

ŁAGODZENIE ORAZ SKRÓCENIE CZASU PROCESU SYNCHRONIZACJI SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH**

STRESZCZENIE

Przedstawiono wyniki obliczeń procesu synchronizacji dla wybranego modelu dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t. Wykazano możliwości łagodzenia przebiegu procesu synchronizacji oraz skrócenia jego czasu przez sterowanie wartością prądu wzbudzenia. Zbadano wpływ przyjętych układów regulacji prądu magnetycznego na przebiegi tego procesu. Wyniki obliczeń zamieszczono w postaci wykresów czasowych.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki synchroniczne, synchronizacja, regulacja prądu wzbudzenia

SOFTEN AND REDUCTION DURATION OF SYNCHRONIZATION PROCESS IN SYNCHRONOUS MOTORS

The work presents calculation results of synchronization process of a two-speed, silent-pole, high power synchronous motor. The calculations were based on circuit model for motor type GAe 1716/20t with switchable configuration connection of armature winding and field magnet. The influence of control of excitation current value on stator currents, electromagnetic torque and shaft velocity during synchronization process has been investigated. The results of calculations were presented as time curves of state variables.

Keywords: synchronous motor, synchronization, excitation current control

1. WSTĘP

W napędach wentylatorów głównego przewietrzania kopalń głębinowych stosowane są powszechnie silniki synchroniczne dużej mocy. Proces synchronizacji tych silników ma istotny wpływ na bezawaryjną eksploatację układu napędowego. Wzajemne położenie osi pól stojana i wirnika, w chwili inicjacji procesu synchronizacji, ma istotny wpływ na przebiegi dynamiczne [2]. Wybór korzystnej chwili załączenia napięcia wzbudzenia, zwiększającej pewność synchronizacji, zależy od momentu obciążenia silnika, momentu bezwładności układu napędowego oraz od wartości stałej czasowej obwodu wzbudzenia [3]. Inną metodą zwiększenia skuteczności procesu synchronizacji jest sterowanie wartością prądu wzbudzenia [4].

Duża wartość wypadkowego momentu bezwładności układu napędowego oraz znamionowa wartość prądu wzbudzenia powodują, że proces synchronizacji nie kończy się z chwilą osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej. Sprężyste, wzajemne oddziaływanie momentu synchronicznego i momentu mechanicznego oraz momentu bezwładności powodują znaczące oscylacje prędkości wokół wartości ustalonej. Wywołuje to znaczące pulsacje momentu elektromagnetycznego i kilkukrotne wydłużenie czasu procesu. Wzrost prądu wzbudzenia prowadzi do zwiększenia wartości momentu synchronizującego, ale wywołuje również duże zmiany wartości chwilowej momentu na wale maszyny roboczej.

Celem pracy jest wykazanie wpływu regulacji prądu wzbudzenia na przebieg procesu synchronizacji na przykładzie dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t. Zaproponowano układy regulacji prądu wzbudzenia sterowane w funkcji wartości chwilowej prę-

kości obrotowej silnika, pozwalające na skrócenie czasu procesu synchronizacji oraz łagodzenie przebiegów dynamicznych.

2. OBLICZENIA PROCESU SYNCHRONIZACJI

Analizę procesu synchronizacji wykonano, wykorzystując opracowany obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t. Zastosowanie modelu obwodowego pozwala na znaczne skrócenie czasu obliczeń oraz umożliwia analizę przyjętych metod regulacji prądu wzbudzenia i ich wpływu na przebieg procesu synchronizacji. Pozwala również na dobranie najkorzystniejszych parametrów algorytmu sterowania napięciem wzbudzenia oraz wykonanie rozbudowanych układów zamkniętej regulacji. Wypracowana metoda sterowania może być następnie wykorzystana w obliczeniach obwodowo-polowych.

Podstawowe parametry badanego silnika zestawiono w tabeli 1. Silniki takie pracują w napędach wentylatorów głównych typu WPK 5,3 kopalni podziemnych i charakteryzują się bardzo dużymi momentami bezwładności.

