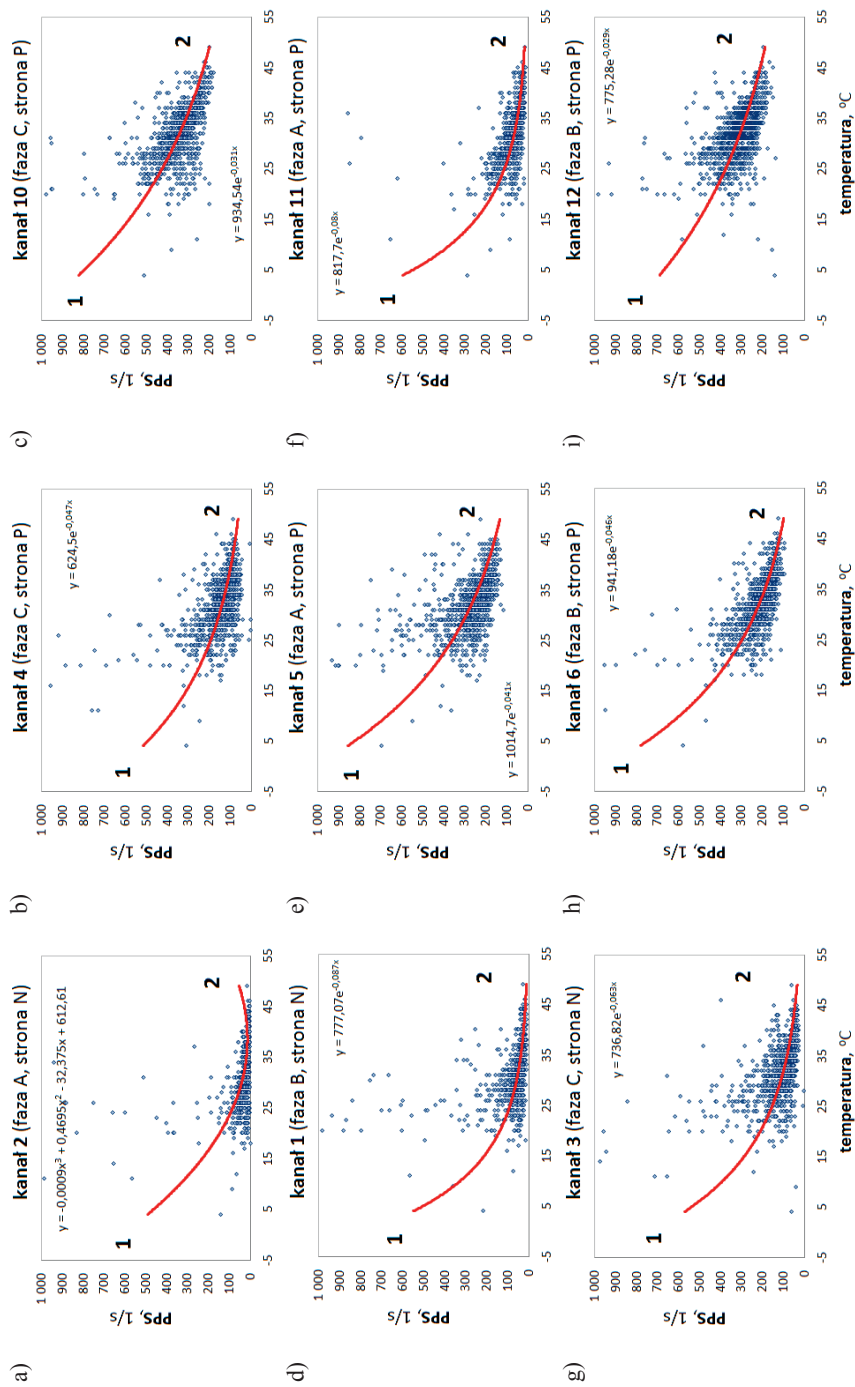
wskaźnik faza	PPS			Qmax			PDI		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Średnia	9 219	6 125	12 254	0,2350	0,2289	0,3688	2,9089	1,6345	4,8900
Błąd standardowy	72	48	81	0,0009	0,0025	0,0028	0,0235	0,0178	0,0382
Mediana	9 274	6 255	12 433	0,2320	0,2340	0,3470	2,9000	1,7000	5,1000
Tryb	9 636	6 543	14 718	0,2320	0,2400	0,3520	2,9000	1,8000	5,5000
Odchylenie standardowe	1 553	1 036	1 750	0,0201	0,0534	0,0604	0,5068	0,3851	0,8249
Wariancja próbki	2 410 577	1 073 836	3 061 935	0,0004	0,0029	0,0036	0,2569	0,1483	0,6805
Kurtoza	0,5190	0,8281	-0,1836	5,3914	-0,4279	-0,5779	3,2815	1,0432	0,0125
Skośność	0,4827	-0,0967	-0,1345	1,5551	-0,3083	0,4700	0,9814	-0,0141	-0,4065
Zakres	8421	6830	9939	0,1630	0,2525	0,3550	3,5000	2,6000	4,8000
Minimum	5901	2910	7599	0,1650	0,0845	0,2180	1,7000	0,5000	2,4000
Maksimum	14322	9740	17538	0,3280	0,3370	0,5730	5,2000	3,1000	7,2000
Suma	4 305 086	2 860 271	5 722 483	110	107	172	1 358	763	2 284
Licznik	467	467	467	467	467	467	467	467	467
Poziom ufności (95,0%)	141	94	159	0,0018	0,0049	0,0055	0,0461	0,0350	0,0750

## Załącznik 2

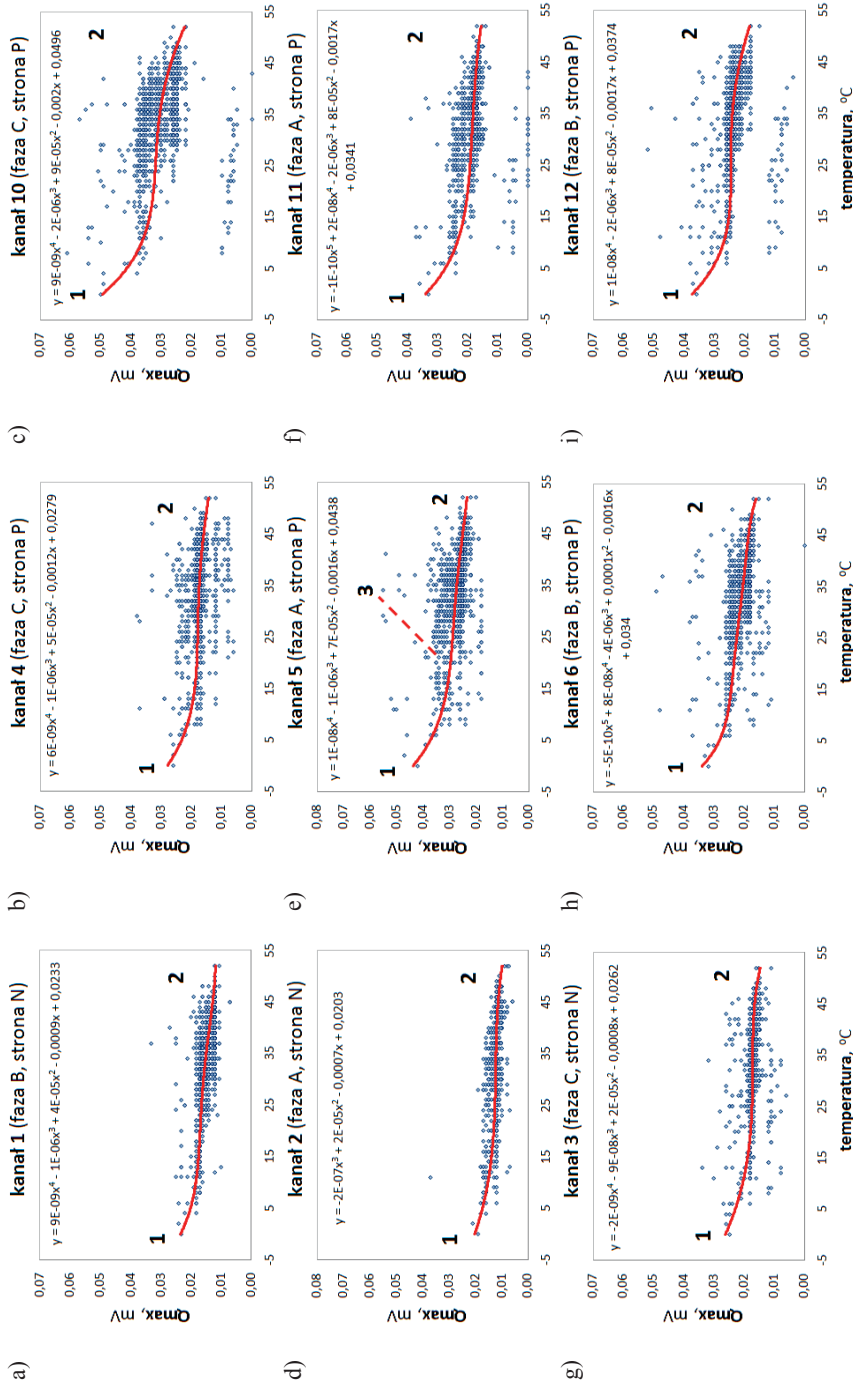
- Rysunek 1.** Diagramy korelacyjne wpływu temperatury powietrza na wskaźnik PPS opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**
- Rysunek 2.** Diagramy korelacyjne wpływu temperatury powietrza na wskaźnik PPS opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**
- Rysunek 3.** Diagramy korelacyjne wpływu temperatury powietrza na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**
- Rysunek 4.** Diagramy korelacyjne wpływu temperatury powietrza na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**
- Rysunek 5.** Diagramy korelacyjne wpływu temperatury powietrza na wskaźnik PDI opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**
- Rysunek 6.** Diagramy korelacyjne wpływu temperatury powietrza na wskaźnik PDI opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**



