

WŁADYSŁAW PASZEK, PIOTR DRYSZ, EDWARD NYCZ

Katedra Technologii i Metrologii Elektrycznej
ZWSS "Bel s" Bielsko-Biaża

KIERUNKI BADAŃ I POMIARÓW W ZAKRESIE NOWOCZESNYCH URZĄDZEŃ DO ZASILANIA ELEKTRYCZNEGO ELEKTROFILTRÓW

Streszczenie: Omówiono podstawowe własności elektrofiltrów uwzględniając specyficzne warunki pracy tych urządzeń przy odpylaniu gazu zawierającego pyły o małych i dużych rezystywnościach. Przedstawiono cel i wyniki badań w zakresie zasilania elektrofiltrów oraz opracowany w kraju tyrystorowy zespół zasilający, którego układ regulacji spełnia trzy zasadnicze funkcje: samoczynnego ustalania napięcia, ograniczenia prądu obciążenia zespołu i szybkiego wygaszania zwarć łukowych w komorze elektrofiltru.

Omówiono możliwości wykorzystania prostownika wysokiego napięcia do pomiaru napięcia wyprostowanego przyłożonego do układu elektrod komory elektrofiltru i model symulujący komorę elektrofiltru oraz przedstawiono zakresy jego praktycznego wykorzystania.

1. Podstawowe własności elektrofiltrów

Normalna praca elektrofiltru polega na wprowadzeniu strugi zapyłonego medium gazowego do prostopadłego względem strugi gazu pola elektrostatycznego o możliwie dużym natężeniu między elektrodami ulotowymi i zbiorczymi.

W polu elektrostatycznym ziarna pyłu ulegają polaryzacji elektrycznej. Przy napięciu między elektrodami przekraczającym napięcie ulotu, następuje emisja elektronów z elektrody ujemnej, które łącząc się z cząstkami gazu powodują powstanie jonów ujemnych poruszających się w polu międzyelektrodowym. Przy zderzeniach z objętnymi cząstkami gazu następuje zjawisko jonizacji oraz zachodzą zderzenia jonów ujemnych z ziarnami spolaryzowanego pyłu, powodując po zneutralizowaniu dodatniego ładunku polaryzacyjnego ujemne naładowanie ziarna. Ziarna pyłu unoszone przez strugę gazu w przestrzeni międzyelektrodowej podlegają działaniu pola elektrycznego i przemieszczają się w kierunku elektrody dodatniej, zbiorczej, gdzie po oddaniu swego ujemnego ładunku osadzają się tworząc warstwę pyłu przeznaczoną do usunięcia z komory po swobodnym, bądź wymuszonym przez strzepywanie elektrod, opadnięciu do lejów zbiorczych komory elektrofiltru.

Droga, którą przemierza ziarno pyłu jest skomplikowaną łamaną linią w wyniku zderzeń tego ziarna z sąsiednimi ziarnami, jonami itp., można jednak operować pewną uśrednioną składową prędkością migracji w kierunku

przeciwnym do pola elektrycznego. Skuteczność odpylania w takim modelu różnie, w miarę powiększania prędkości migracji, w miarę powiększania długości elektrofiltru oraz w miarę zmniejszania prędkości wlotowej gazu do elektrofiltru i zmniejszania odstępów między elektrodami. W celu uzyskania możliwie dużej prędkości migracji ziaren pyłu i odpowiednio dużej skuteczności odpylania elektrofiltru, jest celowe powiększenie napięcia zasilania komory do wartości zbliżonej do granicy wytrzymałości elektrycznej przestrzeni międzyelektrodowej. Po przekroczeniu granicy wytrzymałości następuje wyładowanie łukowe w komorze, czemu towarzyszy zanik napięcia w przestrzeni międzyelektrodowej i utrata zdolności odpylania elektrofiltru. Szereg czynników ubocznych zakłóca wyidealizowany proces odpylania (np. niejednorodność elektrycznego pola przy różnych kształtach elektrod, nierównomierność rozkładu prędkości gazu w poprzecznym przekroju komory, porywanie pyłu osadzonego na elektrodach zbiorczych z powrotem do gazu), tak, że równanie skuteczności odpylania można uważać tylko jako wstępną wytyczną przy projektowaniu. Zgromadzony na elektrodach zbiorczych pył powoduje szeregowe uwarstwienie układu elektrycznego - elektroda zbiorcza, pył, przestrzeń pyłowo-gazowa, elektroda ulotowa. Właściwości elektryczne pyłu (rezystywność i wytrzymałość na przebicie elektryczne) wpływają w sposób zasadniczy na pracę elektrofiltru, przy czym warto rozpatrzyć dwa skrajne przypadki: małą rezystywność pyłu (mniejszą od 10^5 om . cm) oraz dużą rezystywność (większą od 10^{11} om . cm). Przy małej rezystywności warstwa pyłu na elektrodach zbiorczych przejmując na siebie rolę neutralizowania ujemnych ładunków ziaren pyłu osiadających pod działaniem pola elektrycznego na elektrodę dodatnią. Prąd związany z przewodzeniem skrośnym jonów dodatnich przez warstwę pyłu wytwarza na tej warstwie stosunkowo mały spadek napięcia, w związku z czym praktycznie biorąc całe napięcie zasilania elektrofiltru działa aktywnie na strugę gazu. Duże natężenie pola elektrycznego i odpowiednio duża prędkość migracji ziaren pyłu daje w konsekwencji dużą skuteczność odpylania. Kłopoty powstają przy zbyt małej rezystywności pyłu. Występuje wtedy niepożądane zjawisko odbijania się cząstek pyłu od elektrody po rozładowaniu ładunku elektrycznego i ponowne wnikięcie pyłu do mieszaniny gazowo-pyłowej. Taki proces może powtarzać się wielokrotnie. Mimo wzrostu prądu ulotu skuteczność odpylania nie powiększa się przy powiększaniu napięcia międzyelektrodowego.

