

✓ ✓

**Instytut Agrofizyki  
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN  
w Lublinie**

# ACTA AGROPHYSICA

## 43

Wiktor Pietrzyk, Stanisław Grundas,  
Marek Horyński, Andrzej Sumorek,  
Marek Ścibisz, Stanisław Walusiak

### **UZWOJENIA BIFILARNE DO ODPYLANIA W PRZEMYŚLE ROLNO-SPOŻYWCZYM**

Monografia

Lublin 2001

### **Komitet Redakcyjny**

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

### **Rada Redakcyjna**

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk

prof. dr hab. J. Laskowski

prof. dr hab. I. Dechnik

prof. dr hab. P.P. Lewicki

prof. dr hab. D. Drozd

prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. F. Dubert

prof. dr hab. E. Niedźwiecki

prof. dr hab. J. Fornal

prof. dr hab. J. Sielewiesiuk

prof. dr hab. E. Kamiński

prof. dr hab. W. Stępniewski

prof. dr hab. A. Kędziora

prof. dr hab. Z. Ślipek

prof. dr hab. T. Kęsik

prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. Cz. Koźmiński

### **Redaktor tomu**

Prof. dr hab. inż. Wiktor Pietrzyk

### **Opiniował do druku**

Prof. dr hab. Roman Koper

### **Adres redakcji**

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201  
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl

Publikacja indeksowana przez

Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci. w sieci Internet  
pod adresem <http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/> lub <http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc>

Publikacja finansowana z Programu Leonardo da Vinci, projekt Nr 09112/99.

Sekretariat Generalny Komisji Wspólnoty Europejskiej DG XII nie ponosi  
odpowiedzialności za treści zawarte w niniejszej publikacji.

This publication is supported from Leonardo da Vinci grant No 09112/99.  
European Commission General Directorate DG XXII does not take responsibility  
for the content of this publication.

Publikacja zawiera wyniki badań finansowane przez Komitet Badań Naukowych  
w ramach projektu badawczego Nr 5 P06F 023 17

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2001

ISBN 83-87385-69-7

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz. Ark. wyd. 7,3

Skład komputerowy: Autorzy

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

## SPIS TREŚCI

Przedmowa do serii wydawniczej Leonardo da Vinci .....	3
Preface for Leonardo da Vinci editorial series .....	4
1. WPROWADZENIE .....	5
2. FIZYCZNE PODSTAWY ODPYLANIA W FILTRACH ELEKTRYCZNYCH .....	6
2.1. Filtry wyładowcze .....	6
2.2. Filtry bifilarne .....	8
3. FILTR BIFILARNY .....	12
3.1. Pole elektryczne uzwojenia bifilarnego .....	12
3.2. Parametry elektryczne uzwojenia bifilarnego .....	16
3.2.1. Pomiary parametrów elektrycznych uzwojenia bifilarnego .....	17
3.2.2. Pomiar napięcia przebicia przewodów uzwojenia bifilarnego .....	20
3.3. Siły działające na cząstki w polu uzwojenia bifilarnego .....	22
3.3.1. Uzwojenie zasilane prądem stałym .....	22
3.3.2. Uzwojenie zasilane prądem przemiennym .....	26
3.3.3. Wpływ wybranych czynników na wielkość siły działającej na cząstkę w polu elektrycznym uzwojenia bifilarnego .....	27
4. PARAMETRY PRACY ODPYLACZA .....	33
4.1. Skuteczność odpylania .....	33
4.2. Opór przepływu .....	34
5. METODYKA BADANIA FILTRU BIFILARNEGO .....	37
5.1. Stanowisko badawcze dla filtrów cylindrycznych .....	37
5.2. Stanowisko badawcze dla filtrów płaskich .....	38
5.3. Metodyka pomiaru skuteczności odpylania .....	40
5.3.1. Pomiary filtrów cylindrycznych .....	40
5.3.2. Pomiary filtrów płaskich .....	41
5.4. Metodyka pomiaru oporu przepływu .....	42
6. MATERIAŁ BADAWCZY .....	44
6.1. Przygotowanie materiału badawczego .....	44
6.2. Właściwości fizykochemiczne materiału badawczego .....	45
6.3. Właściwości elektryczne i mechaniczne pyłów otrzymanych z materiału podstawowego .....	48
6.3.1. Rezystywność pyłu .....	52
6.3.2. Pomiar przenikalności elektrycznej pyłów .....	53

6.3.3. Pomiar wytrzymałości warstwy pyłu na przebicie .....	53
6.3.4. Pomiar ciężaru właściwego pyłu .....	54
6.3.5. Struktura pyłu na elektrodzie zbiorczej .....	55
6.4. Metodyka pomiaru właściwości elektrycznych pyłów pochodzenia organicznego .....	58
6.5. Wyniki badań właściwości elektrycznych pyłów pochodzenia organicznego .....	61
7. BADANIE PARAMETRÓW PRACY ELEKTROFILTRU BIFILARNEGO CYLINDRYCZNEGO .....	62
7.1. Ocena skuteczności odpylania filtrów cylindrycznych .....	63
7.2. Ocena oporu przepływu filtrów cylindrycznych .....	64
7.3. Ocena skuteczności odpylania cylindrycznego filtra poprzecznego podwójnego .....	65
8. BADANIA PARAMETRÓW PRACY ELEKTROFILTRU BIFILARNEGO PŁASKIEGO.....	70
8.1. Badania wstępne - dobór ilości filtrów w odpylaczu i ich usytuowania	72
8.2. Ocena skuteczności odpylania filtrów bifilarnych .....	83
8.3. Ocena skuteczności odpylania badanego elektrofiltru bifilarnego .....	85
9. PERSPEKTYWY WYKORZYSTANIA ELEKTROFILTRÓW BIFILARNYCH W PRZEMYSŁE ROLNO-SPOŻYWCZYM .....	89
10. PIŚMIENNICTWO .....	91
11. STRESZCZENIE .....	94
12. SUMMARY .....	95

## Przedmowa do serii wydawniczej Leonardo da Vinci

Istotnym sektorem gospodarki regionu środkowo-wschodniej Polski jest sektor agro-spożywczy i związany z nim przemysł przetwórstwa rolniczego. Dlatego wiele działań naukowych i edukacyjnych związanych z zagadnieniami znajdującymi zastosowanie w tych dziedzinach jest podejmowanych w takich ośrodkach akademickich: jak Politechnika Lubelska oraz Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie.

Znaczna liczba ich absolwentów znajduje zatrudnienie w zakładach przemysłowych tego regionu, zarówno w zakładach przetwórstwa rolnego oraz w jednostkach badawczo-rozwojowych wielu instytucji m.in. u partnerów w projekcie Leonardo da Vinci jakimi są Elektromontaż Lublin S.A. oraz PZL Świdnik S.A. Wielu absolwentów posiadających wykształcenie w zakresie elektrotechniki współuczestniczy często w realizacji zadań badawczych, projektowych i produkcyjnych ukierunkowanych na potrzeby regionu. Poszczególne pozycje serii wydawniczej mają na celu nie tylko prezentację wyników badań, ale także mają stanowić materiał źródłowy dla inżynierów elektryków zatrudnionych w regionie i zawodowo zainteresowanych tą tematyką. Natomiast, dla uczących się na poziomie akademickiego kształcenia zawodowego w dziedzinie elektrotechniki, wydawnictwa te mogą stanowić przykład opisu praktycznej realizacji procesu rozwiązywania trudnych problemów w szeroko rozumianej dziedzinie zastosowań elektrotechniki w wybranych przez twórców projektu zagadnieniach.

W skład serii wydawniczej wchodzi następujące tytuły:

1. Horyński M.: *Wpływ pola elektrostatycznego na właściwości elektryczne ziarna zbóż.*
2. Horyński M., Oleszek M.: *Praktyki zawodowe studentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej w Elektromontaż S.A. w Lublinie.*
3. Pietrzyk W.: *Modele ziarniaków zbóż stosowane w analizie elektrodynamicznej*
4. Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A., Ścibisz M., Walusiak S.: *Uzwojenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym.*
5. Sumorek A.: *Wpływ pola elektrycznego na konwekcyjne suszenia ziarna zbóż.*
6. Walusiak S., Krygier A.: *Praktyki zawodowe studentów wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej w PZL Świdnik.*
7. Wójcicka-Migasiuk D.: *Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do analizy i projektowania instalacji słonecznych ciepłej wody.*

## Preface for Leonardo da Vinci editorial series

Agri - food production and processing industry is most important sector in the central - eastern region of Poland. That is why many educational and scientific activities related to the problems applied in these sectors of industry is taken up in such academic centers as Lublin Technical University and Institute of Agrophysics Polish Science Academy in Lublin.

Many graduates from the regional tertiary vocational education institutes are employed also at Leonardo da Vinci project partners i.e.: Elektromontaż Lublin S.A. and PZL Świdnik S.A., in food processing companies and in Research & Development Units in many institutes and companies. Many graduates educated in electrical engineering often co-operate in realisation of research, design and production tasks directed towards the local needs.

Particular items in this editorial series are aimed not only at the presentation of test results but also can form the reference basis for electric engineers employed in the region who are professionally interested in this field. Nevertheless, students at the level of tertiary vocational training in electrical engineering can take advantage from the described examples of practical processes of solution to difficult problems in widely understood field of electrical engineering applications in areas selected by the authors of this project entitled *"Forging development in the system of students' practical training in electrical engineering sector in the aspect of qualification needs"*.

Leonardo da Vinci editorial series contains the following titles (in Polish):

1. Horyński M.: *The influence of electrostatic field on electric properties of grain.*
2. Horyński M., Oleszek M.: *Vocational practical training for students from the Faculty of Electrical Engineering, Lublin Technical University at Elektromontaż S.A. in Lublin.*
3. Pietrzyk W.: *Grain models in electrodynamic analysis.*
4. Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A., Ścibisz M., Walusiak S.: *Bifilar windings to dust control in agri-food industry.*
5. Sumorek A.: *The influence of electric field on convective drying of grain.*
6. Walusiak S., Krygier A.: *Vocational practical training for students from the Faculty of Electrical Engineering, Lublin Technical University at PZL Świdnik S.A.*
7. Wójcicka-Migasiuk D.: *The application of node potential method for the analysis and design of solar hot water systems.*

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z ważniejszych problemów technicznych dla przemysłu rolno – spożywczego, mających na względzie ochronę zdrowia personelu technicznego i ochronę środowiska naturalnego jest usuwanie pyłów. Pyły powstają w takich procesach jak mielenie czy mieszanie, co ma miejsce w młynach, mieszalnicach pasz, kaszarniach, piekarniach, silosach zbożowych, suszarniach itp.

Wspólną cechą tych zanieczyszczeń pyłowych są właściwości wybuchowe. Uniemożliwia to zastosowanie znanych ze swojej skuteczności i wysokiej wydajności tzw. filtrów elektrostatycznych. Działanie tych filtrów oparte jest bowiem na zjawisku wyładowania ulotowego.

Z tego powodu w tych zakładach stosowane są różnego typu filtry mechaniczne jak np.: cyklony lub filtry tkaninowe. Poważną wadą tego typu urządzeń jest duża energochłonność. Dodatkowo, przy filtrach tkaninowych występuje zmienne obciążenie wentylatora, spowodowane osadzaniem się pyłu na materiale filtru.

Te niedogodności zmuszają do poszukiwania nowych rozwiązań. Jednym z nich jest, zdaniem autorów, wykorzystanie w budowie filtru, niejednorodnego pola elektrycznego, wytwarzanego wokół uzwojenia bifilarnego [27]. Takie uzwojenie jest zasilane niskim napięciem, nie powodującym zagrożenia wyładowania ulotowego a tym samym wybuchu pyłu.

W rozdziale drugim i trzecim niniejszej pracy przedstawiono zasadę działania filtrów elektrostatycznych nowej generacji z uzwojeniem bifilarnym.

W rozdziale szóstym omówiono właściwości elektryczne pyłów otrzymywanych z ziarna zbóż.

W rozdziale siódmym i ósmym przedstawiono wyniki badań dwóch typów elektrofiltrów z uzwojeniem bifilarnym, zbudowanych przez autorów, do celów badawczych:

- elektrofiltra cylindrycznego,
- elektrofiltra płaskiego.

Wydaje się, że obydwa rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie w praktycznych rozwiązaniach technicznych.

## 2. FIZYCZNE PODSTAWY ODPYLANIA W FILTRACH ELEKTRYCZNYCH

### 2.1. Filtry wyladowcze

Elektrofiltry są to urządzenia, w których oczyszczanie gazów od znajdujących się w nich cząstek stałych oraz płynnych następuje pod działaniem sił elektrycznych, do czego wykorzystuje się elektryczny ładunek. Naładowane cząstki w wyniku działania pola elektrycznego są usuwane z oczyszczanego strumienia gazów i osadzają się na elektrodach zbiorczych.

Elektrofiltry należą do najstarszych urządzeń odpylających, których zasadę działania opracował w 1910 r. Cottrel [52]. Siły działające na cząstki aerozolowe zależą od ładunku elektrycznego uzyskiwanego przez cząstki oraz potencjału pola. Przy odpowiednio dużym potencjale rzędu kilku kV/cm, możliwe jest wydzielenie cząstek submikronowych.

Do podstawowych wad elektrofiltrów zalicza się: czułość na zmiany właściwości fizykochemicznych gazu i cząstek oraz na objętość strumienia gazu; możliwość blokowania ich wnętrza wydzielonym pyłem; możliwość wyladowania łukowego; korozję wnętrza odpylacza.

Do zasadniczych parametrów strumienia zanieczyszczeń zalicza się: natężenie przepływu strumienia gazu, jego temperaturę i ciśnienie oraz stężenie zanieczyszczeń. W niektórych przypadkach istotne są również: korozyjność, palność, wybuchowość, rozmiar cząsteczek i ich gęstość, rezystywność.

Cząstki stałe będące składnikiem pyłów lub dymów mają zwykle kształt nieregularny z wyjątkiem cząstek otrzymanywanych w wyniku kondensacji. Kształt cząstek jest istotny z punktu widzenia ich ruchu w gazie. Ze zmniejszaniem rozmiarów cząstek wpływ kształtu staje się coraz mniejszy.

Z kształtem cząstki wiąże się pojęcie sferyczności definiowane jako stosunek powierzchni kuli o takiej samej objętości jak objętość danej cząstki do powierzchni cząstki.

Od składu chemicznego cząstki zależą właściwości elektryczne, zwilżalność, reaktywność oraz toksyczność. Reaktywność wywiera wpływ na zdolność cząstek do elektryzacji, właściwości termiczne, palność i eksplozyjność cząstek.

Szczególną rolę odgrywa rezystywność cząstek, której maksimum wynosi  $2 \cdot 10^{10} \Omega \text{cm}$ , przy czym rodzaj ładunku elektrycznego cząstek jest istotny w procesach oczyszczania gazów.

W trakcie odpylania cząstki aerozolowe mogą pozostawać pod działaniem sił: grawitacji, bezwładności (inercji), dyfuzji, elektrycznych. Względny ruch cząstek



aerozolowych w stosunku do strumienia gazu powoduje powstanie dodatkowych sił oporu hydrodynamicznego ze strony gazu. Cząstki mogą osadzać się na powierzchni kolektora w wyniku bezpośredniego zderzenia lub mogą być do niej kierowane wskutek działania wymienionych sił. Siły mogą działać pojedynczo lub w odpowiedniej kombinacji.

Wydzielanie cząstek aerozolowych ze strumienia gazów pod wpływem działania sił pola elektrycznego zachodzić może wskutek:

- 1) obecności ładunków elektrycznych na cząstkach powstających podczas wytwarzania aerozolu,
- 2) obecności swobodnych jonów w strumieniu gazu,
- 3) zewnętrznego pola elektrycznego wytwarzającego wyładowania koronowe.