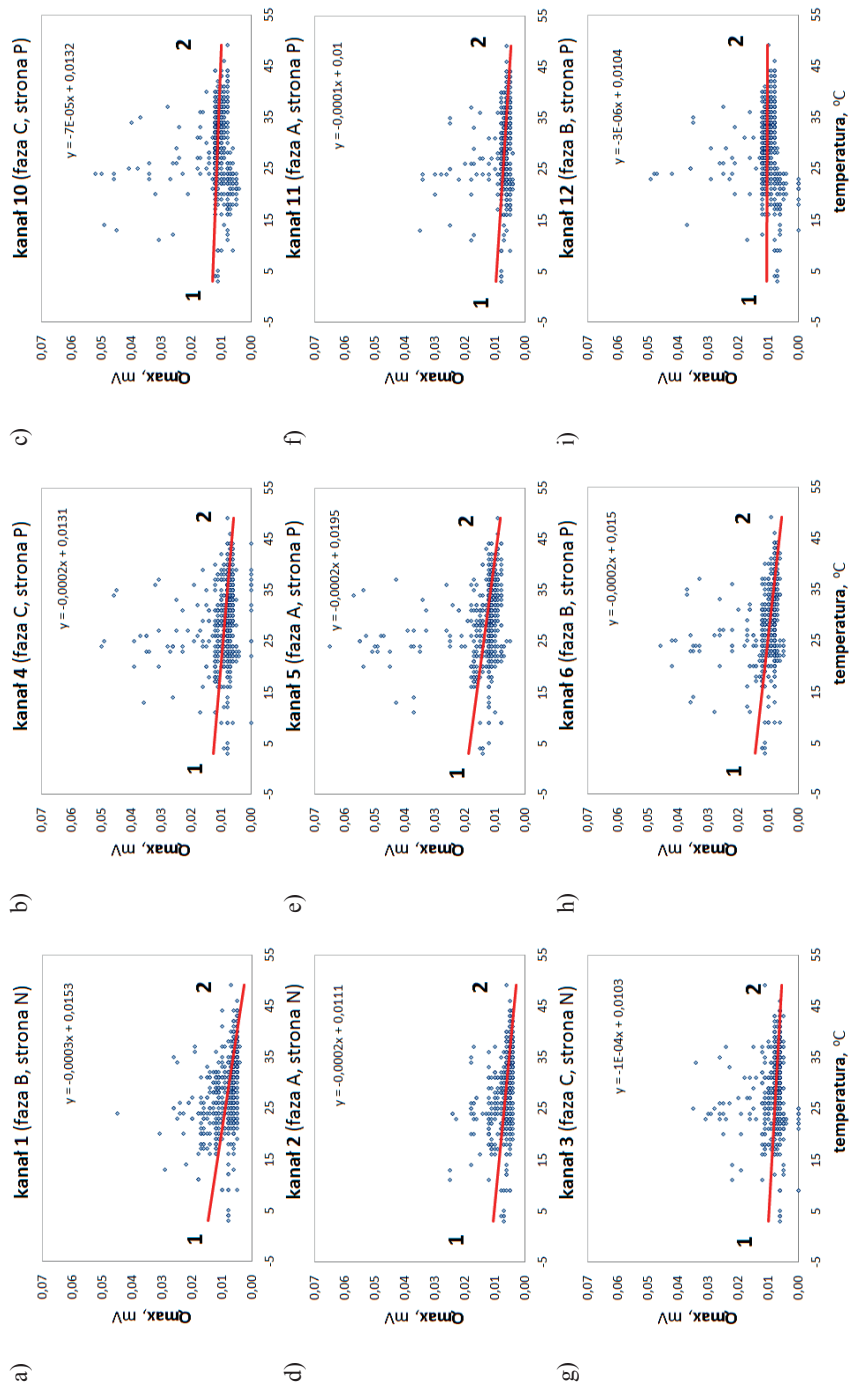
**Rys. 1.** Wpływ temperatury na wskaźnik PPS opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-I



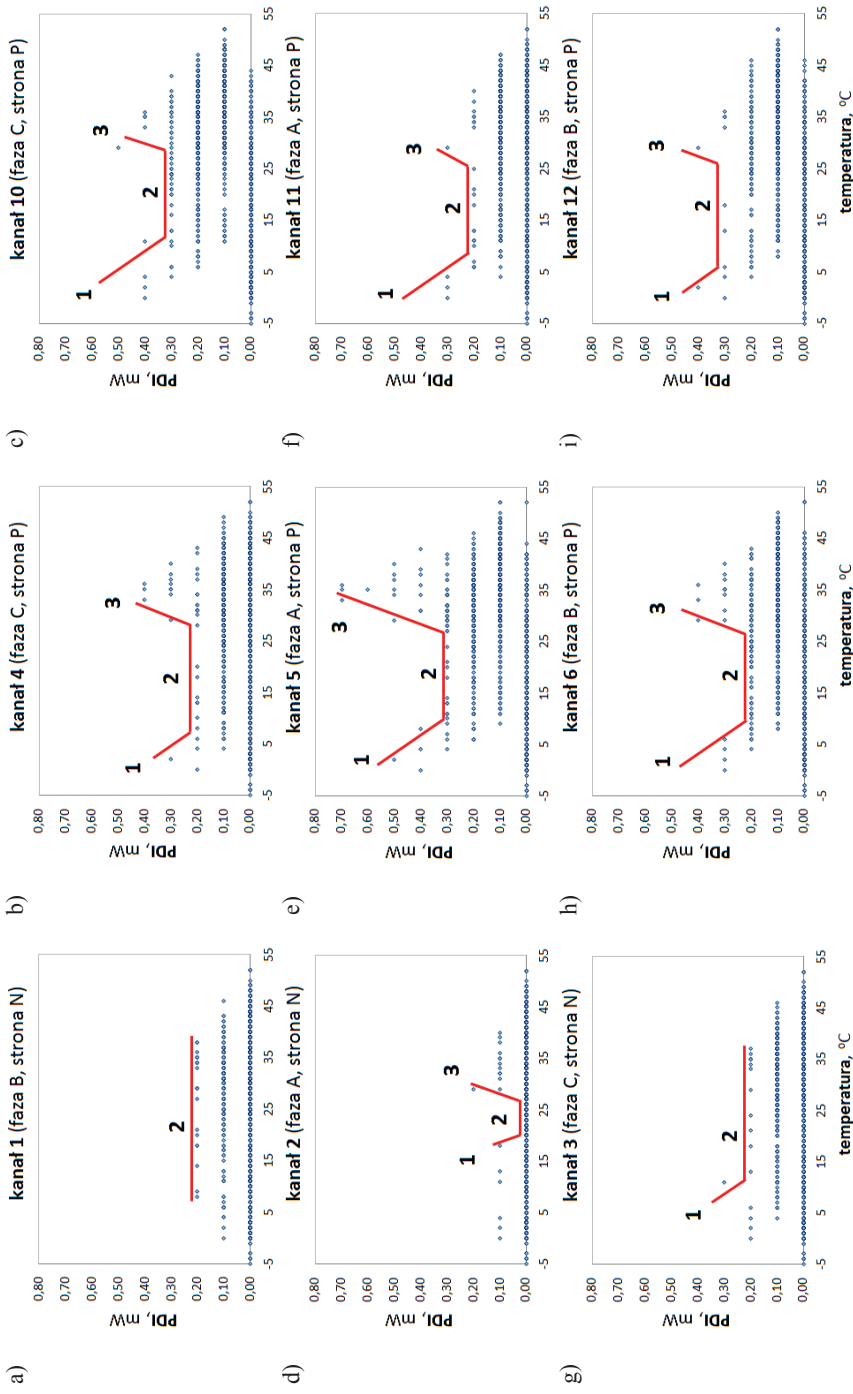
Rys. 2. Wpływ temperatury na wskaźnik PPS opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-I



Rys. 3. Wpływ temperatury na wskaźnik  $Q_{max}$  opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r. silnik SE-1