Do obliczeń badanego silnika wykorzystano komercyjny program Simplorer, w którym silnik synchroniczny opisany jest we współrzędnych $d-q$ [1]. Parametry do modelu matematycznego badanego silnika wyznaczono na podstawie ogólnie znanych wzorów. Ze względu na niekonwencjonalny rozkład zezwojów w pasmach fazowych uzwojenia dwubiegowego (o zmienianych liczbach biegunów pola magnetycznego), indukcyjności rozproszenia oraz reaktancji oddziaływania twornika wyznaczono obliczeniami polowymi, wykorzystując komercyjny program Quick-Field.

* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

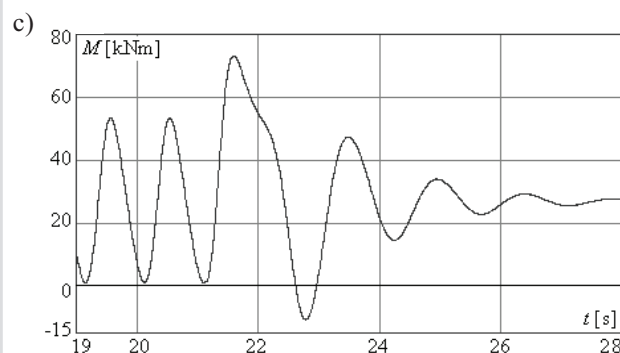
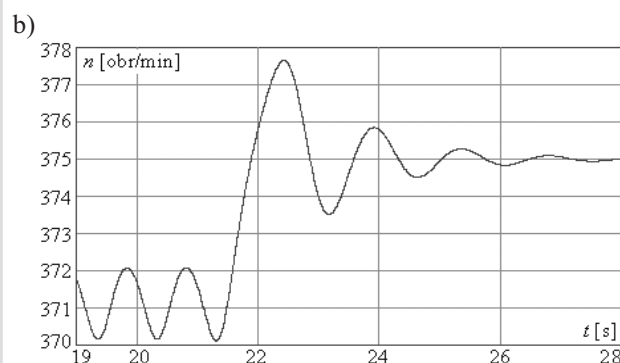
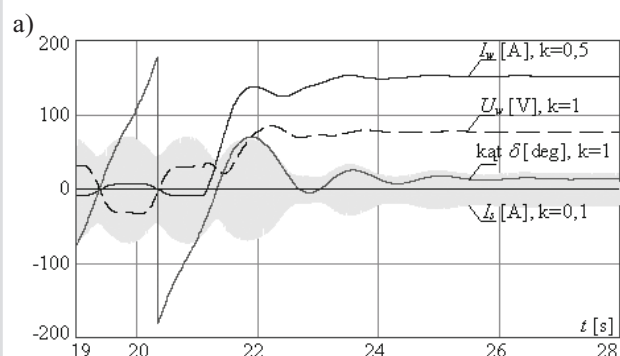
Tabela 1

Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego
typu GAe 1716/20t

Table 1

Rating of two-speed synchronous motor type GAe 1716/20t

Moc znamionowa	kW	2600	1200
Napięcie stojana	V	6000	6000
Prąd stojana	A	292	186
Napięcie wzbudzenia	V	92	72
Prąd wzbudzenia	A	337	260
Prędkość obrotowa	obr/min	375	300
Współczynnik mocy	—	0,9 _{poj.}	0,77 _{ind.}
Sprawność	%	95,5	81,0