Cząstki z tym samym ładunkiem elektrycznym (wzajemnie się odpychające) mogą być przyciągane lub odpychane w zależności od polaryzacji elektrody.

Cząstki obojętne elektrycznie (nienaładowane) mogą być wciągane do niejednorodnego pola elektrycznego utworzonego przez elektrody wskutek indukcji lub w wyniku zakłóceń pola wywołanego elektrodami ostrzowymi.

W procesach z udziałem cząstek stałych pod wpływem różnych warunków, łatwo następuje generowanie ładunków elektrostatycznych lub wyładowanie elektryczne, co może być źródłem zapłonu i eksplozji.

Wyróżnia się eksplozje pyłu pierwotne i wtórne. Eksplozja pierwotna zachodzi, gdy cząstki pyłu są rozproszone w atmosferze aparatu zawierającej dostateczną ilość tlenu do spalania i istnieje źródło o dostatecznej energii. Eksplozja wtórna występuje, gdy płomień z eksplozji pierwotnej powoduje zapłon pyłu w najbliższym otoczeniu. Jest ona bardzo niebezpieczna, gdyż może prowadzić do zniszczenia aparatu jak i budynku.

Na eksplozyjność cząstek pyłu wpływają [52]:

- reaktywność chemiczna, ze wzrostem której zdolność do eksplozji bardzo się zwiększa, np.: reaktywne proszki metali Mg, Al, Ti, Zr i in. oraz węglowodory nienasycone i pochodne aminowe,
- wilgotność, która obniża zdolność zapłonu i gwałtowność wybuchu pyłu,
- rozmiar i powierzchnia cząstek. Ze zmniejszaniem rozmiarów cząstek (poniżej 420  $\mu\text{m}$ ) wzrasta ich zdolność do zapłonu i eksplozji,
- stężenie cząstek. Eksplozja (wybuch) pyłu może nastąpić, gdy stężenie cząstek odpowiada określonym dla danego pyłu, granicznym wartościom. Szybkość eksplozji i minimum energii zapłonu zmienia się ze stężeniem pyłu,
- burzliwość w środowisku: pył – powietrze, co powoduje polepszenie dopływu tlenu do powierzchni cząstki,

- obecność źródła zapłonu o odpowiedniej energii.

Źródłem zapłonu mogą być wyładowania elektryczne i elektrostatyczne, otwarty płomień, ciepłe i ogrzewane powierzchnie, ogrzewanie spontaniczne, spawanie, cięcie itp.

Wyładowanie elektrostatyczne jest jednym z poważniejszych źródeł pożarów i eksplozji w procesach przemysłowych, również pyłów.

Gromadzenie się ładunków elektrostatycznych na powierzchni obiektów z możliwością niebezpiecznego wyładowania może nastąpić:

- przez kontakt i tarcie, a następnie separację dwóch materiałów, z których jeden może być izolatorem, co powoduje gromadzenie się na nich ładunków różnionamiennych w równych ilościach,
- podczas przepływu płynów na granicy warstwy podwójnej,
- w wyniku ładowania indukcyjnego materiałów przewodzących,
- podczas kontaktu obiektów naładowanych z nienaładowanymi.

Ładunek gromadzony na cząstkach transportowanego pyłu jest funkcją wielu zmiennych materiału cząstek i środowiska. Dużo ładunków gromadzi się podczas transportu pneumatycznego.

Gromadzeniu ładunków elektrostatycznych zapobiega się przez:

- zmniejszenie szybkości dopływu i zwiększenie szybkości odpływu ładunków,
- ograniczenie akumulacji ładunków do poziomu bezpiecznego przez okresowe ich odprowadzanie,
- zmniejszenie możliwości zapłonu przez obniżenie stężenia tlenu poniżej poziomu zapłonu.

## 2.2. Filtry bifilarne

Ważnym problemem w oczyszczaniu powietrza w zakładach przemysłu rolno-spożywczego jest oczyszczanie z pyłów pochodzenia roślinnego.

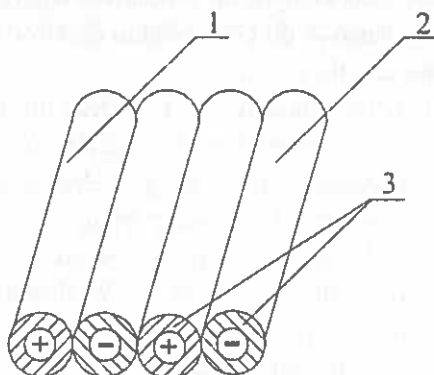
Wydaje się, że możliwe jest wykorzystanie do budowy skutecznych filtrów elektrostatycznych, niejednorodnego pola elektrycznego generowanego przez uzwojenie bifilarne.

Niejednorodne pole elektryczne w cząstkach pyłów wywołuje przesunięcie ładunków elektrycznych. Wzajemne oddziaływanie pola z tymi ładunkami wywołuje siły przyciągania pyłu do powierzchni elektrod. Siła oddziaływania pola elektrycznego na cząsteczki pyłów zależy od natężenia pola elektrycznego i od

wielkości ładunków swobodnych, które z kolei są determinowane przez właściwości elektryczne pyłów (przenikalność dielektryczna, rezystywność).

Pyły pochodzenia roślinnego zaliczają się do dielektryków, których molekuly zwykle składają się z symetrycznie rozłożonych ładunków [18]. Pod działaniem pola molekuly wykazują moment elektryczny. Na cząstki pyłów działają siły: ciężenia, tarcia, Coriolisa oraz inercji. Na cząsteczki pochodzenia roślinnego umieszczone w polu elektrostatycznym działa ponadto siła wywołana polaryzacją. Jest ona wynikiem oddziaływania pola na ładunki swobodne, które cząstki pyłu mogą otrzymać podczas wzajemnego tarcia.

Cechą charakterystyczną uzwojenia bifilarnego (Rys. 1) jest brak indukcyjności. Stosowane są uzwojenia bifilarne prądowe lub uzwojenia bifilarne napięciowe, w których jedynym prądem jest prąd upływu poprzez izolację przewodów oraz warstwę powietrza rozdzielającego przewody. Dla bezpiecznej pracy urządzenia odpylającego, napięcie przyłożone do uzwojenia musi mieć wartość dużo niższą od wartości napięcia przebicia izolacji.



Rys. 1. Układ przewodów uzwojenia bifilarnego.

1- przewód o potencjale dodatnim, 2- przewód o potencjale ujemnym, 3- izolacja uzwojenia.

Fig. 1. Bifilar winding wiring diagram

1- positive lead, 2- negative lead, 3 – winding insulation.

W zależności od znaku ładunku elektrody, w pobliżu której znajduje się cząstka pyłu, będzie ona przyciągana lub odpychana [17]. Jeśli gęstość objętościową ładunków swobodnych cząstki pyłu oznaczymy przez  $\rho$  to tę siłę można określić według następującej zależności [50]:

$$F = \int_V \rho E dV \quad (1)$$

Ze wzoru (1) widać, że siła  $F$  zależy od natężenia  $E$  pola elektrycznego i od wielkości ładunków swobodnych, która z kolei jest określona właściwościami fizykochemicznymi cząstek pyłu i ich parametrami: przenikalność dielektryczna, konduktywność, gęstość, wilgotność.

Wzajemne oddziaływanie cząstek pyłu z zewnętrznym polem elektrycznym wywołuje siłę polaryzacji  $F_p$ .

$$F_p = -\frac{1}{2} \int_0^V E^2 \text{grad } \epsilon \, dV, \quad (2)$$

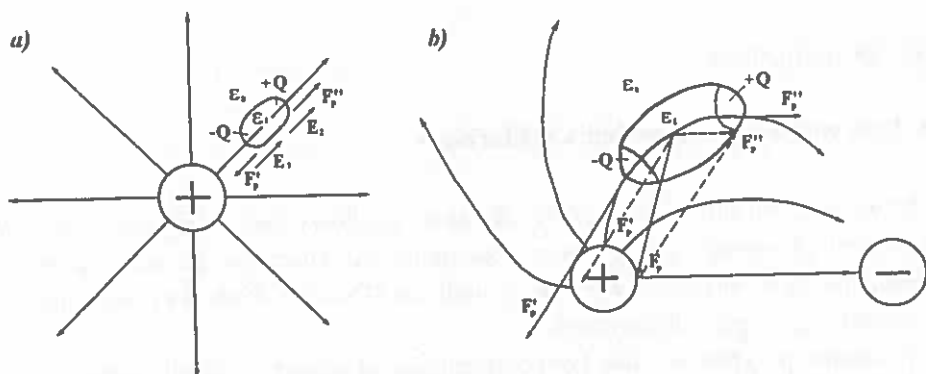
gdzie:  $\text{grad } \epsilon$  - gradient uwzględniający zmiany przenikalności dielektrycznej wywołane oddziaływaniem ładunków swobodnych w cząstce pyłu,  
 $dV$  - element objętości cząstki,  
 $\epsilon$  - przenikalność dielektryczna pyłu.

Siła  $F_p$  usiłuje przenieść cząstki pyłu do obszaru o największym natężeniu pola elektrycznego, albo przycisnąć je do powierzchni elektrod ( przy względnej przenikalności dielektrycznej cząstki  $\epsilon > 1$ ).

Z analizy wyrażenia (2) wynika, że siła  $F_p$  zależy nie tylko od natężenia pola elektrycznego, ale i jego niejednorodności, właściwości elektrycznych cząstek pyłu, a ostatecznie od ich składu biologicznego i chemicznego. Na Rys. 2 przedstawiono schemat oddziaływania na cząstkę pyłu, niejednorodnego pola elektrycznego. Na Rys. 2a przedstawiono obraz pola elektrycznego jednej elektrody w środowisku o przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_s$ . W drugim przypadku (Rys. 2b) symetria pola została zakłócona obecnością drugiej elektrody. Przy przemieszczaniu się cząsteczki pyłu o przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_l$  w takie pole, na jej powierzchni indukują się ładunki - dodatni i ujemny, po przeciwnych stronach do elektrod. Na ładunki te działa pole elektryczne i jeśli jest ono niejednorodne powstają dwie różne siły, co do wielkości i kierunku:

$$\begin{aligned} F_p' &= (-Q)E_1 \\ F_p'' &= (+Q)E_2 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:  $E_1$  i  $E_2$  - wektory natężenia pola elektrycznego w miejscu znajdowania się ładunków  $-Q$  i  $+Q$ .



Rys. 2. Schemat oddziaływania na cząstkę pyłu, niejednorodnego pola elektrycznego wywołanego przez jedną elektrodę (a) oraz dwie elektrody (b). [50]

Fig. 2. Heterogeneous electric field influence on a particulate, caused by one electrode a) and by two electrodes b). [50]

Wypadkowa siła polaryzacji:

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{F}_p' + \mathbf{F}_p'' \quad (4)$$

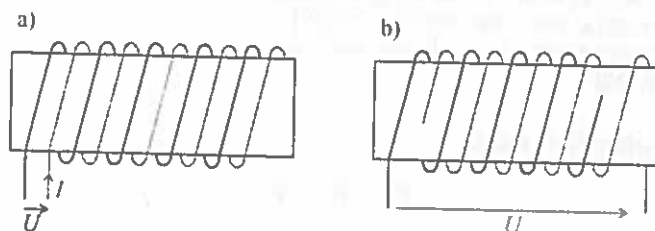
W pierwszym przypadku (Rys. 2a) siła polaryzacji, która jest proporcjonalna do różnicy natężeń pola elektrycznego w miejscu występowania ładunków jest równa zero (pole jednorodne). W drugim przypadku (Rys. 2b), w polu nierównomiernym, siła polaryzacji występuje i jej wartość zależy od nierównomierności pola elektrycznego i odległości między elektrodami.

### 3. FILTR BIFILARNY

#### 3.1. Pole elektryczne uzwojenia bifilarnego

Uzwojenie bifilarne może mieć charakter prądowy lub napięciowy [25]. W pierwszym przypadku jedne końce uzwojenia są połączone ze sobą, a drugie podłączone są do zasilacza wysokiego napięcia (Rys.3a). Podczas pracy przez to uzwojenia płynie prąd elektryczny.

W drugim przypadku jedne końce uzwojenia są otwarte, a drugie dołączone są do zasilacza (Rys.3b).



Rys. 3. Uzwojenie bifilarne: a) prądowe; b) napięciowe.

Fig. 3. a) Current and b) Voltage bifilar winding.

W obu przypadkach uzwojenia są spolaryzowane i wokół nich wytwarzane jest pole elektryczne.

Analizę pola magnetycznego i elektrostatycznego powstającego wokół uzwojeń bifilarnych zajmowali się m.in. Gramz, Sikora, Purczyński [9, 10], Taruśkin [46], Leonov [20, 21, 22].

W pracy [9] stosując metodę rozdzielania zmiennych i dwuwalcowy układ współrzędnych autorzy przedstawili analizę pola magnetycznego wokół uzwojeń bifilarnych, w których jeden z przewodników ma przenikalność magnetyczną różną od  $\mu_0$ . Analiza dotyczyła pól stałych i quasi-stacjonarnych. W [9] rozszerzono analizowane zagadnienia uwzględniając przewodniki o przenikalność  $\mu_1$  i  $\mu_2$ . Przedstawiono również graficzny obraz pola magnetycznego dla wybranych kombinacji wartości przenikalności magnetycznej uzwojeń bifilarnych i ich wymiarów geometrycznych.

W [21] dokonano analizy pola elektrostatycznego wokół uzwojenia bifilarnego w przypadku jednorodnego i izotropowego środowiska. Analizę przeprowadzono dla płaskiego układu kartezjańskiego x-y w oparciu o twierdzenie Gaussa. Potwierdziła ona złożoną konfigurację pola elektrycznego powstającego wokół tego typu uzwojenia. W pracy tej wyprowadzono również zależność na wartość potencjału skalarnego i natężenia pola elektrycznego w zależności od przenikalności dielektrycznej i wymiarów geometrycznych uzwojenia bifilarnego. Funkcję zmian wartości potencjału opisano zależnością:

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_1} \ln \frac{\cosh \frac{\pi}{a} y + \cos \frac{\pi}{a} x}{\cosh \frac{\pi}{a} y - \cos \frac{\pi}{a} x}, \quad (5)$$

a funkcję wartości natężenia pola elektrycznego wzorem:

$$E = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_1} \left( \cosh^2 \frac{\pi}{a} y - \cos^2 \frac{\pi}{a} x \right), \quad (6)$$

gdzie:

$\tau$  - rozkład liniowy ładunków na uzwojeniu, C/m;

$\epsilon_0$  - stała dielektryczna próżni,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m;

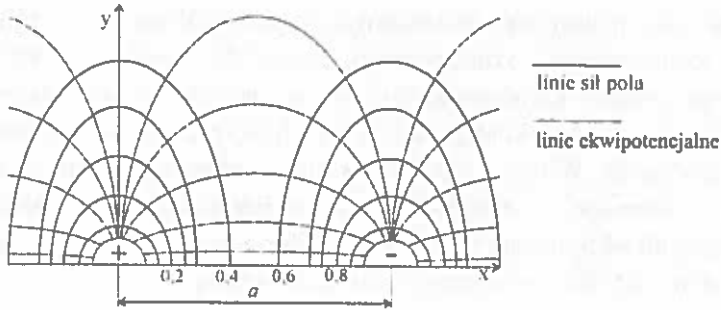
$\epsilon_1$  - stała dielektryczna środowiska;

$a$  - odległość między osiami przewodów uzwojenia (skok uzwojenia), m;

$x, y$  - współrzędne punktu analizowanego pola.