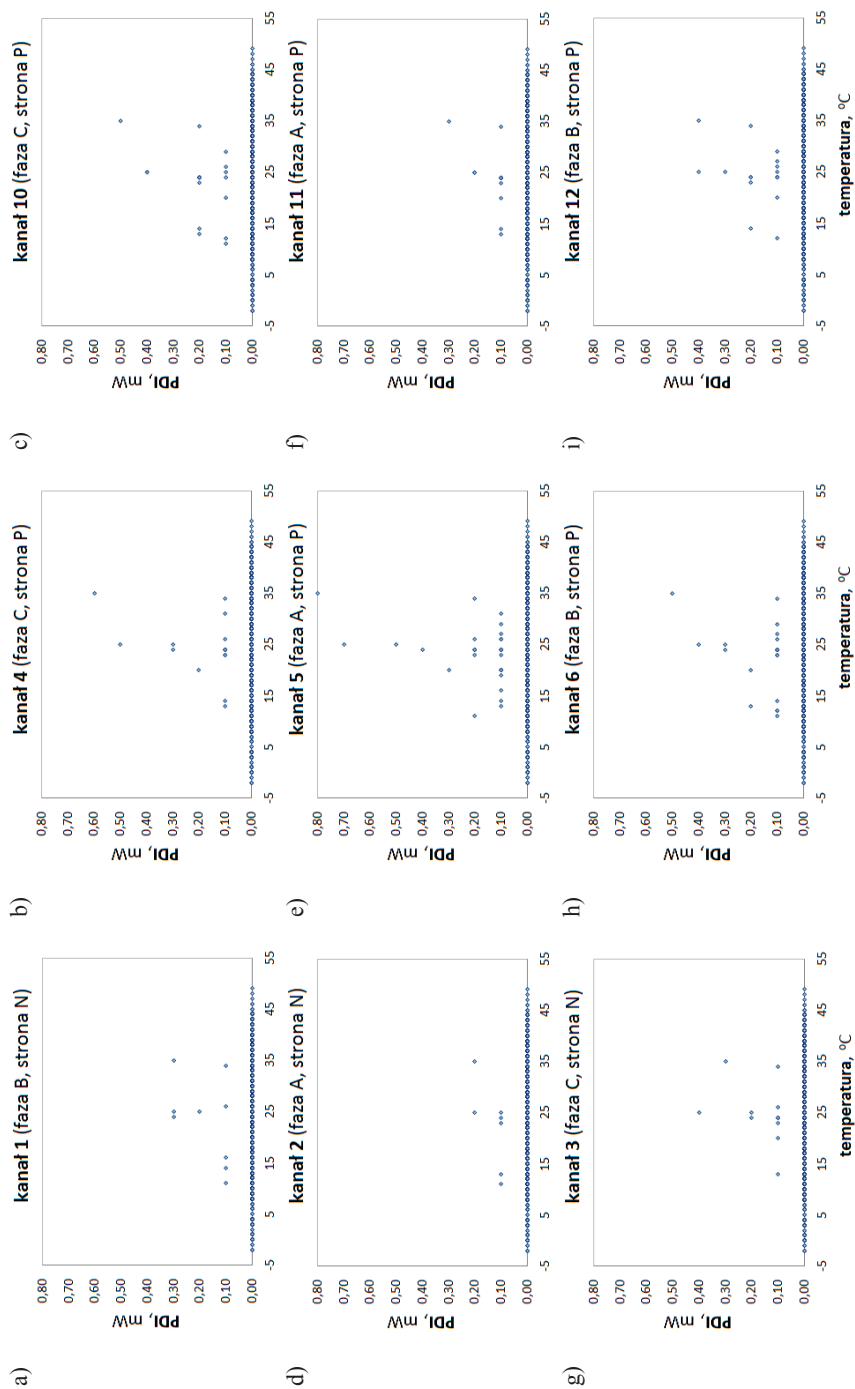


**Rys. 4.** Wpływ temperatury na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r. silnik SE-1



Rys. 5. Wpływ temperatury na wskaźnik PDI opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1





**Rys. 6.** Wpływ temperatury na wskaźnik PDI opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-I

## Załącznik 3

**Rysunek 7.** Diagramy korelacyjne wpływu RH na wskaźnik PPS opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**

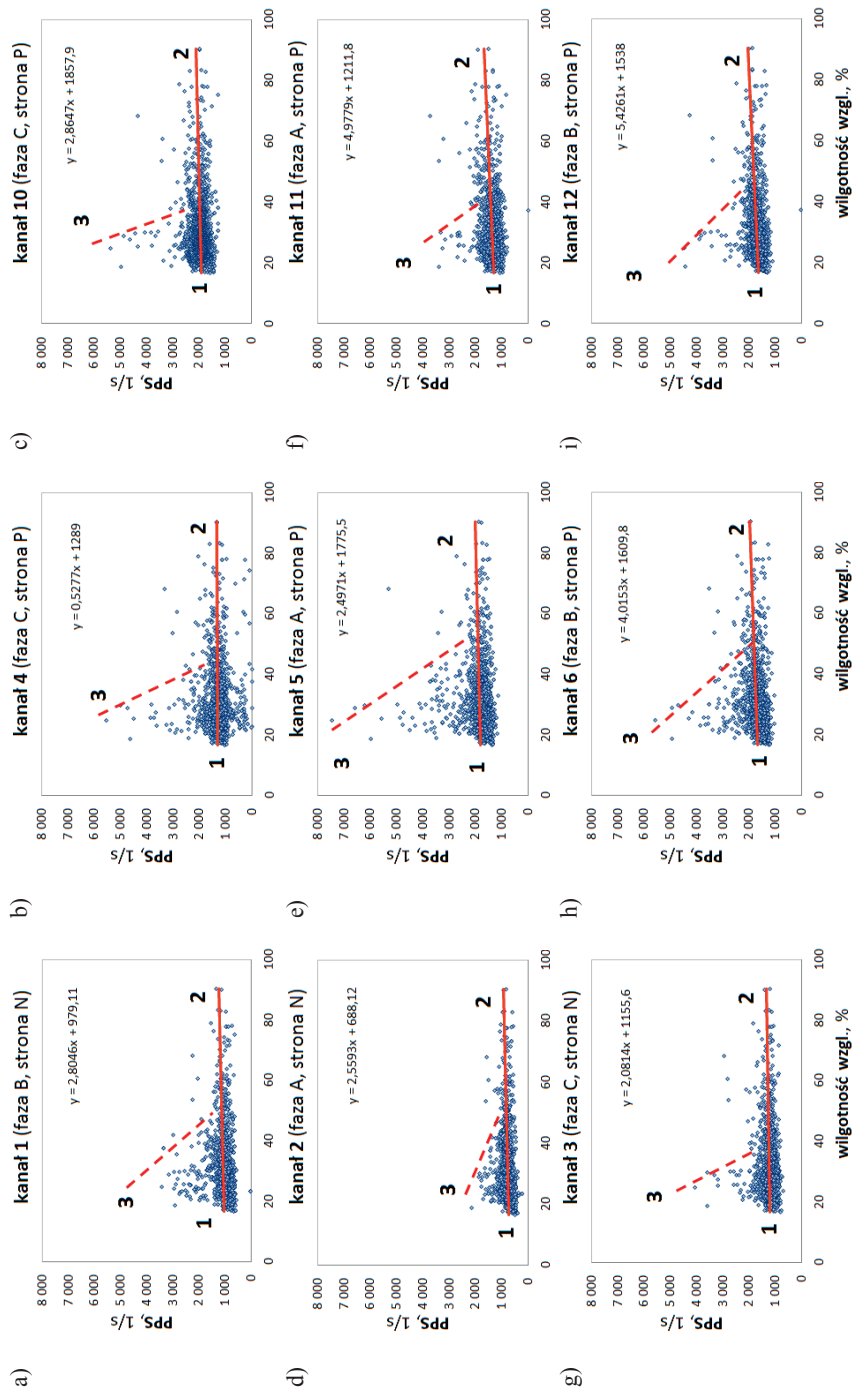
**Rysunek 8.** Diagramy korelacyjne wpływu RH na wskaźnik PPS opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**

**Rysunek 9.** Diagramy korelacyjne wpływu RH na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**

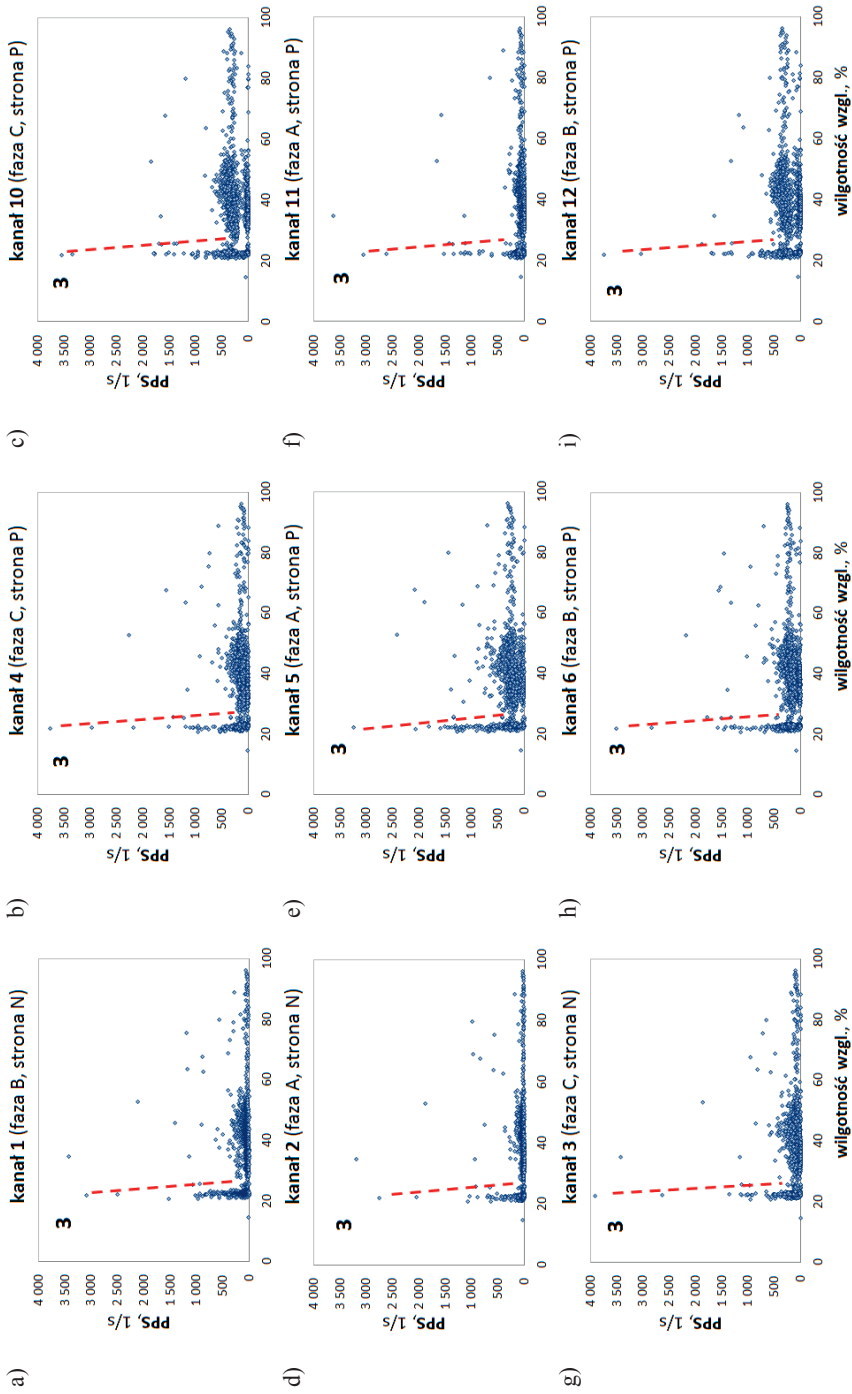
**Rysunek 10.** Diagramy korelacyjne wpływu RH na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**