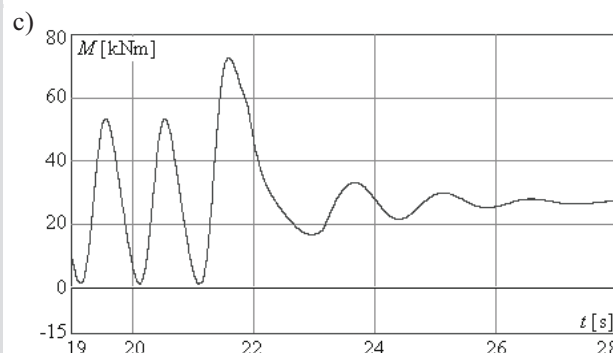
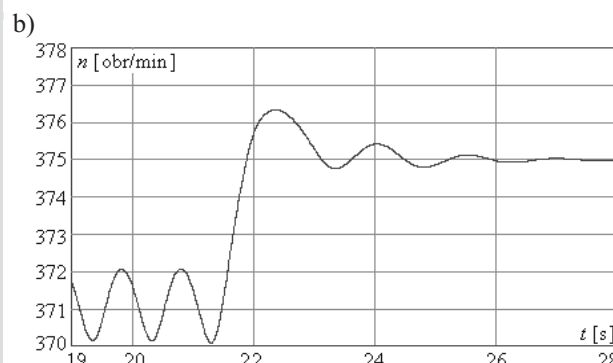
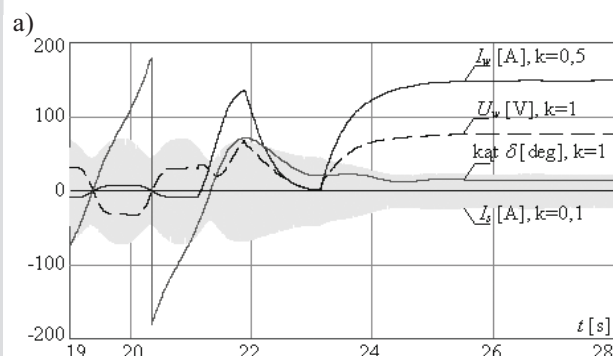


Rys. 1. Czasowe przebiegi wielkości podczas synchronizacji silnika dla stałej wartości napięcia wzbudzenia równego U_{wn}
Objaśnienia w tekście

Fig. 1. Time curves values during synchronization process of motor for constant value of excitation voltage U_{wn}

Na rysunkach 1–5 pokazano obliczone przebiegi czasowe prądu stojana I_s , wartości chwilowej kąta δ , prądu wzbudzenia I_w , napięcia U_w na zaciskach uzwojenia wzbudzenia, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej podczas synchronizacji mniejszej liczby biegunów $2p = 16$ badanego silnika dwubiegowego dla różnych sposobów regulacji napięcia lub prądu wzbudzenia. W obliczeniach tych przyjęto moment obciążenia $0,4M_n$, a proces synchronizacji został zainicjowany dla wartości kąta $\delta = (-45)$ stopni, gdzie δ jest kątem między osią przepływu stojana a osią przepływu wirnika.

Jako pierwsze wykonano obliczenia dla znamionowej, stałej wartości napięcia wzbudzenia. Widoczne na rysunku 1a pulsacje prądu I_w są wynikiem oddziaływania składowej przemiennej napięcia indukowanego w uzwojeniu magnetycznym podczas zmian prędkości obrotowej i kąta δ . Znamionowa wartość prądu wzbudzenia pozwala na skuteczną



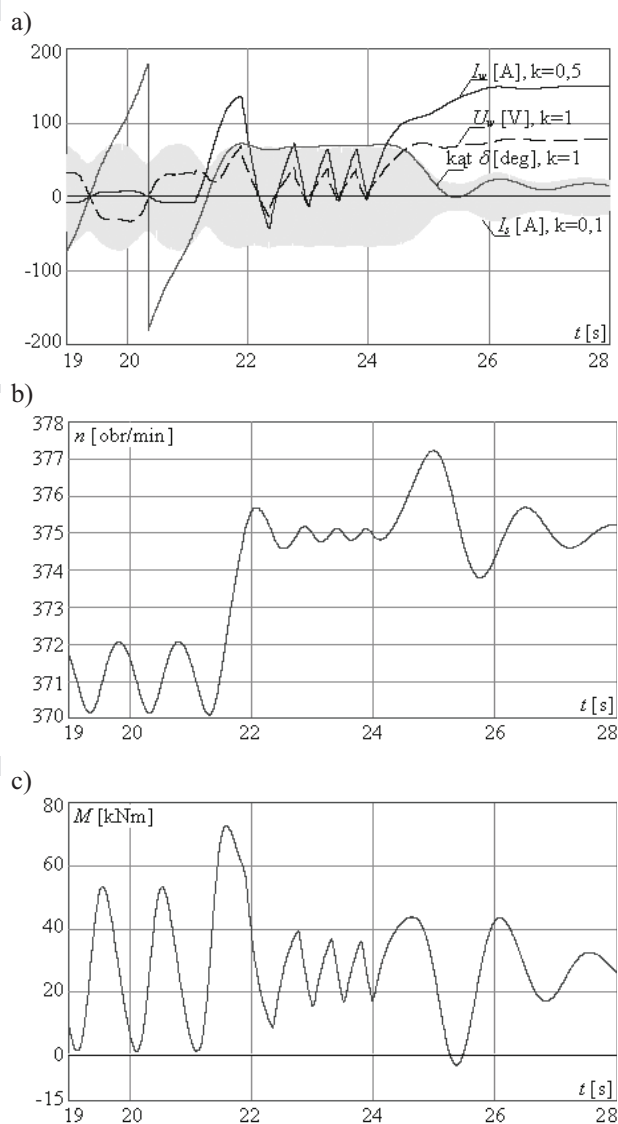
Rys. 2. Czasowe przebiegi wielkości podczas synchronizacji silnika dla określonej zmiany wartości napięcia wzbudzenia
Objaśnienia w tekście