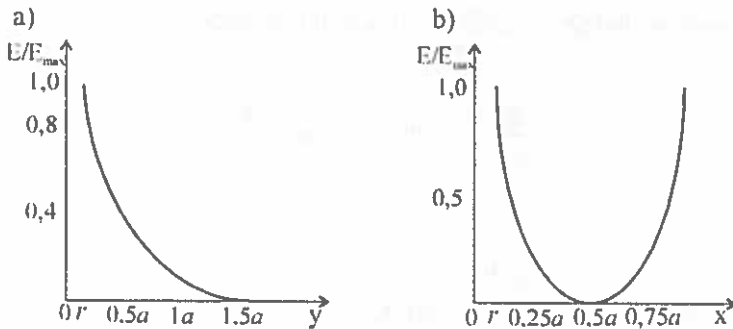
W [20], na podstawie otrzymanych wyżej zależności, przedstawiono rozkład potencjałów i linii sił pola elektrycznego (Rys.4).

Przeprowadzono również analizę rozkładu potencjału i natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Wykazano, że wartość natężenia pola ulega szybkiemu zmniejszeniu wraz z oddalaniem się od uzwojenia, a zatem osiąga ono największe wartości na powierzchni izolacji uzwojenia bifilarnego (Rys.5).



Rys. 4. Rozkład linii sił pola elektrycznego i potencjałów wokół uzwojenia bifilarnego.

Fig. 4. The distribution of electrical field lines of force and potentials around bifilar winding.



Rys. 5. Zmiany wartości natężenia pola elektrycznego  $E$  wraz z oddalaniem się od przewodników wzdłuż: a) osi  $y$ , b) osi  $x$ .

Fig. 5. Changes of electrical field intensity  $E$  due to the distance from leads along: a)  $y$  axis, b)  $x$  axis.

Na rysunkach tych widać, że wraz z oddalaniem się od powierzchni uzwojenia, wzdłuż osi  $y$  (Rys.5a) wartość natężenia pola szybko spada i w odległości równej dwukrotnej wartości skoku uzwojenia osiąga wartość znikomo małą, którą można zaniedbać. Natomiast w przestrzeni międzyelektrodowej wartość natężenia pola zmniejsza się osiągając najmniejszą wartość w połowie odległości między uzwojeniami (Rys.5b).

Analiza dotyczyła przewodów o kołowej powierzchni przekroju (Rys.6) i przy tym założeniu wyprowadzono równanie określające wartość maksymalną natężenie pola elektrycznego wokół uzwojenia bifilarnego:



$$E_{\max} = \pi \frac{U_z}{a} \left( \sin \frac{\pi}{a} r \ln \frac{1 + \cos \frac{\pi}{a} r}{1 - \cos \frac{\pi}{a} r} \right), \quad (7)$$

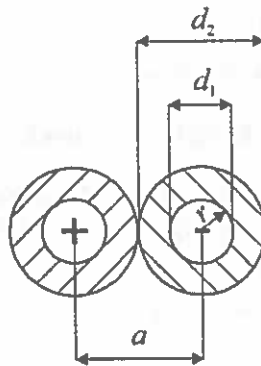
gdzie:

$E_{\max}$  – wartość maksymalna natężenia pola elektrycznego, V/m;

$U_z$  – napięcie zasilające przewody uzwojenia bifilarnego, V;

$a$  – skok uzwojenia, m;

$r$  – promień żyły przewodu nawojowego, m.



Rys. 6. Wymiary uzwojenia bifilarnego:

$a$  – skok uzwojenia,  $r = d_1/2$  – promień żyły przewodu nawojowego,

$d_1$  – średnica żyły przewodu uzwojenia bifilarnego;  $d_2$  – średnica przewodu uzwojenia bifilarnego.

Fig. 6. Dimension of bifilar winding:

$a$  – pitch of winding,  $r = d_1/2$  – radius of conductor in the winding,

$d_1$  – diameter of conductor in the winding,  $d_2$  – bifilar winding wire diameter.

W [46] przedstawiono stanowisko do modelowania pól elektrycznych przy wykorzystaniu papieru przewodzącego prąd elektryczny. Zamieszczono również wyniki przeprowadzonych doświadczeń obejmujących rozkład potencjału i rozkład linii sił pola elektrycznego dla różnych modeli układów elektrod (cylindrycznych i prostokątnych). Wyniki doświadczeń pokrywały się z wynikami teoretycznymi prac prezentowanych powyżej.

W omawianych pracach analiza pola elektrycznego dokonywana była w płaskim układzie współrzędnych prostokątnych z zastosowaniem twierdzenia Gaussa [26]. Twierdzenie Gaussa można przedstawić w postaci całkowej:

$$\oint_S \epsilon \mathbf{E} \, d\mathbf{S} = \sum q, \quad (8)$$

lub w postaci różniczkowej:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \sigma, \quad (9)$$

gdzie:

$\mathbf{D}$  - wektor indukcji elektrycznej,  
 $\sigma$  - gęstość objętościowa ładunku.

### 3.2. Parametry elektryczne uzwojeń bifilarnych

Podstawową wielkością decydującą o skuteczności działania separatorów i filtrów elektrostatycznych jest natężenie pola elektrycznego. Pole elektryczne uzwojeń bifilarnych jest niejednorodne. Największe jego wartości występują w przestrzeni międzyzwojowej, na prostej łączącej osie przewodów.

Maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego wokół uzwojenia bifilarnego określa zależność (7).

Z równania (7) wynika, że przy danym napięciu  $U_z$ , maksymalna wartość natężenia pola występującego na powierzchni przewodu, jest zależna od promienia żył przewodów i odstępu między ich osiami. Wytrzymałość elektryczna uzwojenia bifilarnego jest określana jako maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje elektryczne uszkodzenie izolacji. Stąd znając parametry geometryczne danego uzwojenia (Rys.6) i wytrzymałość elektryczną  $E_p$  izolacji przewodów można wyznaczyć wartość napięcia przebiccia:

$$U_p = \frac{d_2}{\pi} E_p \left( \sin \frac{\pi d_1}{2 d_2} \ln \frac{1 + \cos \frac{\pi d_1}{2 d_2}}{1 - \cos \frac{\pi d_1}{2 d_2}} \right), \quad (10)$$

gdzie:

$U_p$  – napięcie przebicia, kV;

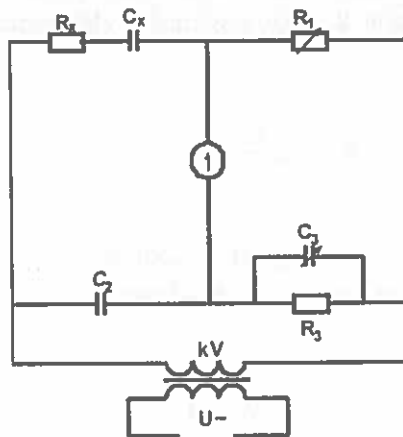
$d_1$  – średnica żyły przewodu uzwojenia bifilarnego, m;

$d_2$  – średnica przewodu uzwojenia bifilarnego, m.

Przemysł krajowy nie produkuje specjalnych przewodów na uzwojenia bifilarne, dlatego w stanowisku badawczym wykorzystano przewody typu Dy z izolacją z polichlorku winylu. Stąd zachodzi konieczność wyznaczenia parametrów elektrycznych tych przewodów, szczególnie w warunkach zasilania wyższymi napięciami ( $U > 750$  V).

### 3.2.1. Pomiary parametrów elektrycznych uzwojenia bifilarnego

Pomiary parametrów elektrycznych uzwojeń bifilarnych napięciowych najdogodniej jest przeprowadzać na wysokonapięciowym mostku Scheringa (Rys.7).



Rys. 7. Wysokonapięciowy mostek Scheringa.

Fig. 7. High voltage Schering bridge.

Mostek Scheringa przy stosunkowo małej liczbie pomiarów pozwala określić pojemność elektryczną  $C_x$ , dobroć  $Q_R$ , tangens strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ , przewodność czynną  $\gamma$ , współczynnik mocy  $\cos\varphi$ , moc czynną  $P$ , moc bierną  $Q$ , moc pozorną  $S$  oraz przenikalność dielektryczną izolacji  $\epsilon$  przewodów uzwojenia bifilarnego [5].

Mostek Scheringa doprowadzany jest do stanu równowagi poprzez zmianę wartości rezystancji  $R_1$  i pojemności  $C_3$ .

W stanie równowagi mostka spełniony jest warunek:

$$\underline{Z}_x \underline{Z}_3 = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2. \quad (11)$$

Uwzględniając parametry elementów tworzących ramiona mostka oraz pulsację  $\omega$  napięcia zasilającego mostek zależność (11) można przedstawić w postaci:

$$\left( R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) \frac{\frac{R_3}{j\omega C_3}}{R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}} = R_1 \frac{1}{j\omega C_2}. \quad (12)$$

Stąd po przekształceniu i porównaniu części rzeczywistych i urojonych równania (12), rezystancję uzwojenia  $R_x$  i jego pojemność elektryczną  $C_x$  można wyznaczyć z zależności:

$$R_x = R_2 \frac{C_4}{C_2}, \quad C_x = C_2 \frac{R_1}{R_2}. \quad (13)$$

Znajomość parametrów elektrycznych i geometrycznych uzwojenia umożliwia obliczenie jego konduktywności  $\gamma$  i wypadkowej przenikalności dielektrycznej  $\varepsilon$ :

$$\gamma = \frac{l}{S_{Cv}} \frac{1}{R_x}, \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{C_x \ln \frac{a}{r}}{\pi l_v (N-1)}, \quad (15)$$

gdzie:

$R_x$  - rezystancja uzwojenia bifilarnego,  $\Omega$ ;

$C_x$  - pojemność elektryczna uzwojenia bifilarnego, F;

- $l$  - długość przewodu nawojowego uzwojenia bifilarnego, m;  
 $S_{cu}$  - pole przekroju poprzecznego żyły przewodu nawojowego, m<sup>2</sup>;  
 $a$  - skok uzwojenia, m;  
 $r$  - promień żyły przewodu nawojowego, m;  
 $l_0$  - długość jednego nawoju uzwojenia bifilarnego, m;  
 $N$  - liczba zwojów uzwojenia bifilarnego.

W przypadku zasilania uzwojeń ze źródła prądu przemiennego można wyznaczyć moc dostarczaną do układu. Moc czynną  $P$ , bierną  $Q$ , pozorną  $S$  układu opisują zależności:

$$P = \frac{U^2 \omega^2 C_2 R_1 C_3}{\left(\frac{R_1}{R_3}\right)^2 + (R_1 \omega C_3)^2}, \quad (16)$$

$$Q = \frac{U^2 \omega^2 C_2 \frac{R_1}{R_3}}{\left(\frac{R_1}{R_3}\right)^2 + (R_1 \omega C_3)^2}, \quad (17)$$

$$S = U^2 \frac{\sqrt{(\omega^2 C_2 R_1 C_3)^2 + \left(\omega C_2 \frac{R_1}{R_3}\right)^2}}{\left(\frac{R_1}{R_3}\right)^2 + (R_1 \omega C_3)^2}. \quad (18)$$

Obliczenie wartości mocy układu pozwala wyznaczyć współczynnik mocy  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{C_3}{\sqrt{C_3^2 + \left(\frac{1}{R_3 \omega}\right)^2}}, \quad (19)$$

tangens strat dielektrycznych  $tg\delta$  :

$$tg\delta = \frac{P}{Q} = \omega R_3 C_3, \quad (20)$$

oraz dobroć układu  $Q_g$ :

$$Q_g = \frac{1}{tg\delta} = \frac{1}{\omega R_3 C_3}. \quad (21)$$

### 3.2.2. Pomiar napięcia przebicia przewodów uzwojenia bifilarnego

Uzwojenia bifilarne w eksperymentalnym stanowisku badawczym wykonano przy wykorzystaniu przewodów typu Dy z izolacją z polichlorku winylu. Przeprowadzając próby z modelami uzwojeń bifilarnych zasilano je z regulowanego źródła napięcia przemiennego. Zwiększano jednostajnie napięcie (ok. 1kV/s), doprowadzając do przebicia elektrycznego izolacji przewodów uzwojenia [31]. Tak wyznaczona wartość napięcia przebicia izolacji elektrycznej pozwala określić dopuszczalne zakresy napięć zasilających, zapewniających bezpieczeństwo pracy urządzenia i obsługi.

Pomiary przeprowadzono dla przewodów Dy o polu przekroju żyły przewodu  $S_{Cu} = 4 \text{ mm}^2, 2,5 \text{ mm}^2, 1,5 \text{ mm}^2, 1 \text{ mm}^2$  i  $0,5 \text{ mm}^2$ . Wyniki badań zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiaru napięcia przebicia  $U_p$  przewodów Dy

Table 1. The measurement results of breakdown voltage  $U_p$  of windings Dy

$S_{Cu}, \text{mm}^2$	$d_1, \text{mm}$	$d_2, \text{mm}$	$U_p, \text{kV}$
4	2,26	4,07	68,3
2,5	1,87	3,35	54,6
1,5	1,38	2,58	47,8
1	1,13	2,41	59,5
0,5	0,41	1,02	38,2

Wyniki badań potwierdziły możliwość wykorzystania przewodów elektroinstalacyjnych Dy do nawijania uzwojeń bifilarnych. Przy napięciach zasilających uzwojenia, nie przekraczających 15 kV, pomiary wykazały co najmniej dwukrotny zapas bezpieczeństwa w stosunku do napięcia przebicia izolacji przewodów.

W trakcie pomiarów zaobserwowano, że często dochodziło do wyładowań między żyłami wolnych końców przewodów uzwojenia bifilarnego. Dlatego podczas konstrukcji urządzeń, wykorzystujących uzwojenia bifilarne napięciowe, należy dokładnie izolować wolne końce przewodów nawojowych.

Wyznaczenie parametrów elektrycznych uzwojeń bifilarnych stosowanych w urządzeniach odpylających przemysłu rolno-spożywczego pozwala na prawidłowy dobór źródła zasilania, określenie zużycia energii na jednostkę obrabianego materiału, ocenę ekonomiczności i trwałości badanego urządzenia. Pozwala też wybrać najkorzystniejsze warunki pracy. Znajomość tych parametrów umożliwia również przeprowadzenie analizy rozkładu pola elektrycznego wokół uzwojenia bifilarnego oraz pozwala określić wielkość i rozkład sił oddziaływujących na separowane cząstki pyłu. Warunkują także zapewnienie bezpieczeństwa obsługi urządzeń i ich prawidłowego funkcjonowania.

### 3.3. Siły działające na cząstki w polu uzwojenia bifilarnego

#### 3.3.1. Uzwojenie zasilane prądem stałym

Przedstawiony na Rys. 1 układ elektrod można rozpatrywać jako pojemność  $N$  przewodów, pokrytych izolacją o przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_1$ . Pojemność pary przewodów wynosi [47]:

$$C_1 = \frac{\pi \epsilon_{1e} l}{\ln\left(\frac{a}{r}\right)}, \quad (22)$$

gdzie:  $C_1$  – pojemność pary przewodów, F;

$l$  – długość jednej pary przewodów, m;

$a$  – odległość między osiami przewodów, m;

$r$  – promień przekroju żyły przewodów, m;

$\epsilon_{1e}$  – zastępcza przenikalność dielektryczna izolacji i szczeliny powietrznej, F/m.

Pojemność całego układu wyniesie:

$$C = C_1(N-1) = \frac{\pi \epsilon_{1e} l(N-1)}{\ln\left(\frac{a}{r}\right)}. \quad (23)$$

W rzeczywistości  $\epsilon_{1e} \approx \epsilon_1$ , gdzie  $\epsilon_1$  – przenikalność dielektryczna izolacji przewodów.

Ładunek sumaryczny jednoimiennie naładowanych przewodów:

$$Q = CU = \frac{\pi \epsilon_1 l}{\ln\left(\frac{a}{r}\right)} U(N-1), \quad (24)$$

gdzie:  $U$  – napięcie przyłożone do układu elektrod, V.