Przy dużej rezystywności przyelektrodowej warstwy pyłu jest - potrzebny odpowiednio duży spadek napięcia dla wytwarzania jonów dodatnich neutralizujących ujemnie naelektryzowane ziarna pyłu na elektrodzie zbiorczej. Spadek napięcia na zgromadzonej warstwie pyłu odejmuje się od napięcia zasilania elektrofiltru zmniejszając napięcie wywołujące pole elektryczne w przestrzeni międzyelektrodowej i jest przyczyną występowania ulotu wstecznego. Zjawisko ulotu wstecznego pociąga za sobą następujące skutki:

- zmniejszenie skuteczności odpylania w okresie tworzenia się izolującej przeelektrodowej warstwy pyłu,
- zwiększenie średniej wartości prądu ulotu,
- pojawienie się w obwodach zasilania elektrofiltru niestabilnych przebiegów prądowych i napięciowych mogących zakrócić pracę całego zespołu zasilającego.

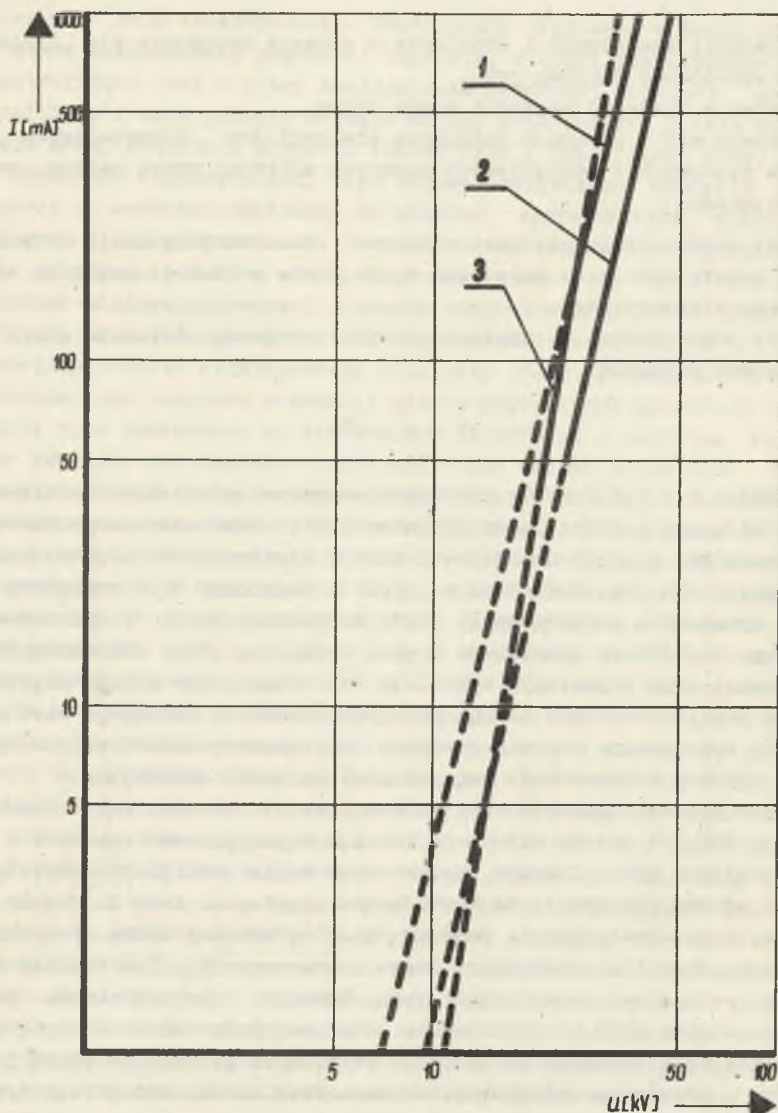
Na skutek ulotu wstecznego jest widoczne charakterystyczne ustromienie krzywej przedstawiającej zależność prądu ulotu w funkcji napięcia zasilania komory elektrofiltru.