**Rysunek 11.** Diagramy korelacyjne wpływu RH na wskaźnik PDI opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**

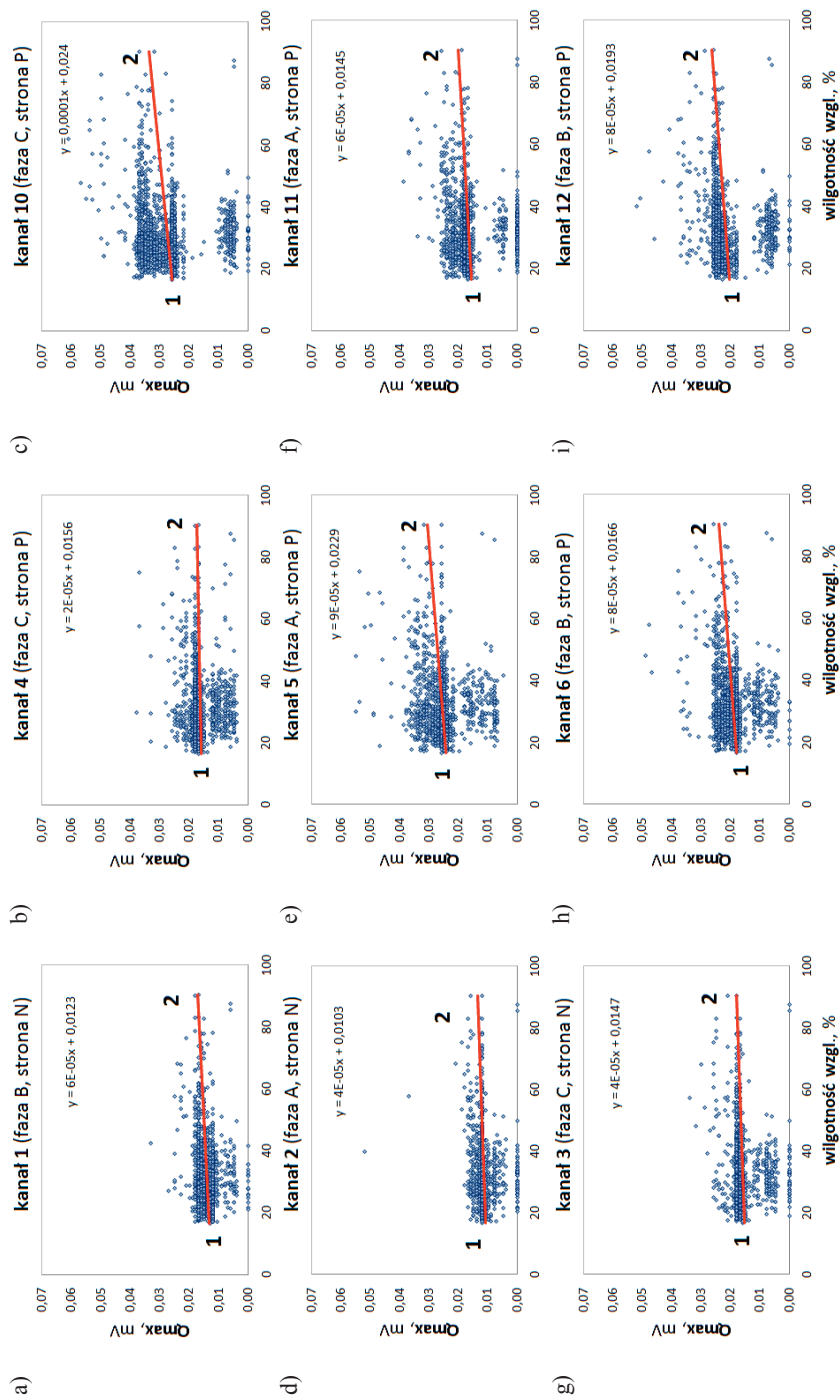
**Rysunek 12.** Diagramy korelacyjne wpływu RH na wskaźnik PDI opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**



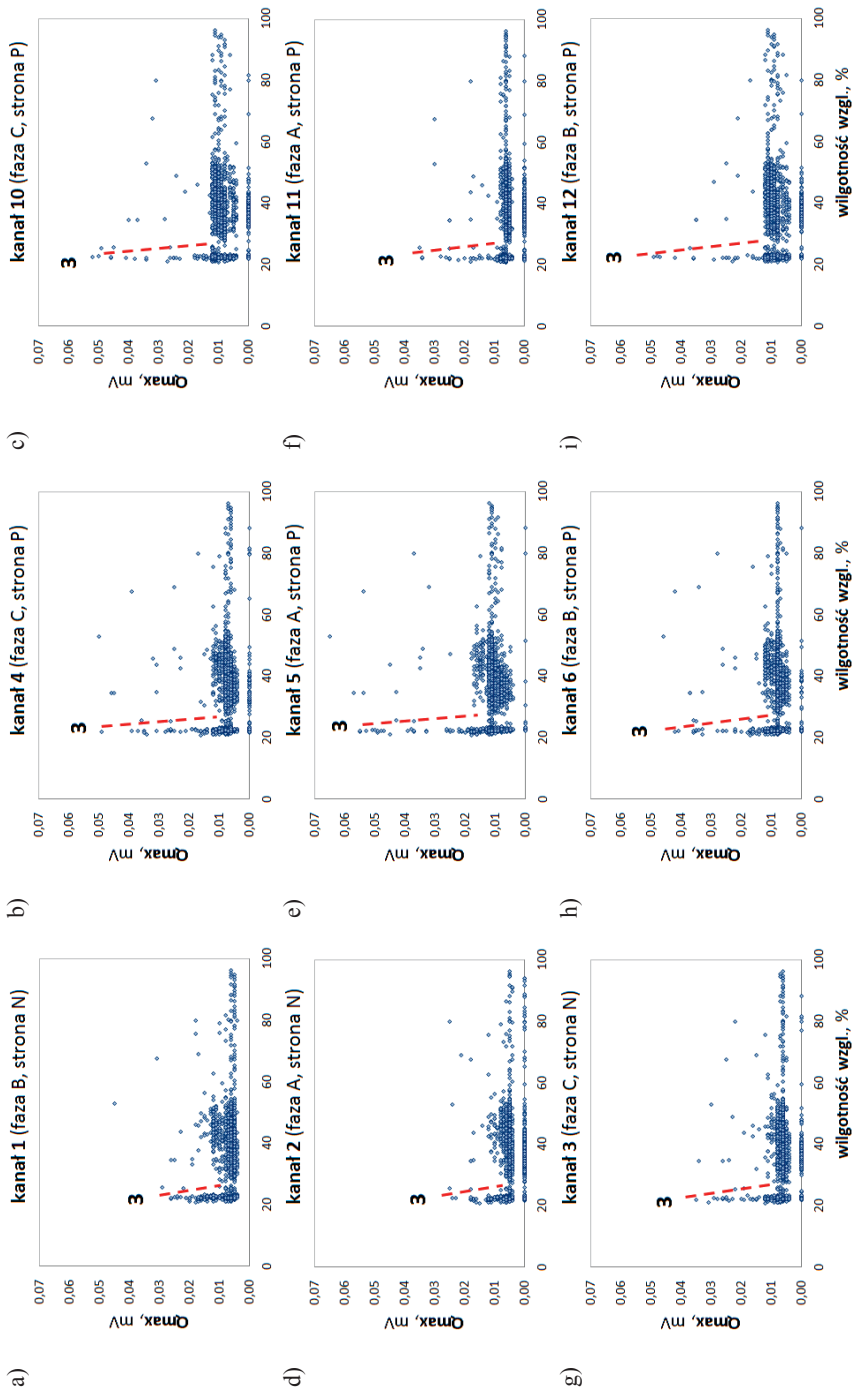
Rys. 7. Wpływ RH na wskaźnik PPS opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1