Liczba jednoimiennie naładowanych elektrod stanowi połowę wszystkich elektrod układu, stąd ładunek jednego przewodu wynosi:

$$q_1 = \frac{Q}{N} = \frac{2\pi \epsilon_1 l U(N-1)}{N \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (25)$$



W równaniu (25) dla  $N \gg l$  można w pierwszym przybliżeniu przyjąć  $\frac{N-l}{N} = 1$ .

Wówczas przyjmie ono postać:

$$q_l = \frac{2\pi\epsilon_1 l U}{\ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (26)$$

Znając długość jednego przewodu i jego ładunek, można określić na nim liniową gęstość ładunków:

$$\tau = \frac{q_l}{l} = \frac{2\pi\epsilon_1 U}{\ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (27)$$

W układzie, którego schemat przedstawiono na Rys. 8:

$$|\mathbf{E}_A| = |\mathbf{E}_B|.$$

Wystarczy wówczas określenie natężenia pola tylko w punkcie A. Wartość  $\mathbf{E}_A$  można znaleźć jako sumę geometryczną wektorów natężeń wywołanych przez pierwszą i drugą elektrodę w punkcie A.

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{E}_{1*} + \mathbf{E}_{2*}. \quad (28)$$

gdzie:  $\mathbf{E}_{1*}$  - składowa natężenia pola w izolacji przewodu,

$\mathbf{E}_{2*}$  - składowa natężenia pola w cząstce pyłu,

Wówczas

$$E_A = \sqrt{E_{1*}^2 + E_{2*}^2 - 2E_{1*}E_{2*} \cos \alpha} \quad (29)$$

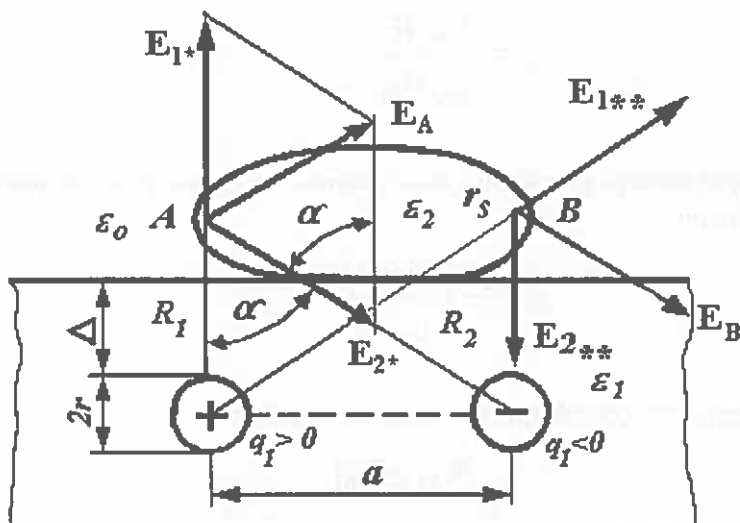
Zgodnie z teorią Gaussa:

$$E_{1*} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_1 (r + \Delta + r_s)}, \quad (30)$$

gdzie:  $\Delta$  - grubość izolacji, m; ( $\Delta = \frac{d_2 - d_1}{2}$ , p. Rys. 6);

$r_s$  - uśredniony promień krzywizny cząsteczki, m;

$r$  - promień przewodu, m.



Rys. 8. Schemat obliczeniowy dla określenia natężenia pola elektrycznego nad elektrodami (w strefie odpylania) [47].

Fig. 8. Calculation diagram to determine electric field intensity over electrodes (in dust removal zone) [47].

Natężenie pola wywoływane przez drugi przewód w punkcie A (Rys. 8):

$$E_{2*} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_1\sqrt{(r + \Delta + r_s)^2 + a^2}}. \quad (31)$$

Wprowadzając oznaczenia:

$$R_1 = r + \Delta + r_s,$$

$$R_2 = \sqrt{(r + \Delta + r_s)^2 + a^2} + \sqrt{R_1^2 + a^2}, \quad (32)$$

$$\cos\alpha = \frac{R_1}{R_2}.$$

gdzie:  $R_1$  – odległość punktu A od osi przewodu o ładunku  $q_1 > 0$ ,

$R_2$  – odległość punktu A od osi przewodu o ładunku  $q_1 < 0$  (Rys. 8).

Podstawiając do równania (29) zależności z (27), (30), (31) i (32), otrzymujemy:

$$E_A = \frac{Ua}{R_1 R_2 \ln(a/r)}. \quad (33)$$

Gęstość ładunków  $\sigma_p$  na powierzchni styku cząsteczki z izolacją przewodu można określić z różnicy wektorów  $\mathbf{P}_2$  polaryzacji w cząstce pyłu i  $\mathbf{P}_1$  w izolacji [35]:

$$\sigma_p = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 = \varepsilon_0 (\mathbf{E}_A - \mathbf{E}_{2*}) \quad (34)$$

gdzie:  $\varepsilon_0$  – stała dielektryczna powietrza, F/m;

Wiadomo, że strumień wektora indukcji nie zmienia się przy przechodzeniu z jednego dielektryka w drugi, dlatego:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_1 \mathbf{E}_A = \varepsilon_2 \mathbf{E}_{2*}. \quad (35)$$

gdzie:  $\varepsilon_1$  – przenikalność dielektryczna izolacji przewodów, F/m;

$\varepsilon_2$  – przenikalność dielektryczna cząsteczki pyłu, F/m.

Z równania (35) otrzymujemy

$$\mathbf{E}_{2*} = \mathbf{E}_A \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (36)$$

Wtedy wyrażenie (34) przyjmie postać:

$$\sigma_p = \varepsilon_0 \left( E_A - E_A \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) E_A \quad (37)$$

Pod działaniem pola zewnętrznego cząstki pyłu polaryzują się. Na przeciwne położonych stronach cząstki pojawiają się swobodne i elastycznie związane ładunki przeciwnych znaków. Dla  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ , układ ładunków przedstawiono na Rys. 9 [47].

Indukowane ładunki:

$$\pm q = \pm \sigma_p S \quad (38)$$

gdzie:  $S$  – powierzchnia cząstki pyłu na której gromadzą się ładunki

$$S \approx 2\pi r_s^2,$$

$r_s$  – promień krzywizny cząstki pyłu (Rys. 9).

Wyrażenie (38) przyjmie postać:

$$\pm q = 2\sigma_p \pi r_s^2. \quad (39)$$

Składowa natężenia pola elektrycznego w punkcie A, normalna do płaszczyzny układu elektrod:

$$E_n = E_{1*} - E_{2*} \cos \alpha \quad (40)$$

Wzajemne oddziaływanie pola elektrycznego wytworzonego przez elektrody oraz ładunków na cząsteczce pyłu wywołuje siłę pola elektrycznego przyciągającego cząstkę. Składowa normalna tej siły wywołana przez dwie elektrody [47]:

$$F_p = 2E_n q = 4\pi r_s^2 (\epsilon_0 / \epsilon_2) (\epsilon_2 - \epsilon_1) (E_{1*} - E_{2*} \cos \alpha) E_A. \quad (41)$$

Po podstawieniu do (41) zależności (27), (30), (31) i (33) otrzymujemy:

$$F_p = \frac{4\pi r_s^2 U^2 a^3 \epsilon_0 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{R_1^2 R_2 (R_1^2 + a^2) [\ln(a/r_s)]^2 \epsilon_2}. \quad (42)$$

Jak widać z zależności (42) siła  $F_p$  jest funkcją wielu parametrów, które można rozdzielić na trzy grupy.

Do pierwszej grupy należy napięcie przyłożone do układu elektrod określane warunkami technicznymi odpylania.

Do drugiej grupy wchodzi parametry konstrukcyjne układu elektrod: ich średnica i długość, przenikalność dielektryczna izolacji elektrod, odległość między elektrodami.

Do grupy trzeciej należą parametry cząstek pyłu, ich wymiary i przenikalność dielektryczna.

### 3.3.2. Uzwojenie zasilane prądem przemiennym

Układy elektrod można zasiląć również napięciem sinusoidalnym przemiennym  $u = U_m \sin \omega t$ . Wtedy natężenie pola w przestrzeni międzyelektrodowej wyniesie  $E = E_m \sin \omega t$ .

Jeśli układ elektrod zasilimy napięciem przemiennym 50 Hz:

$$u^2 = U_m^2 (1 - \cos 2\omega) / 2, \quad (43)$$

i oznaczymy:

$$k = \frac{4\pi r_s^2 a^3 \epsilon_0 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{R_1^2 R_2 (R_1^2 + a^2) [\ln(a/r_s)]^2 \epsilon_2} \quad (44)$$

to zależność (42) przyjmie postać:

$$F_p = \frac{kU_m^2}{2} - \frac{kU_m^2 \cos 2\omega t}{2}. \quad (45)$$

Z równania (45) wynika, że wypadkowa siła  $F_p$  zmienia się okresowo od zera do  $kU_m^2$  z podwójną częstotliwością napięcia zasilającego. Uwzględniając, że wartość średnia takiej funkcji  $f(t) = 1 - \cos 2\omega t = 1$ , wartość średnia siły elektrycznej wyniesie:

$$F_{p, \text{sr}} = \frac{kU_m^2}{2} = kU^2, \quad (46)$$

gdzie  $U$  i  $U_m$  - wartość skuteczna i maksymalna napięcia sinusoidalnego, V.

Jak widać średnia wartość sił działających na cząstkę nie zmieni się, jeśli prąd stały zastąpimy prądem sinusoidalnym o wartości skutecznej równej wartości napięciu prądu stałego. Dlatego celowym wydaje się zasilanie elektrod urządzeń filtrujących z uzwojeniami bifilarnymi napięciem przemiennym o częstotliwości przemysłowej, bowiem wysokie napięcie przemiennie jest łatwiej wytwarzać niż wysokie napięcie stałe.

### 3.3.3. Wpływ wybranych czynników na wielkość siły działającej na cząstkę w polu elektrycznym uzwojenia bifilarnego

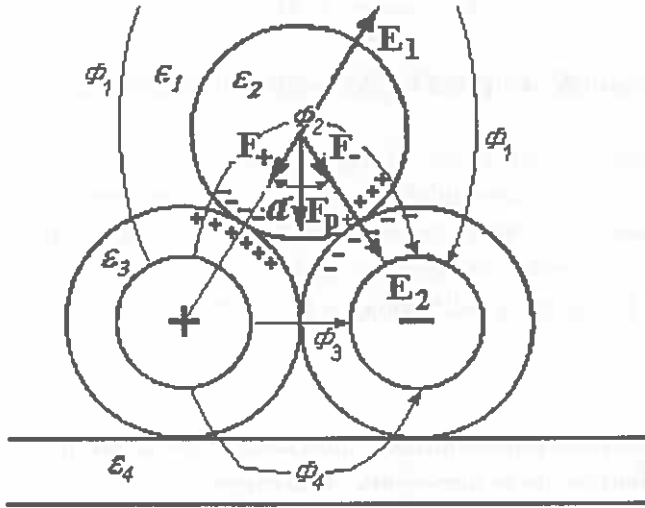
Strumień  $\Phi$  wektora indukcji elektrycznej (Rys. 9) można podzielić na oddzielne strumienie:  $\Phi_1$  – przenikający przestrzeń powietrzną wokół uzwojenia,  $\Phi_2$  – przenikający przez cząstkę dielektryka,  $\Phi_3$  - zamykający się w samym uzwojeniu,  $\Phi_4$  – przenikający konstrukcję wsporczą uzwojenia. Całkowity strumień wektora indukcji elektrycznej jest sumą tych strumieni cząstkowych:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4. \quad (47)$$

Strumień  $\Phi_2$  wywołuje na powierzchni izolacji przewodów i cząstek indukowane ładunki elektryczne, wzajemne oddziaływanie których wywołuje siły elektryczne, dociskające cząstki pyłu do uzwojenia. Wypadkowa siła jest równa sumie sił:

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{F}_+ + \mathbf{F}_- \quad (48)$$

W przemiennym polu elektrycznym zmiany polaryzacji ładunków na powierzchniach cząstek pyłu i izolacji nadążają za zmianami pola, dlatego kierunek  $\mathbf{F}_p$  pozostaje stały. Na podstawie badań [18], stwierdzono, że strumień  $\Phi_2$  przenika tylko część cząstek stykających się z przewodami. Maksymalna gęstość ładunków elektrycznych występuje na powierzchni  $S_{ef}$  styku cząstek z przewodem uzwojenia wywoływana strumieniem  $\Phi_2$ . Jeśli przyjąć, że średnia linia strumienia w szczelinie powietrznej jest normalna do powierzchni cząstek, siła elektryczna oddziaływująca na powierzchni cząstki  $S_{ef}$  wyniesie [18]:



Rys. 9. Rozkład sił działających na cząstkę pyłu w polu uzwojenia bifilarnego [18].  
Fig. 9. Distribution of forces acting on a particle in bifilar winding field [18].

$$\mathbf{F}_{el} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{2} \int_{S_{ef}} \mathbf{E}_1^2 \mathbf{n} dS, \quad (49)$$

gdzie:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m – stała dielektryczna próżni;

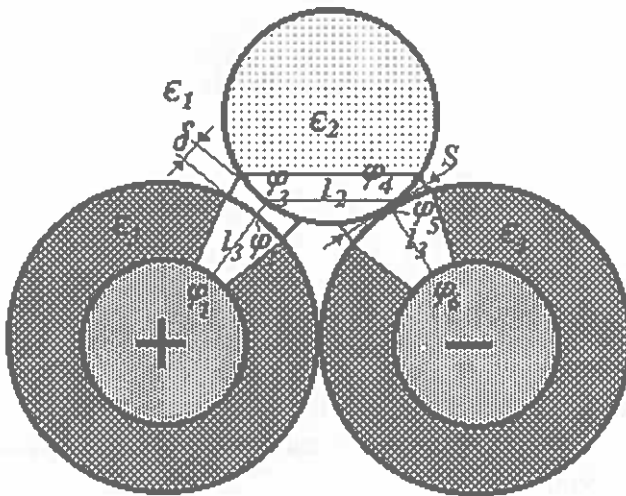
$\epsilon_1$  – względna przenikalność dielektryczna środowiska (dla powietrza  $\epsilon_1 = 1$ );

$\mathbf{E}_1$  – natężenie pola elektrycznego na elemencie powierzchni cząstki  $dS_2$ , V/m;

$\mathbf{n}$  – wektor normalny do efektywnej powierzchni cząstki,  
 $dS$  – element powierzchni styku cząstki z przewodem uzwojenia,  
 $S_{ef}$  – powierzchnia styku cząstki pyłu z przewodem uzwojenia.

Aby określić natężenie pola  $E_1$ , posługujemy się schematem zastępczym strumienia, przenikającego izolację przewodów, szczelinę powietrzną i cząstkę pyłu (Rys. 10). Znając różnicę potencjałów na powierzchniach cząstki ( $\varphi_3$  i  $\varphi_4$ ) i izolacji ( $\varphi_2$  i  $\varphi_5$ ) można znaleźć natężenie na elemencie styku powierzchni cząstek przyjmując, że szczelina powietrzna  $\delta$  jest bardzo mała i pole w niej jest jednorodne:

$$E_1 = \frac{\Delta\varphi}{\delta} \quad (50)$$



Rys. 10. Przebieg drogi strumienia  $\Phi_2$  przez elektrody oraz cząstkę pyłu. [18]

Fig. 10. Flux  $\Phi_2$  path through electrodes and a particle [18].