Zależność prądu komory od napięcia powyżej progowego napięcia ulotu można aproksymować parabolą

$$I = A \cdot U^n$$

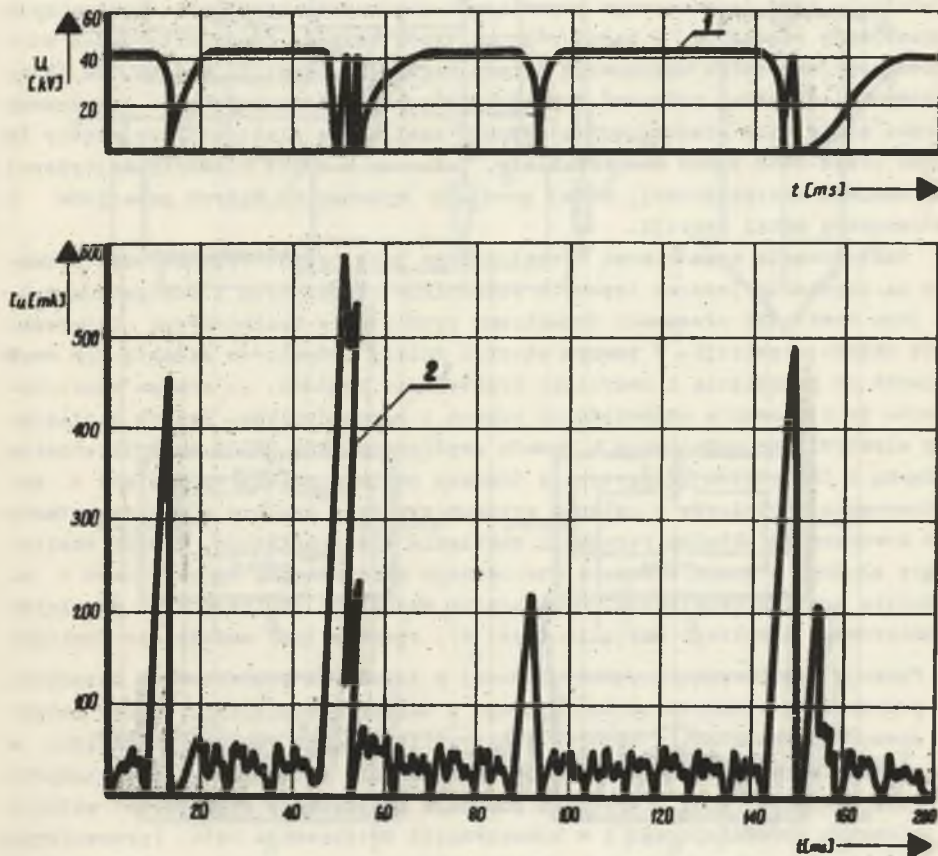
o wykładniku $n = 3,6 \div 6,0$ w warunkach normalnej pracy elektrofiltru. Wykładnik potęgowy n rośnie przy pojawieniu się ulotu wstecznego. Porównanie charakterystyki prądowo-napięciowej komory elektrofiltru zdjętej przy gazie niezapylnym (np. powietrzu $n = 4,2$) i zapylnym daje poglądową informację o zjawiskach niepożądanego ulotu wstecznego (rys. 1). Charakterystyka prądowo-napięciowa wykreślona w skal i log-log ulega charakterystycznemu załamaniu przy pojawieniu się ulotu wstecznego. Gdy spadek napięcia na warstwie przeelektrodowej osiąga napięcie przebicia następuje ulot wsteczny, czyli wyładowanie biorące początek od elektrody zbiorczej, po czym następuje ponowne przywrócenie napięcia działającego odpylająco.

Podczas gdy wytrzymałość elektryczna pyłu nie zmienia się w dużym stopniu, rezystywność zależy silnie od rodzaju węgla, procesu spalania i temperatury rośnięcia gazu. Cząstki niespalonego węgla zmniejszają rezystywność pyłu, co wpływa korzystnie na skuteczność odpylania. Jest to jednak niepożądane z powodu zmniejszenia energetycznej sprawności kotła. Podobnie nawet znikoma zawartość bezwodnika kwasu siarkowego SO_2 , jak również wilgotność gazu, zmniejsza rezystywność pyłu. Zjawisko periodycznych przebiegów cienkiej warstwy pyłu na elektrodzie zbiorczej przy wzroście napięcia międzyelektrodowego prowadzi do charakterystycznych przeskoków gasnących (rys. 2), które poprzedzają wyładowania łukowe. Przy bardzo dużej rezystywności pyłu mogą towarzyszyć przeskokom gasnącym zjawisko przepięć o dużej częstotliwości, odpowiednio do rozłożonych parametrów RLC kabla zasilającego i komory elektrofiltru. Przy dużych częstotliwościach występują zjawiska falowe w przewodach sprzężonych pojemnościowo bądź galwanicznie z elektrofiltrem. Przepięcia te są szczególnie niebezpieczne dla krzemowych stosów prostowniczych wysokiego napięcia i kabli zasilających.