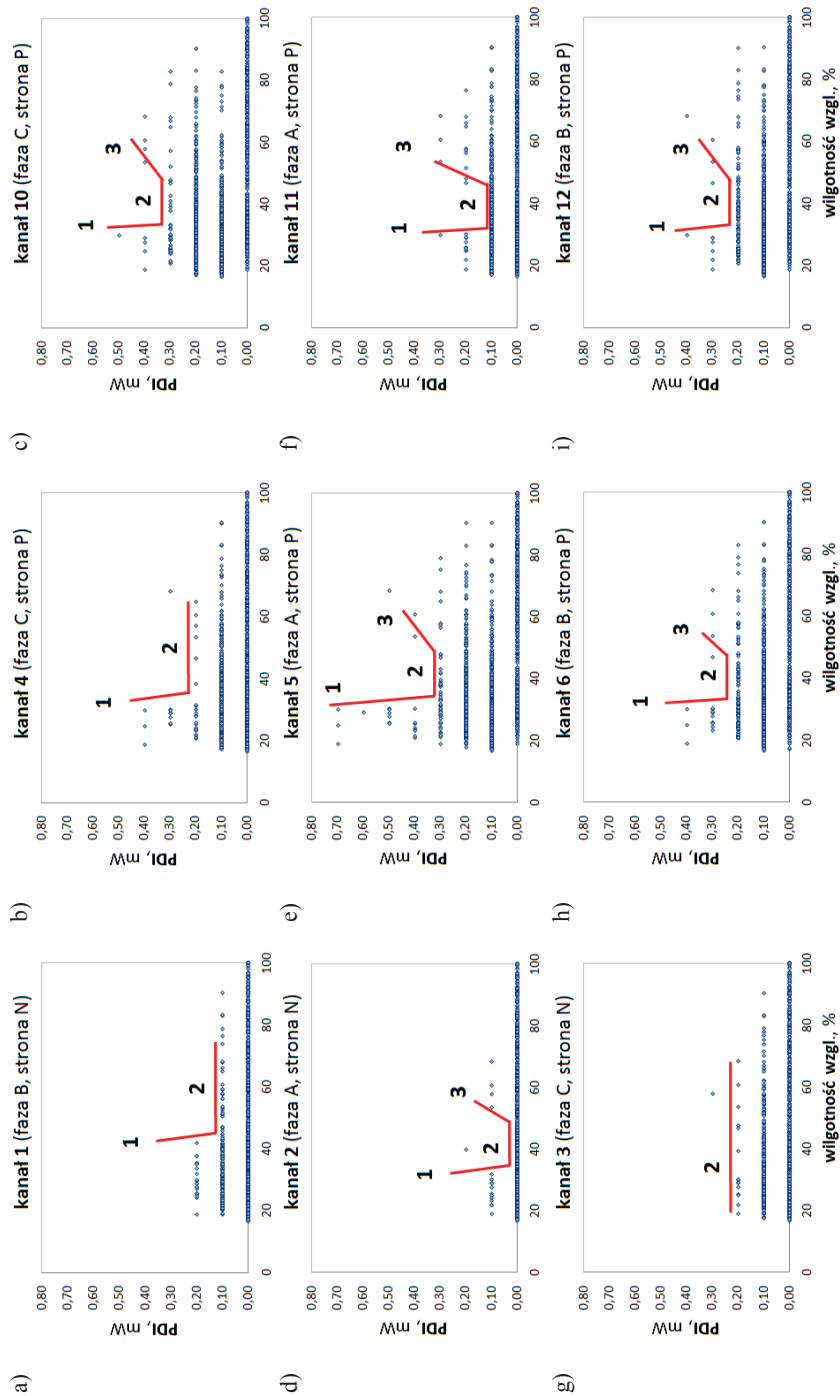
**Rys. 8.** Wpływ RH na wskaźnik PPS opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-I



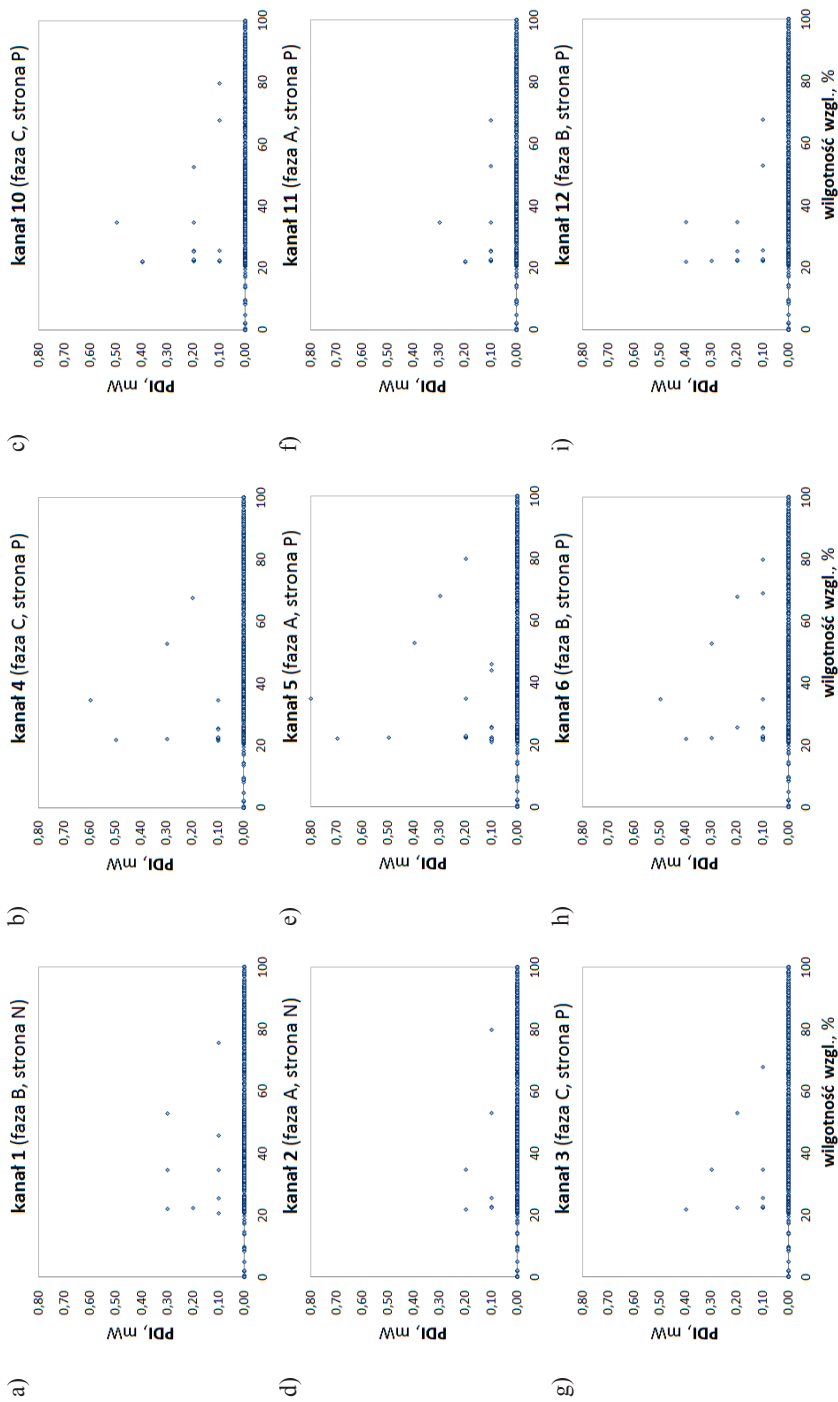
Rys. 9. Wpływ RH na wskaźnik  $Q_{max}$  opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1



**Rys. 10.** Wpływ RH na wskaźnik  $Q_{max}$  opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-1



Rys. 11. Wpływ RH na wskaźnik PDI opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1



**Rys. 12.** Wpływ RH na wskaźnik PDI opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-1



## Załącznik 4

**Rysunek 13.** Diagramy korelacyjne wpływu udziału wilgoci na wskaźnik PPS opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**