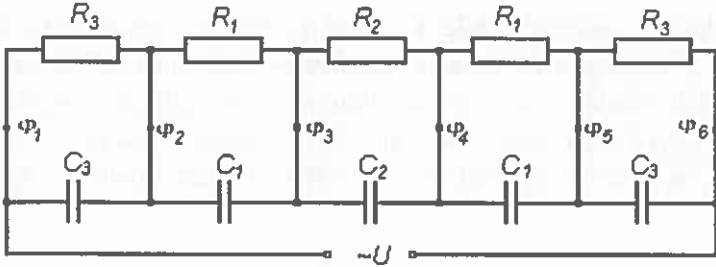
Jeśli układ jest symetryczny:

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_2 = \varphi_5 - \varphi_4. \quad (51)$$

Ze schematu zastępczego (Rys. 11) określamy:

$$\Delta\varphi = U(2y_1/y_3 + 2 + y_1/y_2)^{-1} \quad (52)$$

gdzie:  $U$  – napięcie występujące na uzwojeniu bifilarnym,  
 $y_1, y_2$  i  $y_3$  – przewodności strumienia w szczelinie powietrznej, cząstkach  
 pyłu i w izolacji przewodów,  $S$ ,



Rys. 11. Schemat zastępczy dla strumienia wypadkowego [18].

Fig. 11. Substitute diagram for the resulting flux [18].

$$y_1 = \frac{S_1}{\delta} \sqrt{\gamma_1^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2}; \quad (53)$$

$$y_2 = \frac{S_2}{l_2} \sqrt{\gamma_2^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2}; \quad (54)$$

$$y_3 = \frac{S_3}{l} \sqrt{\gamma_3^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_3^2}; \quad (55)$$

gdzie:  $\varepsilon_2$  i  $\varepsilon_3$  – względne przenikalności dielektryczne cząstek pyłu i izolacji;

$\gamma_1, \gamma_2$  i  $\gamma_3$  – przewodność elektryczna powietrza, cząstek pyłu i izolacji,  
 $S/m$ ;

$S_1, S_2$  i  $S_3$  – średnie powierzchnie przekroju strumienia w szczelinie po-  
 wietrznej między cząstkami pyłu i izolacji,  $m^2$  (można przyjąć,  
 że  $S_1 \approx S_2 \approx S_3 \approx S_{ef}$ );

$\omega$  – częstotliwość napięcia przyłożonego do uzwojenia,  $s^{-1}$ .

Podstawiając do równania (50) wartość  $\Delta\varphi$  z (52) z uwzględnieniem (53), (54) i  
 (55), a następnie otrzymane wyrażenie do (49), znajdziemy [18]:



$$F_p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 U^2 S_{ef} \cos \frac{\alpha}{2}}{\left( 2\delta + 2l_3 \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2}{\gamma_3^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_3^2}} + l_2 \sqrt{\frac{\gamma_1^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2}{\gamma_2^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2}} \right)^2}, \quad (56)$$

gdzie:  $F_p$  – siła przyciągania cząsteczki dielektryka, N;

$\varepsilon_0$  – stała dielektryczna;

$\varepsilon_1$  – względna przenikalność dielektryczna środowiska zewnętrznego;

$\varepsilon_2$  – względna przenikalność dielektryczna przyciąganej cząsteczki pyłu;

$\varepsilon_3$  – względna przenikalność dielektryczna izolacji uzwojenia bifilarnego;

$\gamma_1$  – przewodność dielektryczna środowiska zewnętrznego;

$\gamma_2$  – przewodność dielektryczna przyciąganej cząsteczki pyłu;

$\gamma_3$  – przewodność dielektryczna izolacji uzwojenia bifilarnego;

$\delta$  – wielkość szczeliny powietrznej pomiędzy uzwojeniem a cząstka pyłu;

$l_2$  – odległość między punktami styku cząsteczki z sąsiednimi przewodami uzwojenia;

$l_3$  – grubość izolacji uzwojenia bifilarnego;

$S_{ef}$  – średni przekrój powierzchni przenikania strumienia indukcji elektrycznej przez cząstkę pyłu;

$\omega$  – pulsacja napięcia zasilającego uzwojenia bifilarnego;

$\alpha$  – kąt między siłami skierowanymi w stronę przewodnika (Rys. 9).

W warunkach rzeczywistych cząstki pyłu nie mają kształtu kulistego.

W omawianym przypadku przewodności  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  są pomijalnie małe, ponieważ dotyczą dielektryków. Pomijając dodatkowo w zależności (56) szczelinę  $\delta$  oraz przyjmując  $\varepsilon_1=1$ , otrzymamy

$$F_p = \frac{\varepsilon_0 U^2 S_{ef} \cos \frac{\alpha}{2}}{\left( \frac{2l_3}{\varepsilon_3} + \frac{l_2}{\varepsilon_2} \right)^2}. \quad (57)$$

Z (57) wynika, że przy zwiększeniu przenikalności dielektrycznej izolacji i cząstek pyłu siła elektryczna  $F_p$  wzrasta.

Dla wilgotnych cząstek pyłu ( $\varepsilon_2 \gg 1$ ) siła osiąga wartość maksymalną:

$$F_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_3^2 U^2}{4} \cdot \frac{S_{ef}}{l_3^2} \cos\left(\frac{a}{2}\right). \quad (58)$$

Zmniejszenie grubości izolacji  $l_3$ , jak widać z (58) zwiększa siłę  $F_p$ , jednak w tym przypadku obniża się wytrzymałość mechaniczna i elektryczna cewki.

Zwiększanie przewodności elektrycznej izolacji i cząstek pyłu powoduje wzrost siły  $F_p$ . Jednak wzrost przewodności elektrycznej izolacji prowadzi do obniżenia jej wytrzymałości elektrycznej i zwiększenia strat czynnych w uzwojeniu.

Z (56) widać, że zwiększenie szczeliny powietrznej  $\delta$  prowadzi do zmniejszenia siły elektrycznej. Przy oddalaniu cząstki od powierzchni przewodu siła  $F_p$  zmniejsza się. Największa wartość siły  $F_p$  występuje wówczas, gdy nie ma szczeliny powietrznej, czyli, gdy cząstki pyłu znajdują się na powierzchni uzwojenia bocznikując pole między zwojami.

#### 4. PARAMETRY PRACY ODPYLACZA

Podstawowymi wielkościami charakterystycznymi odpylaczy są: skuteczność działania (skuteczność odpylania)  $\eta$  oraz opór hydrauliczny  $\Delta P$ .

##### 4.1. Skuteczność odpylania

Skuteczność (sprawność) odpylania można określić za pomocą jednego z trzech równoważnych wyrażen [24]:

$$\eta = \frac{m_z}{m_w} = \frac{m_z}{m_z + m_o} = \frac{m_w - m_o}{m_w}, \quad (59)$$

gdzie:

$m_o$  - masa pyłu opuszczającego odpylacz, g;

$m_w$  - masa pyłu wprowadzonego do odpylacza, g;

$m_z$  - masa pyłu zatrzymanego w odpylaczu, g.

Operując stężeniem  $S_{gw}$  zapylenia gazu na wejściu do odpylacza i stężeniem  $S_{go}$  zapylenia gazu na wyjściu oraz ilością przepływającego gazu  $V_w$  - na wejściu i  $V_o$  - na wyjściu odpylacza, sprawność  $\eta$  można również wyrazić w następującej formie:

$$\eta = \frac{S_{gw}V_w - S_{go}V_o}{S_{gw}V_w}, \quad (60)$$

gdzie:

$V_o$  - ilość gazu wypływającego z odpylacza,  $m^3$ ;

$V_w$  - ilość gazu wprowadzanego do odpylacza,  $m^3$ ;

$S_{go}$  - stężenie gazu opuszczającego odpylacz,  $g/m^3$ ;

$S_{gw}$  - stężenie gazu na wlocie do odpylacza,  $g/m^3$ .

Przy założeniu równości przepływu gazu ( $V_w = V_o$ ) wyrażenie (60) przybiera postać:

$$\eta = 1 - \frac{S_{g\nu}}{S_{g\nu}}. \quad (61)$$

Często zamiast wartości  $\eta$  podaje się wartość współczynnika emisji  $\varepsilon$  wyrażonego wzorem:

$$\varepsilon = 1 - \eta. \quad (62)$$

Współczynnik emisji charakteryzuje zatem ilość pyłu emitowanego przez dane źródło zapyłające.

Posługiwanie się tym współczynnikiem jest o tyle wygodne, że często warunki odbioru lub przepisy prawne określają maksymalnie dopuszczalne stężenie zapylenia gazu opuszczającego dane urządzenie przemysłowe.

Skuteczność działania odpylacza nie jest stała dla danego urządzenia, lecz zmienia się w zależności od warunków jego pracy i może się wahać od 0 do 100%.

Skuteczność działania uzależniona jest od takich parametrów jak [14]:

- średnica ziarna pyłu  $d_p$ ,  $\mu\text{m}$ ;
- natężenie przepływu gazu  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- stężenie zapylenia gazu wprowadzanego do odpylacza  $S_{g\nu}$ ,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;
- właściwości elektryczne (szczególnie rezystywność  $\rho_p$ ,  $\Omega\text{m}$ );
- temperatura gazu  $T_g$ , K ( $^{\circ}\text{C}$ );
- względna wilgotność gazu  $w_g$ , %;
- ciśnienie gazu  $P_g$ ,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;
- skład chemiczny gazu;
- nierównomierność przepływu gazu przez odpylacz;
- okres pracy odpylacza  $\tau$ , h.

Stąd porównywanie sprawności różnych urządzeń odpylających może być miarodajne tylko wtedy, gdy zostaną podane warunki, w jakich przeprowadzany był pomiar.

#### 4.2. Opór przepływu

Opór przepływu filtru (opór hydrauliczny odpylacza) [24] jest rozumiany jako strata ciśnienia przy przepływie gazu przez odpylacz. Jeżeli czynnikiem przepływającym przez filtr jest powietrze o temperaturze równej temperaturze

otoczenia, to opór hydrauliczny odpylacza jest określany jako różnica ciśnień całkowitych mierzonych bezpośrednio na wlocie i wylocie powietrza z odpylacza:

$$\Delta P = P_{cw} - P_{co}, \quad (63)$$

gdzie:

$\Delta P$  - opór hydrauliczny (strata ciśnienia) odpylacza,  $N/m^2$ ;

$P_{cw}$  - całkowite ciśnienie gazu na wlocie do odpylacza,  $N/m^2$ ;

$P_{co}$  - całkowite ciśnienie gazu na wylocie z odpylacza,  $N/m^2$ .

Jeżeli natomiast czynnikiem przepływającym przez odpylacz jest gaz o stałej gęstości, różnej od gęstości otaczającego powietrza, opór hydrauliczny odpylacza określa się z równania Bernoulliego jako:

$$\Delta P = \rho_x \frac{v_w^2 - v_o^2}{2} + (P_{sw} - P_{so}) - g(\rho_x - \rho_o)(Z_w - Z_o), \quad (64)$$

gdzie:

$\Delta P$  - opór hydrauliczny (strata ciśnienia) odpylacza,  $N/m^2$ ;

$\rho_x$  - gęstość gazu,  $kg/m^3$ ;

$\rho_o$  - gęstość powietrza,  $kg/m^3$ ;

$v_w$  - natężenie przepływu gazu wprowadzonego do odpylacza,  $m^3/s$ ;

$v_o$  - natężenie przepływu gazu opuszczającego odpylacz,  $m^3/s$ ;

$P_{sw}$  - ciśnienie statyczne gazu na wlocie do odpylacza,  $N/m^2$ ;

$P_{so}$  - ciśnienie statyczne gazu na wylocie z odpylacza,  $N/m^2$ ;

$g$  - przyspieszenie ziemskie,  $m/s^2$ ;

$Z_w$  - wysokość położenia przewodu wlotowego odpylacza  
względem poziomu odniesienia, m;

$Z_o$  - wysokość położenia przewodu wylotowego odpylacza  
względem poziomu odniesienia, m;

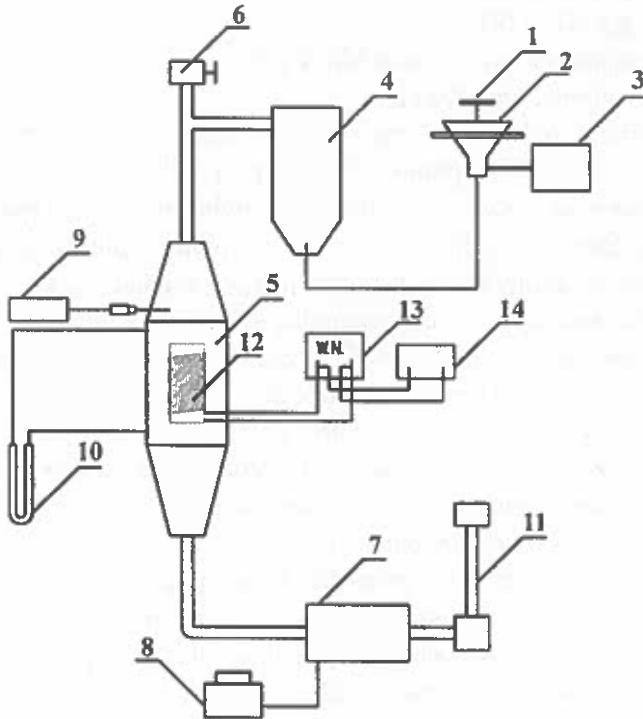
Opór hydrauliczny odpylacza w istotny sposób wpływa na jego koszty eksploatacyjne (m.in. zużycie energii elektrycznej). Jest więc bardzo często czynnikiem decydującym o wyborze urządzenia filtrującego, szczególnie w przypadku gdy szereg konstrukcji spełnia podstawowe wymagania odnośnie skuteczności działania.

Opór hydrauliczny danego odpylacza może zmieniać się od 0 do oporu uniemożliwiającego pracę odpylacza. Ten skrajny przypadek występuje przy pracy odpylaczy mechanicznych i w praktyce nie dotyczy elektrofiltrów. W przypadku odpylaczy mechanicznych, głównie tkaninowych, opór hydrauliczny filtru zmienia się wraz z tzw. obłożeniem filtru przez pył. Ten efekt nie występuje w przypadku elektrofiltrów, gdyż opór hydrauliczny jest tu uzależniony jedynie od czynników konstrukcyjnych i w praktyce ma on wartość stałą dla całego procesu odpylania. Natomiast w filtrach bifilarnych to zjawisko musi być brane pod uwagę. Wynika to z faktu, że pokrywanie przewodów warstwą pyłu zmienia warunki powstawania siły przyciągającej cząsteczki zanieczyszczenia do uzwojenia. Może również zmieniać opór hydrauliczny.

## 5. METODYKA BADANIA FILTRU BIFILARNEGO

### 5.1. Stanowisko badawcze dla filtrów cylindrycznych

Stanowisko do badania procesu odpylania pyłów organicznych z wykorzystaniem bifilarnych uzwojeń cylindrycznych przedstawiono na Rys.12.



Rys.12. Schemat stanowiska pomiarowego do badania procesów filtracji pyłów z wykorzystaniem cylindrycznego uzwojenia bifilarnego: 1 - regulator ilości pyłu, 2 - dozownik, 3 - wibrator elektromagnetyczny, 4 - mieszalnik, 5 - komora pomiarowa, 6 - zawór regulacyjny powietrza, 7 - pompa ssąca, 8 - autotransformator, 9 - anemometr, 10 - manometr różnicowy, 11 - rotametr, 12 - uzwojenie bifilarne badanego filtra, 13 - zasilacz wysokiego napięcia, 14 - woltmierz.

Fig.12. The laboratory test stand for dust filtration with a using cylindrical bifilar winding: 1 - dust quantity regulator, 2 - batcher, 3 - electromagnetic vibrator, 4 - mixer, 5 - measurement chamber, 6 - air register, 7 - suction pump, 8 - autotransformer, 9 - anemometer, 10 - differential manometer, 11 - rotametr, 12 - filter's bifilar winding, 13 - high voltage supply, 14 - voltmeter.