Fig. 2. Time curves values during synchronization process of motor for particular change value of excitation voltage

synchronizację silnika, lecz jest powodem dużych pulsacji prędkości i momentu elektromagnetycznego (rys. 1b i c). Czas ustalenia się przebiegów dynamicznych wynosi 7 sekund.

Jedną z metod regulacji prądu wzbudzenia, podczas procesu synchronizacji, może być sterowanie wartością napięcia wzbudzenia realizowane przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika wzbudnicy silnika. Na rysunku 2 pokazano wyniki obliczeń odpowiednich wielkości podczas synchronizacji badanego silnika z układem regulacji prądu wzbudzenia przez zmianę napięcia stałego.

W wykonanych obliczeniach regulacja prądu wzbudzenia odbywała się w funkcji wartości chwilowej prędkości obrotowej silnika. Po osiągnięciu przez silnik prędkości synchronicznej następowała zmiana kąta wysterowania tyrystorów wzbudnicy w celu uzyskania minimalnej wartości napięcia wyprostowanego (rys. 2a). Ponowna zmiana



Rys. 3. Czasowe przebiegi wielkości podczas synchronizacji silnika dla określonej zmiany polaryzacji napięcia wzbudzenia
Objaśnienia w tekście

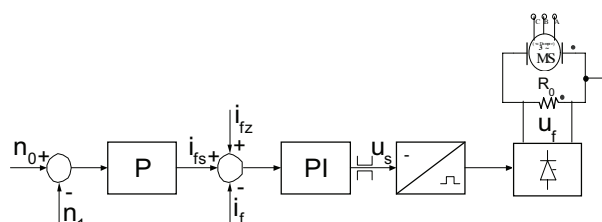
Fig. 3. Time curves values during synchronization process of motor for particular change polarization excitation voltage

wartości napięcia wzbudzenia następowała, gdy prędkość silnika uległa zmniejszeniu poniżej synchronicznej (rys. 2b). Opisany sposób regulacji prądu znacznie skraca czas ustalenia się prędkości oraz zmniejsza amplitudę zmian momentu elektromagnetycznego (rys. 2c). Istotnie zmniejszają się również pulsacje wartości chwilowej kąta δ , co skraca czas trwania procesu synchronizacji.

Zwiększenie szybkości działania opisanego układu regulacji prądu wzbudzenia można uzyskać przez zastosowanie łącznika tranzystorowego pracującego w układzie H [4]. Pozwala to na określoną zmianę polaryzacji napięcia zasilającego obwód wzbudzenia, w chwili osiągnięcia przez silnik prędkości nadsynchronicznej, oraz ponowną zmianę polaryzacji w chwili, gdy prędkość silnika zmniejsza się poniżej synchronicznej. Na rysunku 3 pokazano wyniki obliczeń odpowiednich wielkości podczas synchronizacji badanego silnika z zastosowaniem rozbudowanego algorytmu sterowania prądu wzbudzenia oraz układu zmiany polaryzacji napięcia U_w .