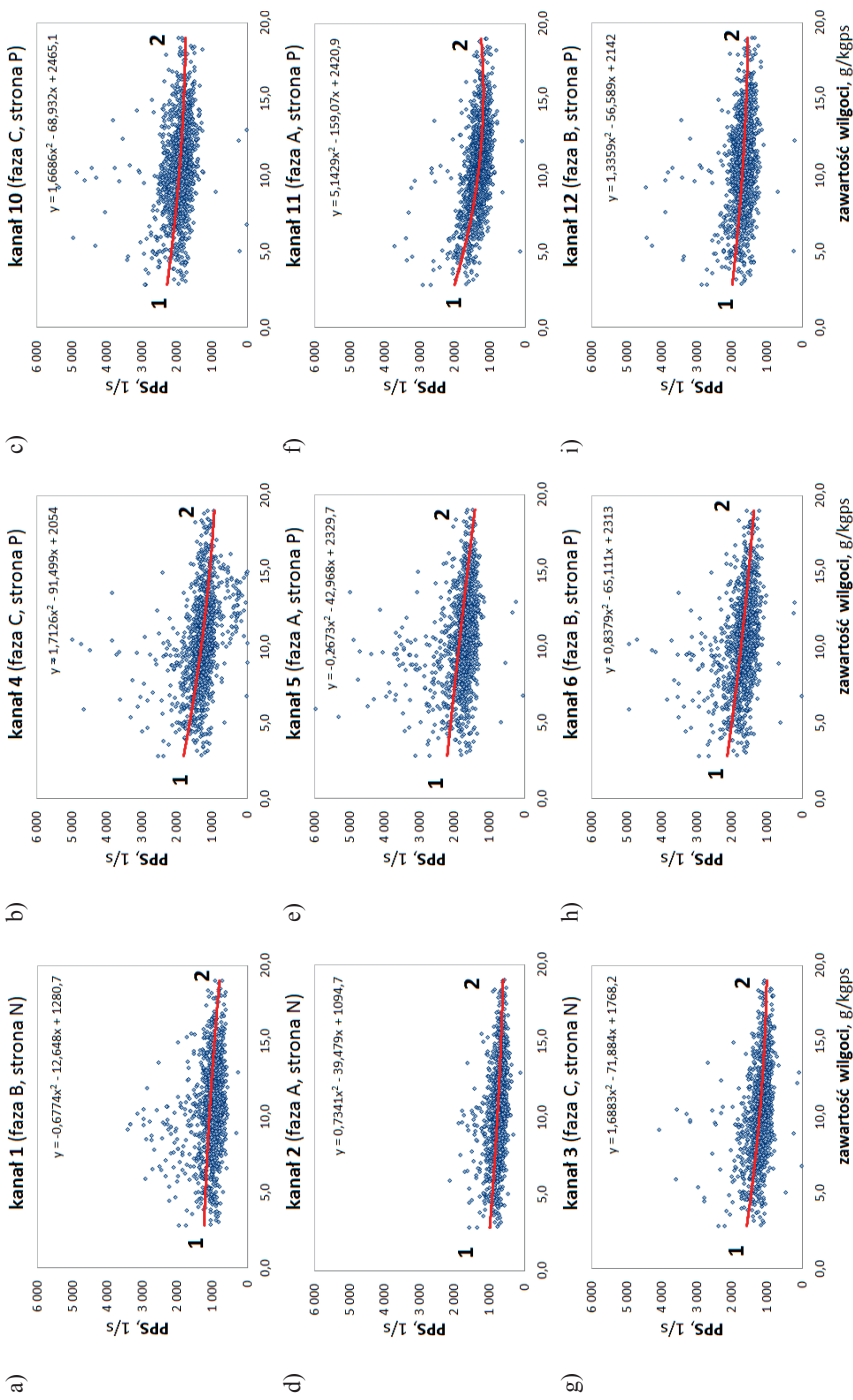
**Rysunek 14.** Diagramy korelacyjne wpływu udziału wilgoci na wskaźnik PPS opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**

**Rysunek 15.** Diagramy korelacyjne wpływu udziału wilgoci na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**

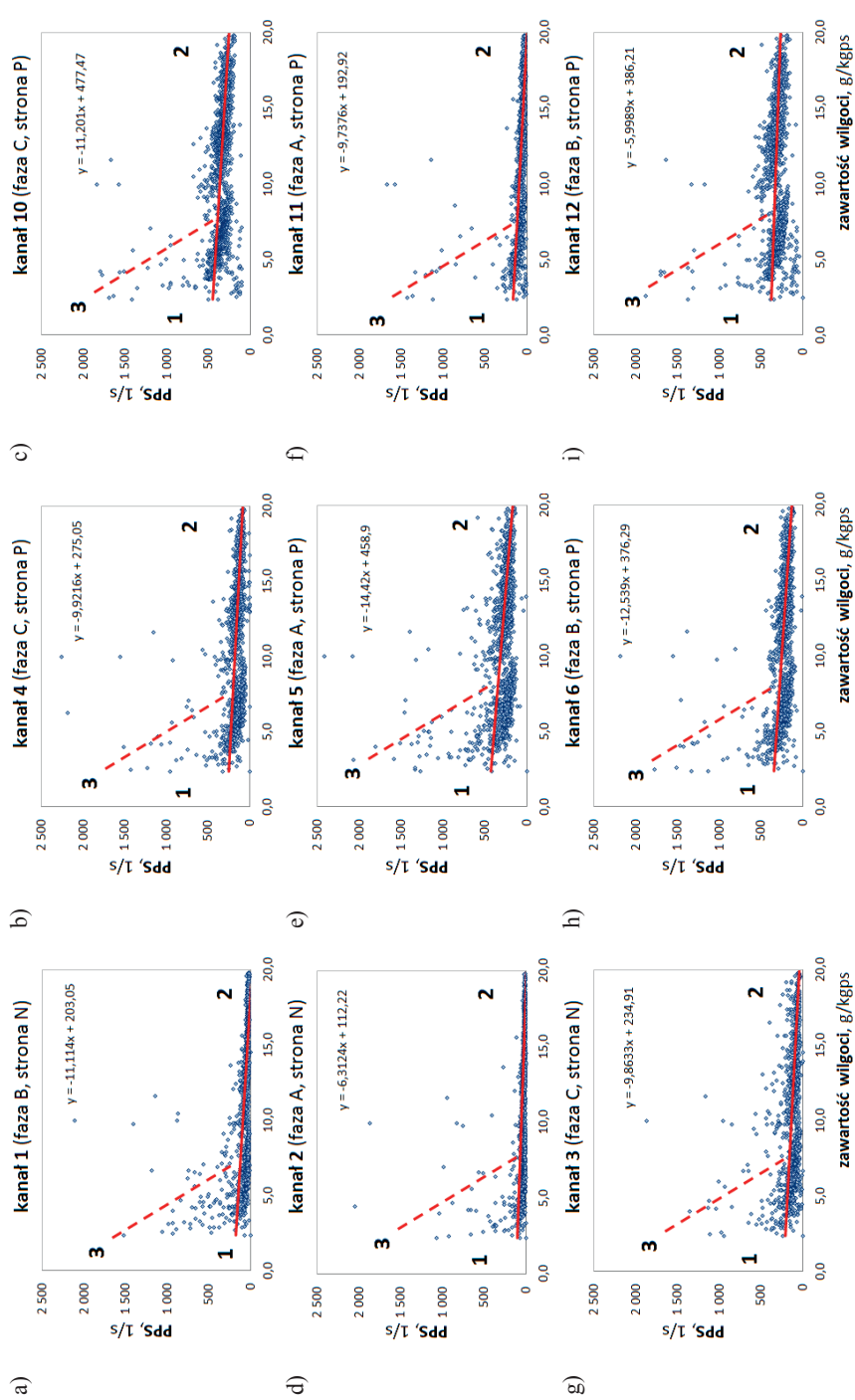
**Rysunek 16.** Diagramy korelacyjne wpływu udziału wilgoci na wskaźnik  $Q_{\max}$  opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**

**Rysunek 17.** Diagramy korelacyjne wpływu udziału wilgoci na wskaźnik PDI opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., **silnik SE-1**

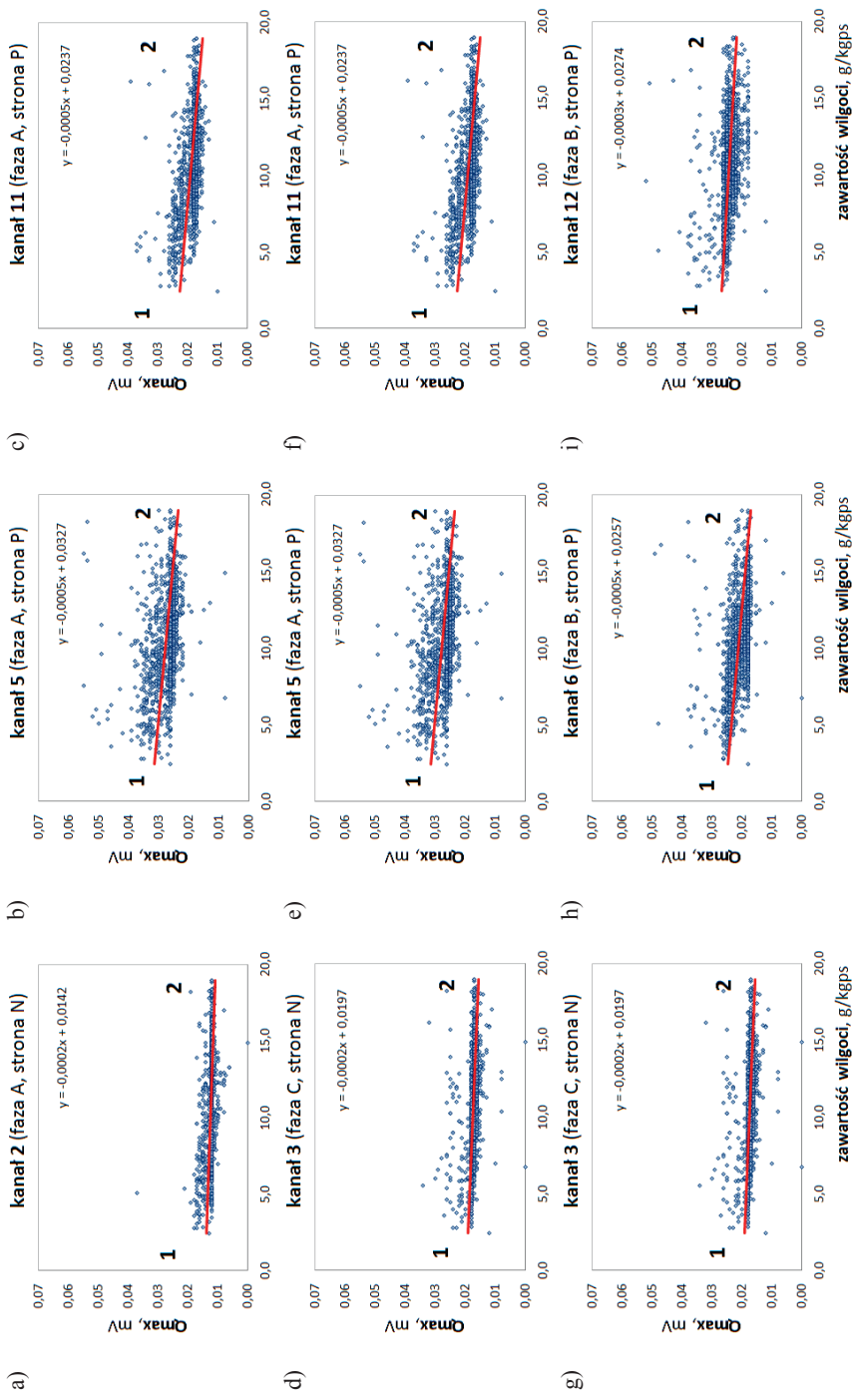
**Rysunek 18.** Diagramy korelacyjne wpływu udziału wilgoci na wskaźnik PDI opracowane na podstawie pomiarów zgromadzonych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., **silnik SE-1**