W układzie pomiarowym stanowiska badawczego można określić:

- wartość napięcia zasilającego uzwojenia filtra bifilarnego  $U_z$ , kV;
- prędkość filtrowanej strugi  $v$ , m/s;
- wielkość przepływu oczyszczanego strumienia  $V$ , m<sup>3</sup>;
- różnicę ciśnień w komorze pomiarowej  $\Delta P$ , Pa.

Do pomiaru wykorzystano:

- cyfrowy miernik uniwersalny, typu Metex z sondą pomiarową - pomiar napięcia do 10kV (14);
- anemometr, typ N194 (9);
- manometr różnicowy, typ Ascania MK-2 (10);
- rotometr powietrzny, typ LD (11).

Układ dozujący pył składa się z dozownika (2) przymocowanego do nieruchomego pierścienia za pomocą trzech sprężynek. Ten sposób mocowania dozownika zapewnia łatwe wysypywanie pyłu pod wpływem wibratora elektromagnetycznego (3). Ilość dozowanego pyłu regulowana jest poprzez zmianę wielkości szczeliny wylotowej przy pomocy regulatora (1).

Pył z dozownika zasysany jest do pojemnika szklanego - mieszalnika (4), gdzie następuje wymieszanie pyłu. Mieszalnik zapewnia jednolite stężenie pyłu w aerozolu zasysanym do komory pomiarowej (5). W komorze znajduje się uzwojenie bifilarne (12) badanego filtra połączone z zasilaczem wysokiego napięcia (13). Przewód doprowadzający aerozol do komory posiada w górnej części zawór (6) umożliwiający regulację strumienia zasysanego powietrza, a tym samym i stężenie pyłu w oczyszczanej strudze.

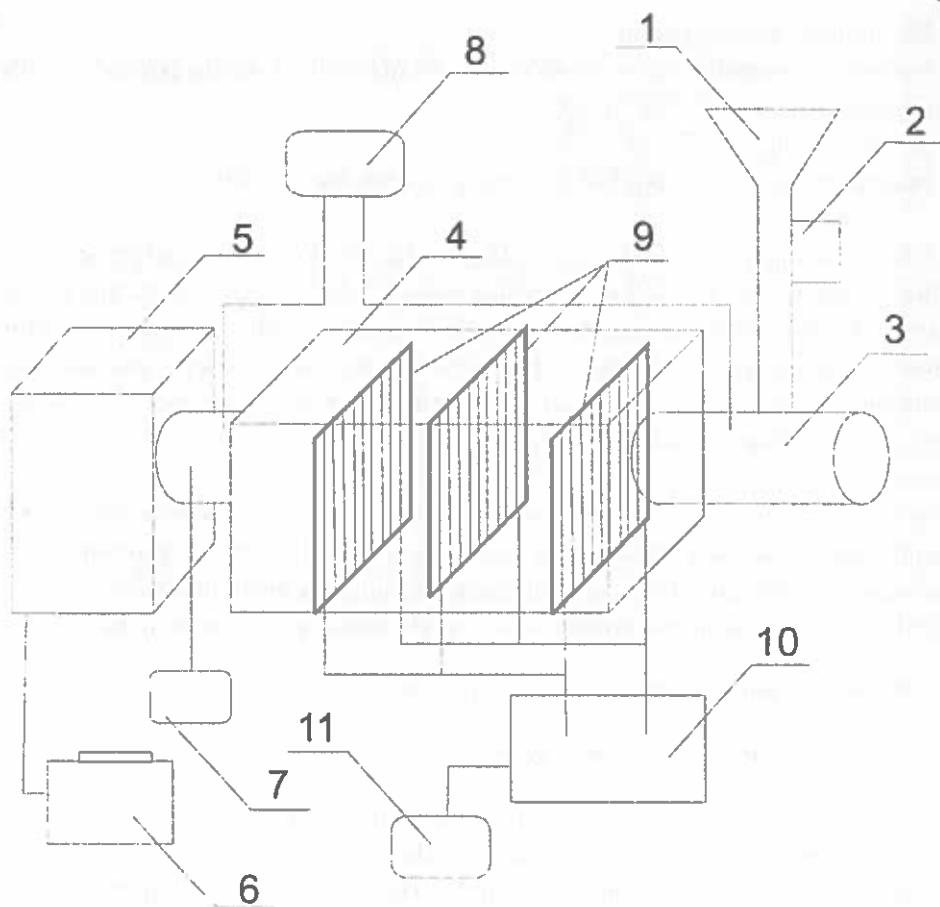
Przepływ filtrowanego aerozolu wymuszany jest poprzez urządzenie ssące (7) zasilane ze źródła prądu przemiennego. Prędkość strumienia regulowana jest poprzez zmianę napięcia zasilającego. Regulacja napięcia przeprowadzana jest przy wykorzystaniu autotransformatora (8).

## 5.2. Stanowisko badawcze dla filtrów płaskich

Stanowisko do badania procesu filtracji pyłów organicznych z wykorzystaniem płaskich uzwojeń bifilarnych przedstawiono na Rys.13.

W układzie pomiarowym stanowiska badawczego można określić wartość napięcia zasilającego  $U_z$ , prędkość filtrowanej strugi  $v$ , wielkość przepływu oczyszczanego strumienia  $V$ , różnicę ciśnień w komorze pomiarowej  $\Delta P$ .





**Rys. 13.** Schemat stanowiska pomiarowego do badania procesów filtracji pyłów z wykorzystaniem płaskiego uzwojenia bifilarnego: 1 - dozownik, 2 - wibrator elektromagnetyczny, 3 - mieszalnik, 4 - komora pomiarowa, 5 - pompa ssąca, 6 - autotransformator, 7 - anemometr, 8 - manometr różnicowy, 9 - uzwojenia bifilarne badanego filtru, 10 - zasilacz wysokiego napięcia, 11 - woltomierz.

**Fig. 13.** The laboratory test stand for dust filtration with a flat bifilar winding: 1 - batcher, 2 - electromagnetic vibrator, 3 - mixer, 4 - measurement chamber, 5 - suction pump, 6 - autotransformer, 7 - anemometer, 8 - differential manometer, 9 - filter's bifilar windings, 10 - high voltage supply, 11 - voltmeter.

Do pomiaru wykorzystano:

- miernik uniwersalny, typu V640 (prod. MeraTronik) z sondą pomiarową dla pomiaru napięcia do 10kV (11);
- anemometr, typ TESTO 425 (7);
- manometr różnicowy, typ MP 310, prod. Cole & Parmer (8).

Układ dozujący pył składa się z dozownika (1) do którego przymocowano wibrator elektryczny (2). Pył z dozownika zasysany jest do rury - mieszalnika (3), gdzie następuje wymieszanie pyłu. Mieszalnik zapewnia jednolite stężenie pyłu w aerozolu zasysanym do komory pomiarowej (4). W komorze znajduje się uzwojenie bifilarne (9) badanego filtra połączone z zasilaczem wysokiego napięcia (10). Wartość napięcia zasilającego uzwojenia bifilarne określana jest miernikiem (11).

Przepływ filtrowanego aerozolu wymuszany jest poprzez urządzenie ssące (5) o regulowanej prędkości strumienia, zasilane ze źródła prądu przemiennego. Prędkość oczyszczanej strugi mierzona jest przy pomocy anemometru (7). Różnicę ciśnień w komorze pomiarowej mierzy manometr różnicowy (8).

### 5.3. Metodyka pomiaru skuteczności odpylania

#### 5.3.1. Pomiary filtrów cylindrycznych

Wyjściowa zależność potrzebna do określenia skuteczności filtracji została opisana formułą (59). Wynika z niej, że do obliczenia skuteczności filtracji potrzebna jest znajomość masy  $m_w$  - pyłu wprowadzanego do odpylacza oraz masy  $m_o$  - pyłu opuszczającego odpylacz.

Określenia skuteczności filtracji uzwojenia bifilarnego dokonywano na podstawie pomiarów przeprowadzonych na stanowisku badawczym przedstawionym schematycznie na Rys.12.

Pomiary wstępne wykonano dla pyłu z mąki pszennej dla trzech wartości napięcia zasilającego uzwojenie bifilarne: 600V, 1500V i 3000V. Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone przy jednakowych parametrach pracy filtru:

- czas filtracji  $\tau = 180s$ ;
- prędkość przepływu filtrowanej strugi  $v = 0,1$  m/s;
- stężenie oczyszczanego aerozolu  $\mu = 50$  g/m<sup>3</sup>;
- uzwojenia bifilarne wykonano z przewodu o średnicy żyły  $d_1 = 1,78$  mm i średnicy zewnętrznej  $d_2 = 3,4$  mm.

Masę  $m_z$  pyłu wprowadzanego do odpylacza określano przy wykorzystaniu wagi i wsypywano do dozownika. Pył przemieszczany przez komorę pomiarową zatrzymywany jest na filtrze tkaninowym urządzenia ssącego. Pomiar masy pyłu na filtrze pozwala określić masę  $m_o$  pyłu opuszczającego odpylacz.

Pomiar masy pyłu wykonywano wagą typu Precisa 125A produkcji firmy Mediat (zakres pomiarowy 125g, dokładność pomiaru 0,0001g). Pomiar masy wykonywano trzykrotnie, a do obliczeń przyjęto średnią wartość arytmetyczną wyników pomiaru. Stąd procentowa sprawność filtra została określona przy wykorzystaniu formuły:

$$\eta_{\%} = \frac{m_{sw} - m_{so}}{m_{sw}} 100\%, \quad (65)$$

gdzie:

$\eta_{\%}$  - procentowa sprawność filtra, %;

$m_{sw}$  - średnia wartość masy pyłu wprowadzanego do odpylacza, g;

$m_{so}$  - średnia wartość masy pyłu opuszczającego odpylacz, g.

### 5.3.2. Pomiary filtrów płaskich

Określenia skuteczności bifilarnych filtrów płaskich dokonywano na podstawie pomiarów przeprowadzonych na stanowisku badawczym przedstawionym schematycznie na Rys.13.

W trakcie badań do dozownika wprowadzano określony rodzaj pyłu. Przed uruchomieniem pompy ssącej określono parametry pomiaru: napięcie zasilające uzwojenia odpylacza  $U_z$ , napięcie zasilania wibratora  $U_w$ , prędkość przepływu filtrowanej strugi  $v$ , masę pyłu  $m_w$  wprowadzanego do odpylacza, czas pracy odpylacza  $\tau$ .

Dla ustalonych warunków przeprowadzano badania dla dwóch stanów pracy odpylacza:

1. uzwojenie bifilarne nie przyłączone do napięcia zasilającego;
2. uzwojenie bifilarne filtra przyłączone do napięcia zasilającego.

Pomiar masy pyłu wykonywano przy wykorzystaniu wagi typu Precisa 5000D-12000G produkcji firmy Mediat (zakres pomiarowy 12000g, dokładność pomiaru 0,1g). Pomiar masy wykonywano pięciokrotnie dla ustalonych warunków pracy, a do obliczeń przyjęto średnią wartość arytmetyczną wyników

pomiaru. Stąd procentowa sprawność filtru została określona przy wykorzystaniu formuły:

$$\eta_{\%} = \frac{m_{sz}}{m_{sw}} 100\%, \quad (66)$$

gdzie:

$\eta_{\%}$  - procentowa sprawność filtru, %;

$m_{sw}$  - średnia wartość masy pyłu wprowadzanego do odpylacza, g;

$m_{sz}$  - średnia wartość masy pyłu zatrzymanego w odpylaczu, g.

Kolejność czynności prowadzonych przy pomiarze skuteczności odpylania jest następująca:

1. Określenie rodzaju i parametrów pyłu wybranego do eksperymentu,
2. Odważenie określonej masy próbki pyłu -  $m_p$ ,
3. Pomiar parametrów środowiska (wilgotność -  $w_o$ , temperatura -  $t_o$ ),
4. Określenie parametrów ustawienia filtrów w odpylaczu (odległości między poszczególnymi filtrami i ich usytuowania),
5. Ważenie elementów wychwytyjących pył w odpylaczu (podłoże -  $m_{po}$ , filtr stojący 1 -  $m_{1o}$ , filtr stojący 2 -  $m_{2o}$ , filtr wiszący -  $m_{3o}$ ),
6. Ustawienie prędkości przepływu strugi przez odpylacz -  $v_p$ ,
7. Ustawienie napięcia  $U_w$  zasilacza wibratora lejka zasypowego pyłu,
8. Określenie czasu pracy odpylacza -  $\tau$ ,
9. Uruchomienie stanowiska badawczego,
10. Odczytanie różnicy ciśnień -  $\Delta p$ ,
11. Po upływie czasu zatrzymanie urządzenia ssącego,
12. Zważenie podłoża i filtrów odpylacza (podłoże -  $m_{pk}$ , filtr stojący 1 -  $m_{1k}$ , filtr stojący 2 -  $m_{2k}$ , filtr wiszący -  $m_{3k}$ )
13. Oczyszczenie filtrów odpylacza i pięciokrotny pomiar ich masy,
14. Obliczenie średniej wartości masy  $m_{sz0}$  pyłu zatrzymanego w odpylaczu bez zasilania uzwojeń:

$$m_{sz0} = \frac{\sum_{i=1}^5 (m_{pki} - m_{pui}) + \sum_{i=1}^5 (m_{1ki} - m_{1ui}) + \sum_{i=1}^5 (m_{2ki} - m_{2ui}) + \sum_{i=1}^5 (m_{3ki} - m_{3ui})}{5}, \quad (67)$$

15. Ustawienie napięcia  $U_z$  zasilającego uzwojenia filtrów bifilarnych,
16. Powtórzenie czynności p.9-11,
17. Zważenie podłoża i filtrów odpylacza (podłoże -  $m_{pku}$ , filtr stojący 1-  $m_{1ku}$ ,  
filtr stojący 2 -  $m_{2ku}$ , filtr wiszący -  $m_{3ku}$ ),
18. Oczyszczenie filtrów odpylacza i pięciokrotny pomiar ich masy,
19. Obliczenie średniej wartości masy  $m_{szu}$  pyłu zatrzymanego w odpylaczu przy zasilaniu uzwojeń:

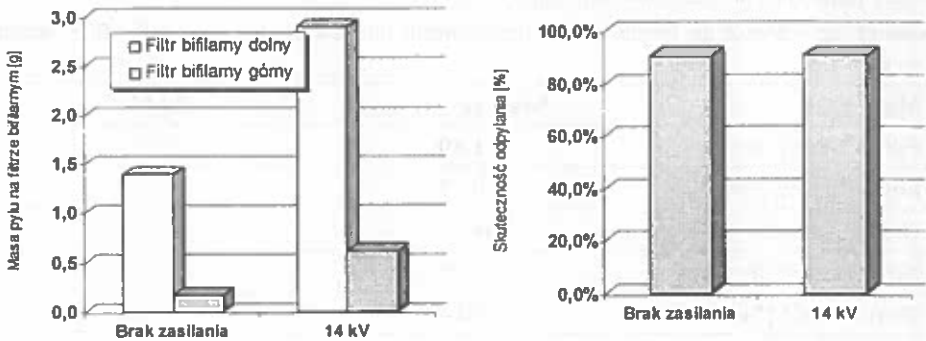
$$m_{szu} = \frac{\sum_{i=1}^5 (m_{pki} - m_{poi}) + \sum_{i=1}^5 (m_{1ki} - m_{1oi}) + \sum_{i=1}^5 (m_{2ki} - m_{2oi}) + \sum_{i=1}^5 (m_{3ki} - m_{3oi})}{5}, (68)$$

20. Określenie skuteczności filtracji odpylacza bifilarnego (zależność 66).

#### 5.4. Metodyka pomiaru oporu przepływu

Konstrukcje stanowisk wykorzystanych do badań (p.5.1 i p.5.2) powodują, że czynnikiem przepływającym przez filtr jest powietrze o temperaturze równej temperaturze otoczenia. Stąd do określenia wartości oporu hydraulicznego wykorzystano zależność (63) definiującą opór hydrauliczny jako różnicę całkowitego ciśnienia na wejściu i wyjściu odpylacza. Bezpośredni pomiar tej różnicy ciśnień, będącej miarą oporu hydraulicznego, umożliwia manometr różnicowy zastosowany w stanowiskach badawczych przedstawionych schematycznie na Rys.12 i Rys.13.