Określona zmiana polaryzacji napięcia wzbudzenia zwiększa stromość zmian przebiegu prądu magnesny, co pozwala zminimalizować wahania prędkości oraz momentu elektromagnetycznego, po osiągnięciu przez silnik prędkości synchronicznej (rys. 3b, c). Duża dynamika układu sterowania powoduje jednak, że kąt δ utrzymywany jest na większej wartości niż wynika to z równowagi momentu mechanicznego i elektromagnetycznego (rys. 3a). Powoduje to powstanie stanów przejściowych w wyniku czego czas trwania procesu synchronizacji ulega wydłużeniu.

Bardziej zaawansowaną metodą sterowania wartością prądu wzbudzenia może być zastosowanie zamkniętego układu regulacji. Na rysunku 4 pokazano przykładową strukturę układu regulacji z szeregowo połączonymi regulatorami typu P i PI.



Rys. 4. Schemat zamkniętego układu regulacji prądu wzbudzenia

Fig. 4. Diagram of close loop-excitation control system

Przedstawiony układ regulacji prądu wzbudzenia ma strukturę hierarchiczną, w której nadrzędnym jest człon stabilizacji prędkości obrotowej. Układ pracuje z dwoma pętlami zwrotnymi:

- 1) od prędkości obrotowej n_1 ,
- 2) od prądu wzbudzenia i_f .

Załączenie układu następuje w chwili, gdy prędkość obrotowa silnika przekroczy o 0,25% prędkość synchroniczną (odpowiednio 301 lub 376 obr./min). Zapewnia to wymaganą w regulatorze pętlę histerezy i zapobiega zbyt wczesnemu zmniejszeniu prądu wzbudzenia, co mogłoby spowodować

wać wypadnięcie silnika z synchronizmu. Wzmocnienie regulatorów zostało dobrane doświadczalnie ze względu na uzyskanie odpowiedniej dynamiki sterowania, łagodzenie przebiegów dynamicznych i skrócenie czasu procesu synchronizacji. Na rysunkach 5a–c pokazano wyniki obliczeń odpowiednich wielkości podczas synchronizacji badanego silnika z zastosowaniem zamkniętego układu regulacji prądu wzbudzenia.

Zastosowanie zamkniętego układu regulacji pozwoliło skrócić czas procesu synchronizacji silnika w stosunku do sterowania okresowym wyłączeniem napięcia wzbudzenia (rys. 2). Znacznie zmalały pulsacje momentu elektromagnetycznego ograniczając je do wartości dodatnich (rys. 5c). W przebiegu czasowym prędkości wirnika praktycznie nie występują oscylacje, a prędkość synchroniczna ustala się po upływie ok. 3 sekund od chwili rozpoczęcia procesu. Przyjęte w obliczeniach ograniczenie napięcia na

wyjściu regulatora PI zapewnia regulację prądu wzbudzenia w zakresie od 0 do wartości znamionowej. Pozwala to na uzyskanie wystarczającej szybkości układu regulacji bez konieczności zastosowania układu zmiany polaryzacji napięcia stałego.

3. WNIOSKI

Wykonane obliczenia wykazały, że zastosowanie układu regulacji prądu wzbudzenia podczas synchronizacji silnika synchronicznego pozwala na łagodzenie stanów przejściowych i skrócenie czasu procesu. Zamknięty układ regulacji prądu magnetyczny zapewnia płynną stabilizację prędkości silnika minimalizując pulsacje momentu elektromagnetycznego.

Literatura

- [1] Pawluk K., Bednarek S.: *Rozruch i stany asynchroniczne silników synchronicznych*. Warszawa, WNT, 1968
- [2] Sobczyk T.: *Łagodna synchronizacja silników synchronicznych dużej mocy z asynchronicznego stanu pracy*. XX Symp. Maszyn Elektr., Maszyny synchroniczne, Kazimierz Dolny, maj 1984
- [3] Zalas P., Zawilak J.: *Wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych*. Maszyny Elektr. Zesz. Problem. BOBRME Komel, 2005, nr 71, 59–64
- [4] Zalas P., Zawilak J.: *Synchronizacja silników synchronicznych przez zmianę kierunku przepływu prądu wzbudzenia*. Prace Nauk. IMiNE. P.Wr. nr 59, Studia i Materiały nr 26, 2005, 247–262