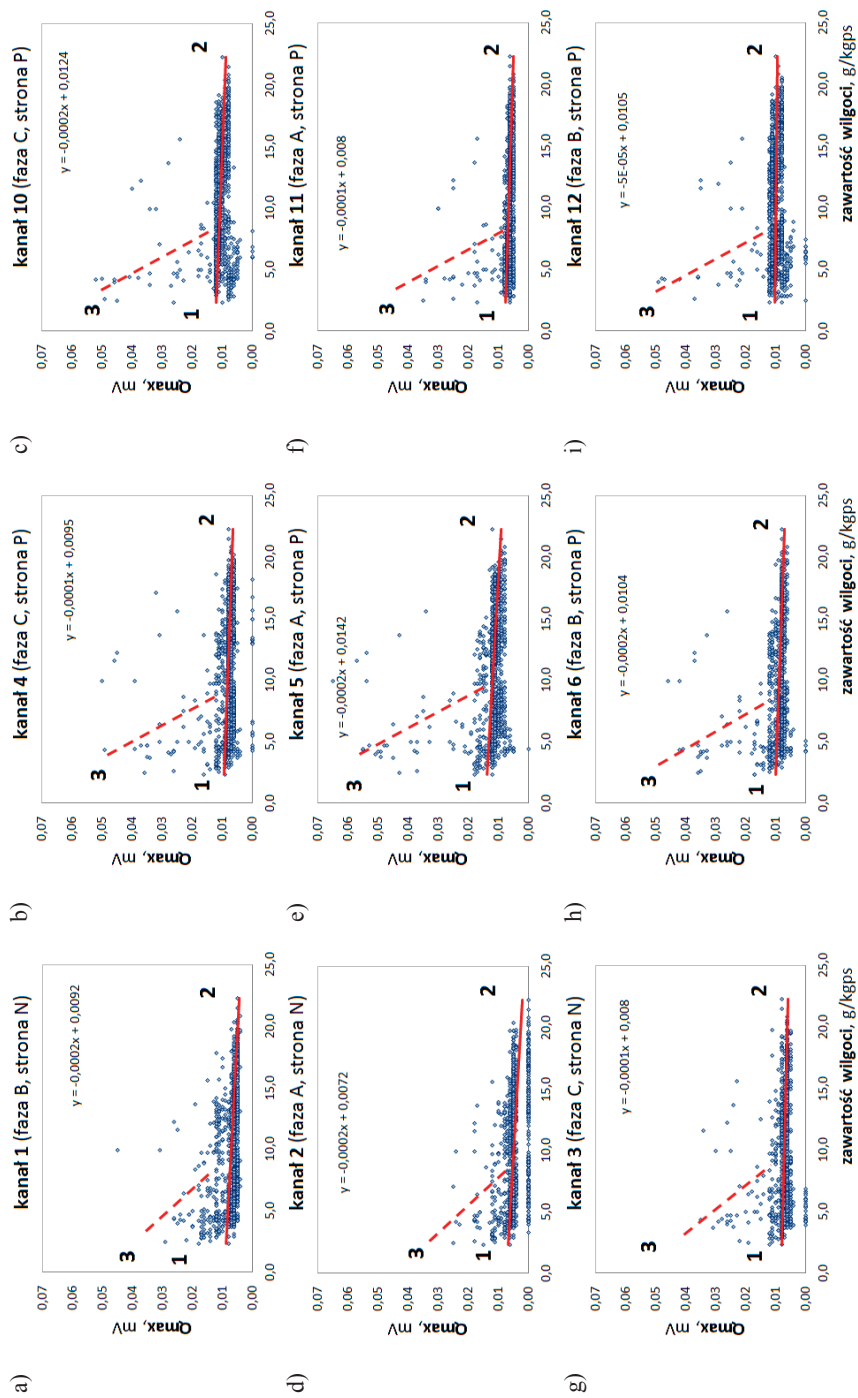
Rys. 13. Wpływ X na wskaźnik PPS opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1



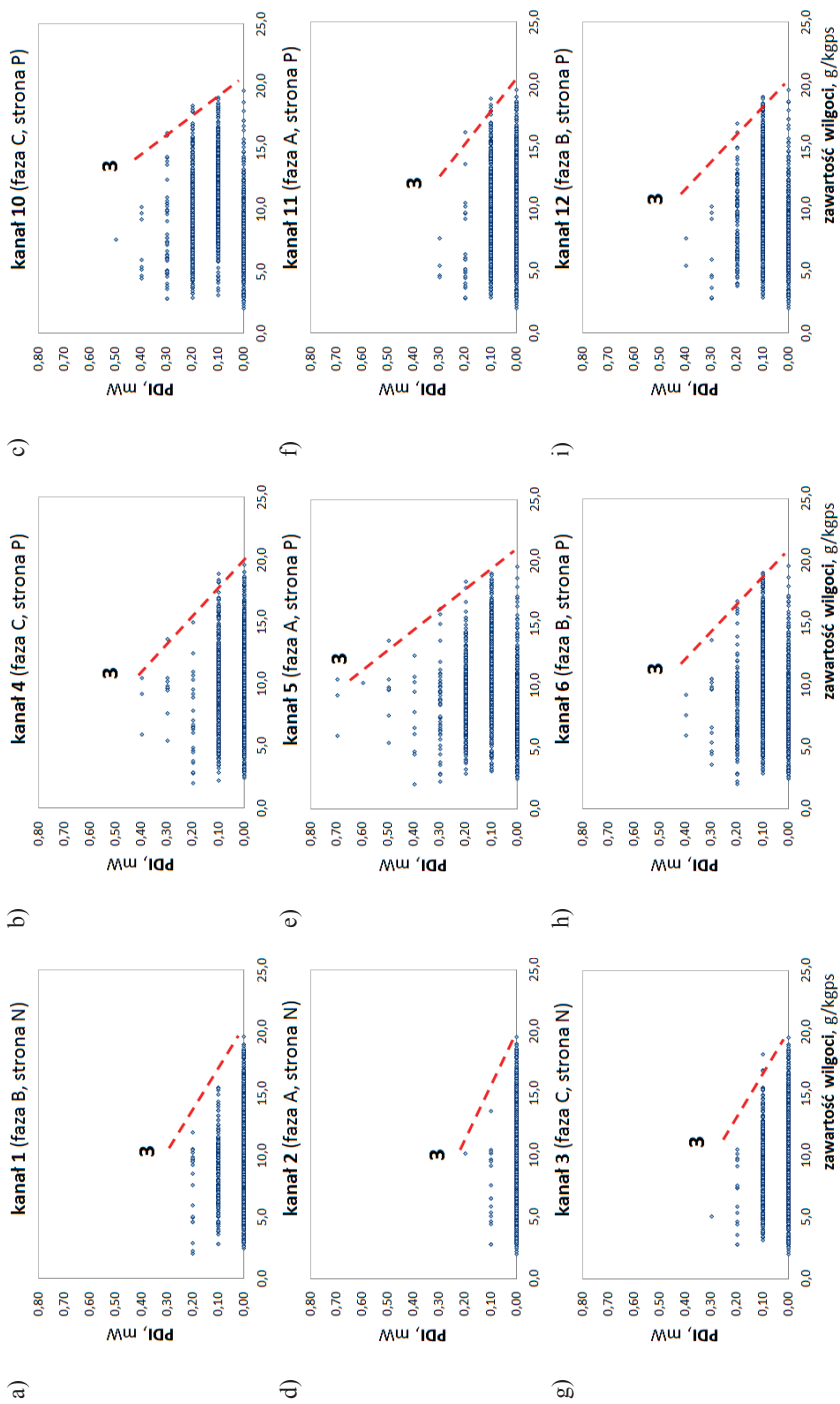
Rys. 14. Wpływ X na wskaźnik PPS opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-1