Pomiar oporu hydraulicznego wykonywano na początku i na końcu każdego doświadczenia. Ponieważ każdą próbę powtarzano pięciokrotnie, za wartość oporu hydraulicznego przyjmowano średnią wartość arytmetyczną z wyników doświadczeń.



Rys. 48. Porównanie masy pyłu i całkowitej sprawności filtra przy napięciu 14 kV.

Fig. 48. Comparison of dust mass and total filter efficiency at 14 kV.

Tabela 14. Zestawienie średnich wartości wyników pomiaru masy na poszczególnych elementach komory filtracyjnej dla wszystkich stosowanych napięć.

Table 14. Selection of the medium mass measurements on particular element in the filter chamber at all voltage values.

Masa pyłu	Brak zasilania	10 kV	12 kV	14 kV
Filtr bifilarny dolny	1,40	2,49	2,92	2,90
Filtr bifilarny górny	0,17	0,41	0,76	0,62
Na dnie komory	34,93	35,41	34,18	33,50
Na filtrze tkaninowym	3,50	1,69	2,14	2,98
Skuteczność [%]	90,8	94,8	92,8	91,0

Podstawowe wnioski, wynikające z analizy danych eksperymentalnych są następujące:

1. Uzwojenia bifilarne mogą być wykorzystane do budowy skutecznych filtrów elektrostatycznych do pyłów wybuchowych. Pracują bez wyłączeń elektrycznych.

2. W przypadku pyłów o średnicach cząstek większych niż 500  $\mu\text{m}$ , wzrost wartości napięcia nie powoduje wzrostu skuteczności odpylania.

3. W badanych przypadkach największą skuteczność odpylania otrzymano dla najniższego ze stosowanych napięć (Tab. 14).

## 9. PERSPEKTYWY WYKORZYSTANIA FILTRU BIFILARNEGO W PRZEMYSŁE ROLNO-SPOŻYWCZYM

W najbardziej uciążliwych gałęziach przemysłowych, takich jak hutnictwo, metalurgia czy energetyka, powszechnie stosowane są odpylacze elektrostatyczne nazywane elektrofiltrami [14, 15, 24, 52, 53].

W przemyśle rolno-spożywczym elektrofiltry z powodu występowania w nich zjawiska ulotu elektrycznego (wyładowanie koronowe) nie znalazły zastosowania. Zjawisko to jest niebezpieczne ze względu na wybuchowy charakter pyłów organicznych. Dlatego w zakładach, takich jak młyny, kaszarnie, paszarnie, stosowane są wyłącznie odpylacze mechaniczne - głównie filtry tkaninowe. Stosowanie filtrów tkaninowych sprawia jednak wiele problemów technicznych. Do głównych wad tych odpylaczy należą: zwiększenie mocy wentylatora w związku z oporami tkaniny, zmienne obciążenie wentylatora z powodu osadzania się pyłu na materiale, czasowe wyłączanie filtru związane z koniecznością jego oczyszczania. Te niedogodności oraz powodzenie jakie znalazły elektrofiltry w innych gałęziach przemysłu, skłaniają do poszukiwań elektrycznych metod odpylania, możliwych do zastosowania w przemyśle rolno-spożywczym.

Jedną z takich możliwości wydaje się być wykorzystanie do odpylania niejednorodnego pola elektrycznego wytwarzanego wokół uzwojenia bifilarne. Uzwojenie to zasilane jest niskim napięciem nie powodującym wyładowania koronowego. Przeprowadzona analiza oraz badania laboratoryjne wykazały, że niejednorodność pola elektrycznego uzwojeń bifilarnych jest wystarczająco duża do wychwytywania cząstek pyłów organicznych.

Ta własność uzwojeń bifilarnych została wykorzystana do konstrukcji separatorów nasion roślin [35, 45]. Skłoniła ona również do badań nad wykorzystaniem uzwojeń w urządzeniach odpylających [1, 27, 29, 30].

Sprawność oczyszczania w prototypowych urządzeniach oczyszczających dochodziła do 96%. Skuteczność ta jest porównywalna z własnościami średniej klasy tkanin filtracyjnych. Jednocześnie opory przepływu w przypadku odpylaczy z filtrami bifilarnymi są znacznie mniejsze niż w odpylaczach tkaninowych.

Sprzyja to osiągnięciu dodatkowych oszczędności energetycznych w urządzeniach ssąco-tłoczących stosowanych w tych instalacjach.

Przedstawione własności filtrów bifilarnych dają perspektywy do ich pomyślnego wykorzystania do konstrukcji nowoczesnych odpylaczy stosowanych w zakładach przemysłu rolno-spożywczego.



## 10. PIŚMIENNICTWO

1. Adamkiewicz J., Wawszczak J, Ścibisz M.: Zastosowane uzwojeń bifilarnych w urządzeniach przemysłu rolno-spożywczego. Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowa XXX Lat WTR AR Lublin, s.235-236, Lublin, 2000
2. Bach S.: Problemy diagnozowania stanu technicznego suchych elektrofiltrów płytowych. Ochrona Powietrza, 6, 1990
3. Bach S. Szwed H., Wróbel J: Wpływ sposobu połączenia belki mechanizmu strzepującego z elektrodą osadczą w elektrofiltrze na wartość przyspieszeń elektrody. Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, 3, 1996
4. Chojnowski M., Kamiński K.: Badania pyłomierza elektrycznego. Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, 11-15, 1, 1998
5. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 1994
6. Cywiński K.: Zagadnienia teoretyczne i konstrukcyjne elektrostatycznych urządzeń technologicznych. Politechnika Białostocka, Białystok, 1989
7. Dolgovych O.G., Nijazov A.M.: Razdelenie semennych smesej po vlaznosti otdel'nych zeren. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 14-15, 5, 1996
8. Graceva L.I., Merenbach Ja.F.: Elektrofiziceskije svojstva kormov i ich smesej. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 22-24, 10, 1975
9. Gramz M., Purczyński J., Sikora R.: Magnetic field of bifilar lead. Appl.Phys., 55-60, 7, 1975
10. Gramz M., Purczyński J., Sikora R.: Field of bifilar lead. Applied Physics 5, 173, 1974
11. Jakubczyk T.: Surowce i materiały pomocnicze w przetwórstwie zbożowym. PWSZ, Warszawa, 1971
12. Janka R.M, Teisseyre M.: Programowanie efektywności eksploatacji odpylaczy oraz poziomu emisji pyłu. Ekologia i technika, 5, 1995
13. Juda J.: Badanie pyłów i urządzeń odpylających. PWT, Warszawa 1959
14. Juda J.: Pomiary zapylenia i technika odpylania. WNT Warszawa 1968
15. Juda J., Nowicki M.: Urządzenia odpylające. PWN, Warszawa 1979
16. Kusińska E.: Zbadanie procesu filtracji pyłów paszowych na tkaninach elanowych. Rozprawa doktorska. AR Lublin, Lublin, 1981
17. Leonov V.S., Gorjackina V.P.: Rascet emkosti bifilarnoj obmotki dielektriceskich separatorov. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 36-37, 4, 1981
18. Leonov V.S.: Elektriceskije sily diejstvujuscije na siemena pri dielekticeskoj separaci. Mechanizacija i élektrifikacija siel'skogo chozjajstva, 32-34, 5, 1980
19. Leonov V.S.: Priznaki delimosti semjan pri elektriceskoj senaracii. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 47-48, 1, 1981

20. Leonov V.S.: Analiz pola bifiljarnoj obmotki diélektričeskich separatorov semjan. *Mechanizacija i élektifikacija siel'skogo chozjajstva*, 11, 1980
21. Leonov V.S.: Osnovy rasčeta polej diélektričeskich separatorov s bifiljarnymi obmotkami. *Trudy MIISP*, tom.15, vyp.5, 1978
22. Leonov V.S.: Rasčet élektričeskoj pročnosti bifiljarnych obmotok *Mechanizacija i élektifikacija siel'skogo chozjajstva*, 1, 1983
23. Levitov V.I.: *Dymovye elektrofiltry*. Energija, Moskva 1980
24. Lutyński J.: *Elektrostatyczne odpylanie gazów*. WNT, Warszawa 1965
25. Majka K.: *Wykorzystanie energii elektrycznej w rolnictwie*. SGGW-AR, Warszawa, 1986
26. Matusiak R.: *Teoria pola elektromagnetycznego*. WNT, Warszawa, 1982
27. Pietrzyk W., Ścibisz M.: Patent na wynalazek pt. „Filtr elektrostatyczny”, nr P-315 984
28. Pietrzyk W. i inni: Pomiar rezystancji ziarniaków zbóż poddanych działaniu pola elektrycznego. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 91-95, 1, 1996
29. Pietrzyk W. i inni: Application of flat bifilar filters in removal of organic particles in agr-food industry. *Proceedings of the II. International Conference of Young Scientists*, s.188-192, Słowacja, 2000
30. Pietrzyk W. i inni: Testowanie uzwojenia bifilarnego w procesie filtracji pyłów organicznych. Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowa XXX Lat WTR AR Lublin, s 288-289, Lublin, 2000
31. Polska Norma: PN- 86/E-04404: Metody pomiaru wytrzymałości dielektrycznej.
32. Polska Norma: PN-77/M-52010: Instalacje odpylające. Odpylacze, Badania.
33. Polska Norma: PN-84/Z-01003/01: Ochrona czystości powietrza. Klasyfikacja, Postanowienia ogólne i zakres normy.
34. Pticyн C.D., Sekanov Ju.P.,Batalin M.Ju.: Modelirovanie dielektriceskich svojstv zernovoj massy. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 47-49,
35. Smigel' V.I., Dolgovych O.G.: Povysenie proizvoditel'nosti elektrokoronnovo barabannovo separatora semjan. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 11, 7, 1997
36. Smigel' V.I., Grigor'ev V.G.: Elektroobrabotka semennyh klubnej kartofelja. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 9-11, 5, 1996
37. Smigel' V.I., Jusubalev A.: Issledovanie vlijania napraziennosti pola na vnutrennuju oblost' semen. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 45-46, 4, 1984
38. Smigel' V.I.: Opredelenie technologiceskich parametrov obrabotki semjan v elektrostaticeskom pole. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 19-20, 7, 1998
39. Smigel' V.V., Hijazov A.M.: Zernovoj sloj v elektrostaticeskom pole. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 13-14, 6, 1998
40. Smigel' V.V.: Dvizenie semjan po rescetu v elektrostaticeskom pole. *Mechanizacija i Elektrizacija Siel'skovo Chozijaistva*, 12-13, 8, 1997

41. Smigel' V.V.: Povedenie zarjazennyh ellipsoidal'nych castic v elektrostaticeskom pole. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 13-14, 5, 1996
42. Soltys A. i inni: Nowa generacja sterowników do elektrofiltrów. Ochrona Powietrza, 2, 1993
43. Tamm J.E.: Osnovy teorii elektricestva. Nauka, Moskwa, 1966
44. Taruškiń V.I., Burlakow W.G.: Dielektriceskij klassifikator semjan. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 34-36, 4, 1981
45. Taruškiń V.I.: Effektivnost' dielektriceskoj separacii semjan. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 11-13, 5, 1996
46. Taruškiń V.I., Leonov V.S.: Issledovanie diélektričeskich separatorov. Mechanizacija i élektrifikacija siel'skogo chozjajstva, 12, 1982
47. Taruškiń V.I.: Metodika rasceta pondermotornoj sily. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 34-35, 7, 1978
48. Taruškiń V.I.: Opredelenie elektriceskich sil separirujuscich ustroistv. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 31-32, 7, 1979
49. Taruškiń V.I.: Soviersenstvovanie processa separirovanija semen. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva, 36-41, 3, 1987
50. Taruškiń V.I.: Vozdejstvie pondermotornych sil na semena pi separaci. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva 35-39, 12, 1983
51. Teisseyre M.: Pyłomierze przemyslowe - pomiary i aparatura. Fundacja Ochrony Powietrza Atmosferycznego, Warszawa, 1979
52. Warych J.: Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura. WNT, Warszawa, 1998
53. Warych J.: Procesy oczyszczania gazów. Problemy projektowo-obliczeniowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999

## 11. STRESZCZENIE

W prezentowanym opracowaniu przedstawiono nową propozycję niekonwencjonalnego wykorzystania uzwojenia bifilarnego. W klasycznej elektrotechnice znajduje ono zastosowanie w metrologii. Charakteryzuje się brakiem indukcyjności.

Uzwojenie bifilarne zasilone napięciem stałym lub zmiennym wytwarza wokół siebie niejednorodne pole elektryczne. To pole wzbudza w otaczających cząstkach dielektrycznych (cząstkach pyłu organicznego) tzw. ładunki indukowane. Ostatecznym efektem tego oddziaływania są siły mechaniczne wciągające cząstki pyłu w obszar pola niejednorodnego wytworzonego przez uzwojenie.

Ta właściwość uzwojenia bifilarnego zainspirowała autorów do wykonania prototypowych bifilarnych filtrów elektrostatycznych do wychwytywania cząstek pyłów wybuchowych, pochodzenia organicznego. Tego typu pyły powstają w zakładach przemysłu młynarskiego i paszowego.

Zbudowano dwa rodzaje filtrów: filtry cylindryczne i płaskie. Poddano je badaniom laboratoryjnym mając na uwadze skuteczność odpylania i opór hydrauliczny.

W wyniku badań, uzyskano skuteczność odpylania filtrów bifilarnych porównywalną ze skutecznością filtrów tkaninowych, przy wielokrotnie mniejszym oporze hydraulicznym. Te zachęcające wyniki dają nadzieję na praktyczne zastosowanie uzwojeń bifilarnych do konstrukcji nowej generacji filtrów elektrostatycznych. Mogłyby być one stosowane do wychwytywania pyłów wybuchowych. Napięcie zasilające te filtry jest na tyle niskie, że nie wywołuje zjawiska wyładowania ulotowego, co ma miejsce w klasycznych filtrach elektrostatycznych.

Słowa kluczowe: filtry elektrostatyczne, uzwojenie bifilarne.

## 12. SUMMARY

### BIFILAR DEVICES TO DUST CONTROL IN AGRI-FOOD INDUSTRY

This publication presents new solution to unconventional use of bifilar windings. In classical electrotechnology, they are used in metrology. This use is characteristic because of no inductance.

Bifilar windings with voltage supplied from dc or ac generates heterogeneous electric field around. This field induces charges in surrounding dielectric particles (organic dust). The final effect of this influence is mechanical forces pulling particles in the heterogeneous field generated by the winding.

This property of bifilar windings inspired authors to construct prototype electrostatic bifilar filters to catch explosive dust of organic origin. This type of dusts are produced from mills and feed industry.

Two types of filters were constructed: cylindrical and flat. They were tested to check their efficiency of dust removal and hydraulic resistance.

Test results provided the efficiency of dust removal from bifilar filters comparative to the one from bag filters at significantly smaller hydraulic resistance. These promising results bring good perspectives to practical use of bifilar windings in new generation electrostatic filters. They could be used to remove explosive dusts. The voltage supplying these filters are low enough not to cause corona discharge occurring in common electrostatic precipitators.