Wpłynęło: 26.09.2006

Paweł ZALAS



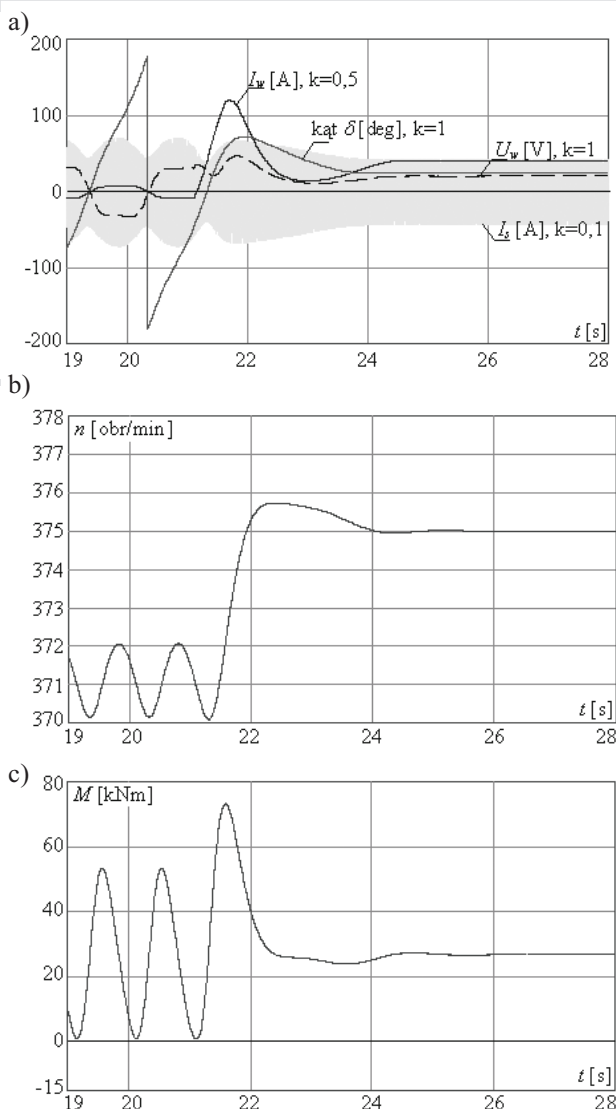
Urodził się w 1975 roku. Studia wyższe ukończył w roku 2000 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej, specjalność maszyny i napędy elektryczne. Obecnie kończy studia doktoranckie w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. Zajmuje się zagadnieniami silników prądu przemiennego dużej mocy a szczególnie procesów synchronizacji maszyn synchronicznych, co jest przedmiotem jego pracy doktorskiej.

e-mail: pawel.zalas@pwr.wroc.pl

Jan ZAWILAK



Stopnie magistra, doktora i doktora habilitowanego uzyskał odpowiednio w latach 1973, 1977 i 1987 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. W latach 1967–68 pracował również w DZWME DoIMel we Wrocławiu na stanowisku konstruktora. Od roku 1973 jest pracownikiem Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych



Rys. 5. Czasowe przebiegi wielkości podczas synchronizacji silnika dla wzbudnicy z zamkniętym układem regulacji prądu
Objaśnienia w tekście

Fig. 5. Time curves values during synchronization process of motor for exciter with close loop-excitation current control system

Politechniki Wrocławskiej. Głównym nurtem jego pracy jest projektowanie i badanie wielobiegowych maszyn prądu przemiennego o przełączalnych uzwojeniach i zmienianych liczbach biegunów pola magnetycznego. Dwubiegowe silniki synchroniczne dużej mocy stanowiące oryginalną kon-

strukcję, zostały wdrożone do eksploatacji w kopalniach węgla i miedzi jako ekonomiczny napęd wentylatorów głównego przewietrzania, a rozwiązanie to zostało nagrodzone przez Prezesa Rady Ministrów RP.

e-mail: jan.zawilak@pwr.wroc.pl