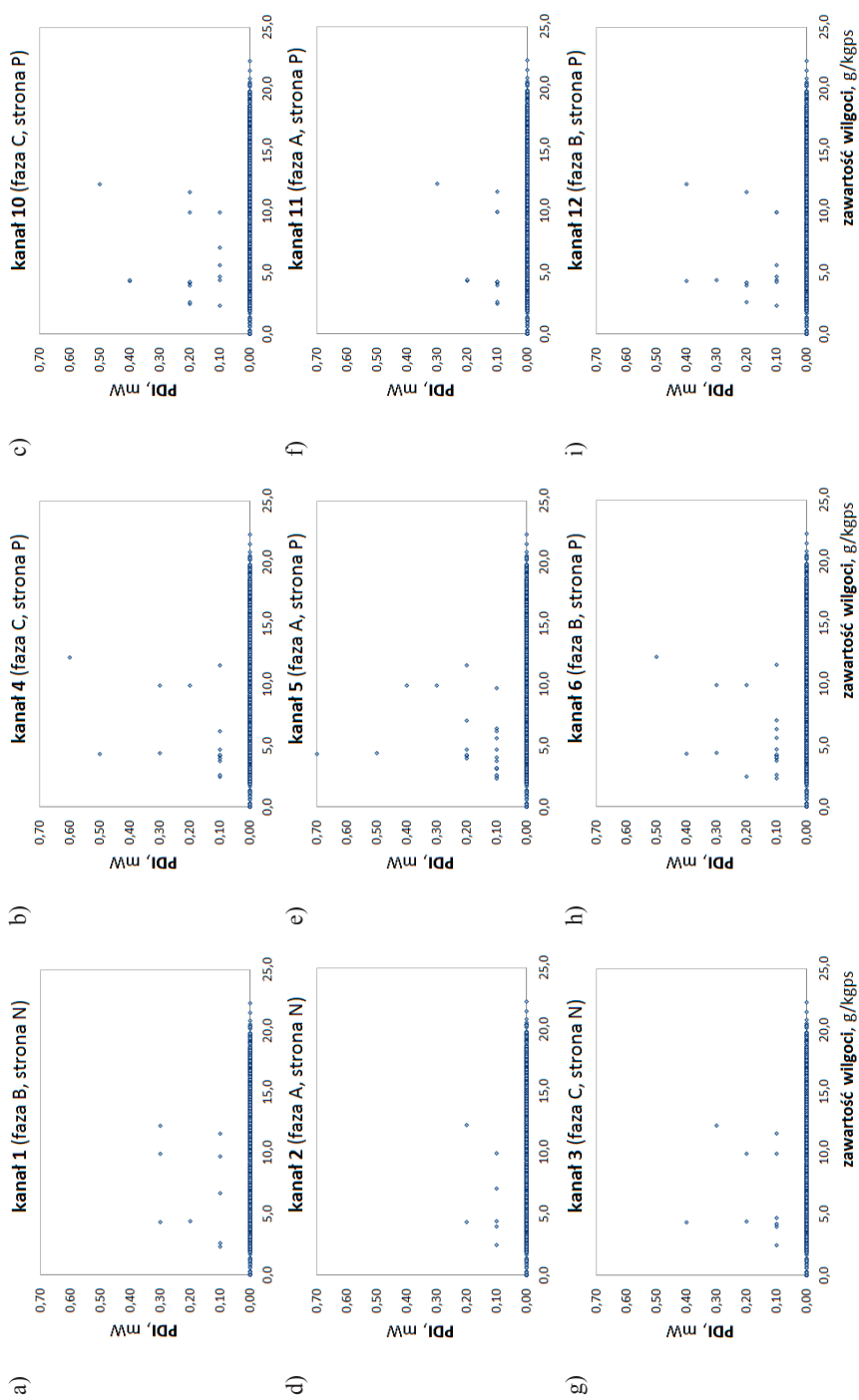
Rys. 15. Wpływ X na wskaźnik  $Q_{max}$  opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1.



Rys. 16. Wpływ X na wskaźnik  $Q_{max}$  opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-1



**Rys. 17.** Wpływ X na wskaźnik PDI opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 28.08.2009 r. do 04.07.2011 r., silnik SE-1



Rys. 18. Wpływ X na wskaźnik PDI opracowany na podstawie pomiarów zebranych w okresie od 04.07.2011 r. do 31.01.2012 r., silnik SE-1

## **Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji**

### **Streszczenie**

Monografia poświęcona jest analizie wpływu wybranych parametrów mikroklimatu na wielkość emisji *wnz* w izolacjach uzwojeń maszyn elektrycznych w warunkach ich przemysłowej eksploatacji. Badania ograniczono do maszyn elektrycznych wirujących, będących napędami, oraz do maszyn służących do konwersji energii mechanicznej na energię elektryczną.

W pierwszej części pracy (rozdział 1 i 2) przedstawiono: zasadnicze czynniki wpływające na aktywność emisji *wnz* w izolacji maszyn elektrycznych, uzasadnienie potrzeby ciągłej diagnostyki stanu izolacji uzwojeń oraz cele naukowe i poznawcze pracy. Ponadto przedstawiono klasyfikację stosowanych typów izolacji maszyn elektrycznych WN wraz z dokonaniem przeglądu przyczyn występowania uszkodzeń izolacji, a także metod diagnozowania stanu izolacji w oparciu o pomiar *wnz*.

W rozdziale 3 opisano zakres, strukturę i metodologię prowadzenia badań eksperymentalnych oraz modelowania zjawisk ciepło-przepływowych wraz z opisem najistotniejszych cech badanych obiektów i stosowanych narzędzi pomiarowych.

W kolejnym rozdziale monografii opisano szczegółowo model matematyczny, zaproponowany przez autora, do opisu procesów przepływu masy i ciepła wraz z opisem założeń i uproszczeń oraz opisem implementacji tego modelu w środowisku ANSYS.

Rozdział 5 poświęcono na prezentowanie wyników pomiarów i badań symulacyjnych dotyczących 3 badanych maszyn elektrycznych pracujących w warunkach przemysłowej eksploatacji.

Zasadniczą część monografii stanowi rozdział 6. W pierwszej części oceniono indywidualnie wpływ temperatury, wilgotności względnej i bezwzględnej, zapylenia oraz drgań mechanicznych na emisję *wnz*. Druga część to analiza wieloparametryczna, w której oceniano łączny wpływ trzech wielkości, tj. temperatury, wilgotności względnej i bezwzględnej na emisję *wnz*. Przedstawiono również sposób wyznaczania tak zwanych warunków komfortu cieplnego maszyn elektrycznych.

W rozdziale 7 przedstawiono możliwość implementacji wyników badań w zakresie rozbudowy istniejących systemów monitorowania *wnz*. Zaproponowano nowy sposób prognozowania procesu starzenia się izolacji w oparciu o pomiar wyładowań i parametry mikroklimatu z zastosowaniem do tego celu sztucznych sieci neuronowych. Ponadto przedstawiono wskazówki do projektowania systemów grzewczo-wentylacyjnych pomieszczeń pracy maszyn elektrycznej wraz z podaniem przykładu wykorzystania do tego celu, narzędzi do modelowania zjawisk cieplnych i przepływowych.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie monografii z podaniem najważniejszych wniosków i wskazaniem kierunków dalszych badań.



## **An Analysis of the Influence of Microclimate on Partial Discharge Emissions of Electric Machines in the Conditions of Industrial Operation**

### **Summary**

The monograph is devoted to the analysis of the influence exerted by the selected microclimate parameters on the volume of PD emissions in the insulations of electric machine winding, in industrial operation conditions. The research was limited to whirling electric machines being drives, and to machines used to converse mechanical power to electric power.

The first part of the paper (Chapter 1 and 2) presents: the basic factors influencing the activeness of PD emissions in the insulation of electric machines, the justification of the need for constant diagnostics of the condition of winding, and the scientific and cognitive purposes of the paper. Moreover, it presents the classification of the types of HV machine insulation used; accompanied by an overview of the reasons for the occurrence of damages in insulation, as well as diagnosing the condition of the insulation based on the PD measurement.

Chapter 3 describes the scope, the structure, and the methodology of conducting experimental research, and modeling heat and fluid flow phenomena, together with a description of the most significant features of the studied objects and the used measurement instruments.

The next chapter of the monograph describes in detail a mathematical model proposed by the author for the description of the processes of mass and heat flow accompanied by a description of the assumptions, simplifications, and the description of the implementation of this model in the ANSYS environment.

Chapter 5 is devoted to the presentation of the results of the measurements and simulation tests concerning the 3 examined electric machines working in industrial operation conditions.

Chapter 6 is a fundamental part of the monograph. The first part assesses individually the influence of temperature, relative and absolute humidity, dustiness, and mechanical vibrations on PD emissions. The second part is a multi-variable analysis which assesses the joint influence of three properties; namely the temperature and the relative and absolute humidity, on PD emissions. Moreover, the method of designing the so-called heat stress index of electric machines is presented.

Chapter 7 presents a possibility to implement the research findings for an extension of the existing PD monitoring systems. A new way of forecasting the process of insulation aging is suggested based on the discharge measurement and the micro-climate parameters using artificial neural networks. Moreover, guidelines for designing heating and ventilation systems for the electric machine operation rooms are presented, with an example of tools to model heat and fluid flow phenomena for this purpose.

Chapter 8 is a summary of the monograph, showing the most important conclusions and indicating the directions for further research.