**Key words:** electrostatic filters, bifilar windings.

## Adresy autorów:

Prof. dr hab. inż. Wiktor Pietrzyk  
Politechnika Lubelska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki Ogólnej  
Ul. Nadbystrzycka 38 A,  
20-618 Lublin  
tel / fax : + 48 81 5381 299  
e-mail: [jwipi@elektron.pol.lublin.pl](mailto:jwipi@elektron.pol.lublin.pl)

Dr inż. Andrzej Sumorek  
Politechnika Lubelska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki Ogólnej  
Ul. Nadbystrzycka 38 A,  
20-618 Lublin  
tel : + 48 81 5381 301  
e-mail: [sumek@elektron.pol.lublin.pl](mailto:sumek@elektron.pol.lublin.pl)

Prof. dr hab. Stanisław Grundas  
Instytut Agrofizyki  
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN  
Ul. Doświadczalna 4  
P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27  
tel: + 48 81 744 50 61  
e-mail:  
[grundas@demeter.ipan.lublin.pl](mailto:grundas@demeter.ipan.lublin.pl)

Dr inż. Marek Ścibisz  
Akademia Rolnicza  
Katedra Podstaw Techniki  
Ul. Doświadczalna 50 A  
20-280 Lublin  
tel: + 48 81 461 00 61  
fax: + 48 81 461 06 05  
e-mail: [scibisz@faunus.ar.lublin.pl](mailto:scibisz@faunus.ar.lublin.pl)

Dr inż. Marek Horyński  
Politechnika Lubelska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki Ogólnej  
Ul. Nadbystrzycka 38 A,  
20-618 Lublin  
tel : + 48 81 5381 300  
e-mail: [mhor@elektron.pol.lublin.pl](mailto:mhor@elektron.pol.lublin.pl)

Dr inż. Stanisław Walusiak  
Politechnika Lubelska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki Ogólnej  
Ul. Nadbystrzycka 38 A,  
20-618 Lublin  
tel: + 48 81 5381 300  
e-mail: [swal@elektron.pol.lublin.pl](mailto:swal@elektron.pol.lublin.pl)

W serii *Acta Agrophysica*  
ukazały się następujące pozycje:

- Nr 0: Marek A. Malicki: *Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrody-gleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia*, Lublin 1993.
- Nr 1: Józef Horabik: *Wpływ właściwości mechanicznych ziarna pszenicy na rozkład obciążenia w zbiorniku*, Lublin 1994.
- Nr 2: Jerzy Niewczas: *Ocena uszkodzeń mechanicznych ziarna pszenicy wykrywanych techniką rentgenograficzną*, Lublin 1994.
- Nr 3: Riccardo Paolo Bennicelli: *Wpływ zlokalizowanego stresu tlenowego w glebie na rozwój korzeni i części nadziemnych kukurydzy (modelowe badania rizotronowe)*, Lublin 1994.
- Nr 4: Marek Molenda, Józef Horabik, Marian Grochowicz, Bogusław Szot: *Tarcie ziarna pszenicy*, Lublin 1995.
- Nr 5: Wiktor Pietrzyk: *Electric field influence on grain*, Lublin 1996.
- Nr 6: Jerzy Tys: *Czynniki kształtujące właściwości agrofizyczne rzepaku*, Lublin 1997.
- Nr 7: Henryk Czachor: *Geometria fazy stałej i przestrzeni porów w rolniczych ośrodkach granulanych na przykładzie gleby mineralnej*, Lublin 1997.
- Nr 8: Andrzej L. Marciniak, Andrzej Fijołek, Jerzy Podgórski, Piotr Sieczka: *Wariacyjne metody tworzenia modeli roślinnych*, Lublin 1997.
- Nr 9: Ryszard T. Walczak, Cezary Sławiński, Henryk A. Sobczuk, Jan Gliński: *Aspekt hydrologiczny w modelu EURO-ACCESS (Agroclimatic Change and European Soil Suitability)*, Lublin 1998.
- Nr 10: Praca zbiorowa: *Profesor Bohdan Dobrzański - sesja z okazji 10-tej rocznicy śmierci*, Lublin 1998.
- Nr 11: Henryk A. Sobczuk: *Opis stanu fizycznego gleby jako ośrodka nieuporządkowanego na przykładzie krzywych retencji wody*, Lublin 1998.
- Nr 12: Marek Molenda: *Wpływ struktury złoża nasion na stan naprężenia*, Lublin 1998.

- Nr 13: Bohdan Dobrzański jr: *Mechanizmy powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych*, Lublin 1998.
- Nr 14: Jarosław Pytka, Krystyna Konstankiewicz: *Metody wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem*, Lublin 1998.
- Nr 15: Grzegorz Józefaciuk: *Zmiany własności powierzchniowych gleb i minerałów ilastych w procesach zakwaszania i alkalizacji. Badania modelowe*, Lublin 1998.
- Nr 16: Wiktor Pietrzyk, Stanisław Grundas, Marek Horyński, Andrzej Sumorek: *Wykorzystanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia ziarna zbóż*, Lublin 1998.
- Nr 17: Mieczysław Hajnos: *Energia powierzchniowa i wielkości jej składowych jako parametry określające zwilżalność i stan agregacyjny wybranych minerałów ilastych i gleb*, Lublin 1999.
- Nr 18: Bogusław Szot: *Właściwości agrofizyczne amarantusa (Amaranthus cruentus L.)*, Lublin 1999.
- Nr 19: Marek A. Malicki: *Metodyczne zagadnienia monitoringu statusu wody w wybranych materiałach biologicznych*, Lublin 1999.
- Nr 20: Jan Gliński, Krystyna Konstankiewicz: *Agrofizyka dla środowiska i bezpiecznej produkcji biologicznej*, Lublin 1999.
- Nr 21: Piotr Baranowski, Wojciech Mazurek, Ryszard T. Walczak: *Zastosowanie termografii do badania stresu wodnego roślin i ewapotranspiracji rzeczywistej*, Lublin 1999.
- Nr 22: Zbiór publikacji: *Procesy agrofizyczne: monitorowanie i modelowanie*, Lublin 1999.
- Nr 23: Zbiór publikacji: *Procesy degradacji gleb i metody ich rekultywacji*, Lublin 1999.
- Nr 24: Zbiór publikacji: *Fizyczne właściwości rolniczych ośrodków o strukturze dyskretnej*, Lublin 1999.
- Nr 25: Stefan Sz waj, Adam Pukos: *Plowing theory*, Lublin 2000.



- Nr 26: Zbiór publikacji: *Degradation of peat soils and differentiation of habitat conditions of hydrogenic areas*, Lublin 2000.
- Nr 27: Grzegorz Szwed: *Kształtowanie fizycznych i technologicznych cech nasion rzepaku w modelowanych warunkach przechowywania*, Lublin 2000.
- Nr 28: Teresa Włodarczyk: *Emisja i absorpcja N<sub>2</sub>O na tle emisji CO<sub>2</sub> w glebach brunatnych w zróżnicowanych warunkach oksydo-redukcyjnych*, Lublin 2000.
- Nr 29: Bogusław Usowicz: *Statystyczno-fizyczne modele przepływu masy i energii w ośrodku porowatym*, Lublin 2000.
- Nr 30: Barbara Witkowska-Walczak: *Wpływ struktury agregatowej gleb mineralnych na ich hydrofizyczne charakterystyki. (Badania modelowe)*, Lublin 2000.
- Nr 31: Marek Kotowski, Urszula Kotowska: *Uwalnianie i migracja glinu, cynku, miedzi i ołowiu w glebach bielicoziemnych pod wpływem zakwaszania*, Lublin 2000.
- Nr 32: Jan Gliński, Witold Stępniewski, Zofia Stępniewska, Janusz Ostrowski, Teresa Włodarczyk, Małgorzata Brzezińska: *Agro-ekologiczne aspekty warunków tlenowych gleb ornych*, Lublin 2000.
- Nr 33: Janusz Stawiński, Jan Gliński, Janusz Ostrowski, Zofia Stępniewska, Zofia Sokołowska, Grzegorz Bowanko, Grzegorz Józefaciuk, Alicja Księżopolska, Dorota Matyka-Sarzyńska: *Przestrzenna charakterystyka powierzchni właściwej gleb ornych Polski*, Lublin 2000.
- Nr 34: Zbiór publikacji: *Klimat pola uprawnego*, Lublin 2000.
- Nr 35: Zbiór publikacji: *The role of physical and physicochemical properties of soils in functioning of ecosystems*, Lublin 2000.
- Nr 36: Piotr Gliński, Ryszard Dębicki: *Ocena zagrożeń erozyjnych oraz charakterystyka jakości wód przy zastosowaniu symulacji komputerowej*, Lublin 2000.
- Nr 37: Zbiór publikacji: *Fizyczne właściwości wybranych materiałów roślinnych*, Lublin 2000.

- Nr 38: Zbiór publikacji: *Czynniki agrofizyczne środowiska warunkujące wzrost i rozwój roślin*, Lublin 2000.
- Nr 39: Dorota Wójcicka-Migasiuk: *Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do analizy i projektowania instalacji słonecznych ciepłej wody*, Lublin 2001.
- Nr 40: Marek Horyński: *Wpływ pola elektrostatycznego na właściwości elektryczne zbóż*, Lublin 2001.
- Nr 41: Andrzej Sumorek: *Wpływ pola elektrycznego na konwekcyjne suszenie ziarna zbóż*, Lublin 2001.
- Nr 42: Wiktor Pietrzyk: *Modele ziarniaków zbóż stosowane w analizie elektrodynamicznej*, Lublin 2001.

## ACTA AGROPHYSICA - Monografia

### Instrukcja dla autorów

W *Acta Agrophysica* publikowane są recenzowane opracowania z zakresu agrofizyki oparte na oryginalnych wynikach badań, monografie i rozprawy habilitacyjne.

Praca powinna być zredagowana w języku polskim w formacie B-5, w edytorze tekstu umożliwiającym wydruk w lustrzanym odbiciu. Na końcu powinny znajdować się streszczenia w języku polskim i angielskim (ok. 1 str.) wraz z tytułem pracy i słowami kluczowymi (do 5 wyrazów) oraz adresy autorów. Pracę należy składać w 3 egzemplarzach na papierze. Streszczenie w języku angielskim wraz z adresami autorów należy dodatkowo złożyć na dyskietce (w Programie Word).

Praca może być również zredagowana w języku angielskim według powyższych zasad. Wówczas należy dołączyć także polską wersję pracy wraz ze streszczeniem i słowami kluczowymi.

1) Tekst należy zredagować w ramce o wymiarach 12,8 x 18,4 cm (szer. x wys.) czcionką Nr 11, Times New Roman CE, interlinia 14 pkt, wyrównywanie dwustronne, wcięcie akapitowe 5 znaków.

2) Strony powinny być ponumerowane w lewym (parzyste) i prawym (nieparzyste) górnym rogu, w odległości 0,5 cm od tekstu, czcionką Nr 10.

3) Tytuły rozdziałów i podrozdziałów powinny być ponumerowane cyframi arabskimi i zróżnicowane w następujący sposób:

- tytuły rozdziałów głównych: duże litery czcionka Nr 10, położenie od początku linii, odstęp nad tytułem 15 pkt, pod tytułem 10 pkt;
- tytuły podrozdziałów: z dużej litery czcionka Nr 11 wytłuszczona (bold), położenie od początku linii, odstęp (nad i pod tytułem) 10 pkt.

Nie należy dzielić wyrazów w tytułach.

4) Tytuły nad tabelami i podpisy pod rysunkami powinny być podane również w języku angielskim.

5) Tytuły i treść tabel, podpisy pod rysunkami oraz pozycje literatury zamieszczone w rozdziale PIŚMIENNICTWO należy zapisać czcionką Nr 9.

6) Tabele, rysunki i wzory powinny być ponumerowane w obrębie całej pracy według kolejności cytowania ich w tekście, nie należy stosować odrębnej numeracji w poszczególnych rozdziałach. Numery wzorów należy umieścić w nawiasach okrągłych przy prawym marginesie.

7) Nie należy stosować skrótu wyrazu "tabela" lecz pełny zapis np. "Tabela 1". W tytułach tabel należy używać czcionki bold do zapisu wyrazu "tabela", na końcu tytułu tabeli nie stawiać kropki, wyrównywanie dwustronne, np.:

**"Tabela 1. Charakterystyka badanych odmian"**

Odstęp pomiędzy tytułem tabeli i tabelą powinien wynosić 0,5 cm. Tekst w nagłówku tabeli należy wpisać z dużej litery. Jeżeli pod tabelą znajdują się objaśnienia należy zakończyć je kropką.

8) Tabele należy składać bez linii bocznych i wewnętrznych. Powinny one mieć tylko cienkie linie poziome zamykające tabelę od góry i od dołu oraz podkreślające nagłówki.

9) Należy używać skrótu wyrazu "rysunek" - "Rys. 1", w obrębie całej pracy, z wyjątkiem sytuacji, kiedy zdanie zaczyna się od słowa "rysunek", wówczas piszemy cały wyraz. W podpisach pod rysunkami należy używać czcionki bold do zapisu wyrazu "rysunek", na końcu podpisu postawić kropkę, wyrównywanie dwustronne, np.:

"Rys. 1. Zależność współczynnika od wilgotności."

Odstęp nad i pod rysunkiem powinien wynosić 0,5 cm.

10) Wzory należy zapisać czcionką taką samą jak tekst, wyrównywanie centralne. Odstęp nad i pod wzorem powinien wynosić 0,5 cm.

11) Kursywą należy wyróżnić zarówno w tekście jak i we wzorach:

- symbole wielkości fizycznych;
- jedno- i wieloliterowe skróty wyrazów w indeksach ( $t_m$ ,  $W_{konic}$ ) lub wykładnikach ( $b^2$ );
- nazwy łacińskie.

12) Prosty pismem na ogół składa się:

- cyfrowe wykładniki potęg oraz cyfrowe frakcje górne i indeksy dolne ( $2^2$ ,  $b^3$ ,  $t_2$ ,  $k_2$ );
- skróty funkcji trygonometrycznych i hiperbolicznych (cos, tg), symbole operatorów wektorowych (grad, div), znaki pierwiastka i całki oraz stałe symbole funkcyjne (d, f,  $\pi$ ,  $\Sigma$ , const, exp), symbole jednostek miary ( $\Omega$ ,  $\mu m$ ), symbole jednostek miary w indeksach dolnych ( $h_m$ ), symbole pierwiastków chemicznych (Cu,  $k_{Fe}$ ), symbole stałych fizycznych (Re - liczba Reynoldsa), oznaczenia typów maszyn i przyrządów, litery przy numerach rysunków (Rys. 15a), wszelkie nawiasy.

13) Literatura powinna być cytowana w tekście w nawiasach kwadratowych. Cytowane pozycje literatury powinny być uszeregowane alfabetycznie i ponumerowane. Tytuły publikacji powinny być w języku angielskim, francuskim lub niemieckim z zaznaczeniem oryginalnego języka publikacji - jeżeli jest inny od wymienionych - np. (in Polish), (in Russian), np.:

#### "PIŚMIENICTWO

1. Horabik J.: Load distribution in a model bin as influenced by mechanical properties of wheat grain (in Polish). Acta Agrophysica, 1, 1994.
2. Jury W.A., Roth K.: Transfer Function and Solute Movement through Soil: Theory and Applications. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 1990.
3. Ostrowski E.W.: Evaluation of sugar beet mechanical properties (in Russian). Sacharnaja Promyslennost, 1, 17-20, 1971.
4. Rampazzo N., Blum W.E.H., Strauss P., Čurlik J.: Structure assessment of two agricultural soil of Lower Austria. Int. Agrophysics, 7, 47-59, 1993.
5. Tardieu F.: Spatial arrangement of maize roots in the field. In: Plant Roots and Their Environment (Eds B.L. McMichael, H. Persson). Elsevier, Amsterdam, 506-514, 1991. "

14) Obowiązuje system jednostek SI.

15) Można załączyć wykaz oznaczeń.

16) SPIS TREŚCI powinien znajdować się na początku pracy.