Rys. 1. Charakterystyki prądowo-napięciowe komory elektrofiltru

Objaśnienia: 1 - komora wstępnego odpylania przy gazie niesapylonym (powietrze), komora odpylania końcowego, 2 - komora wstępnego odpylania przy gazie sapylonym (spaliny węgla brunatnego), 3 - komora odpylania końcowego przy gazie sapylonym (spaliny węgla brunatnego)



Rys. 2. Przebiegi czasowe prądu ulotu i napięcia wyprostowanego w obecności przeskoków gasnących

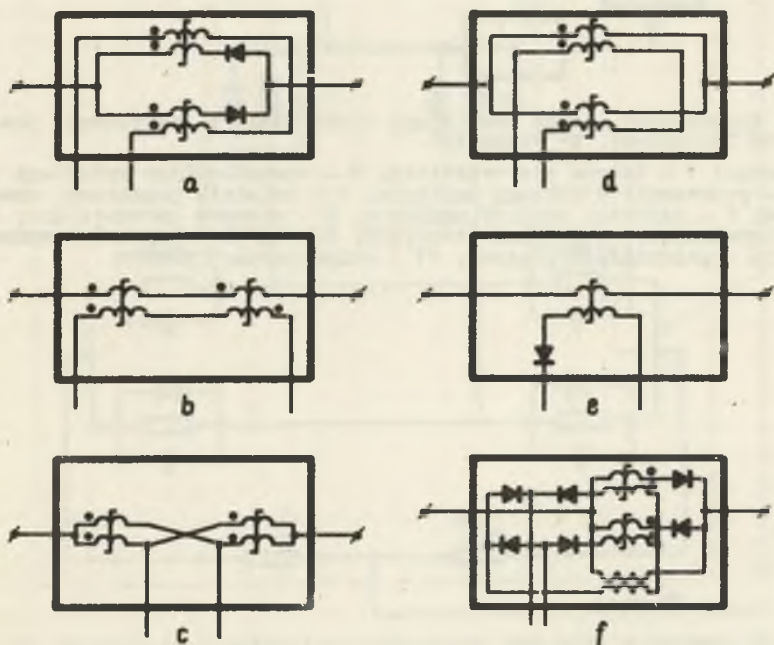
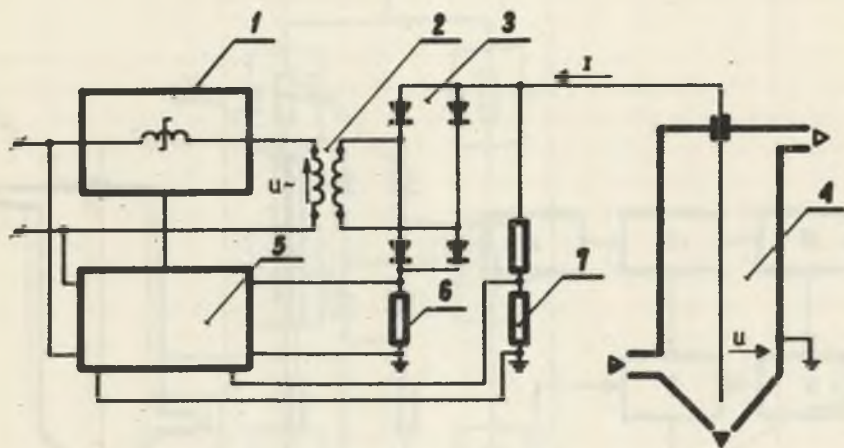
Objaśnienia: 1 - napięcie wyprostowane, 2 - prąd ulotu

2. Badania techniczne w zakresie zasilania elektrofiltrów

Istnieje powszechne dążenie do miniaturyzacji zespołów zasilających elektrofiltry, zwiększenia ich sprawności energetycznej oraz niezawodności działania przy jednoczesnym zapewnieniu w procesie odpylania optymalnych przebiegów regulacji. Z badań różnych typów układów transduktorowych stosowanych jako człon wykonawczy układu regulacji (rys. 3) wynika, że oszczędnościowy układ połączeń transduktorów bez samonasycenia stosowany przez wiele firm produkujących zespoły zasilające elektrofiltry, między innymi przez ZWSS BELOS Bielsko-Biała, jednoczy w sobie elementy najwyższej sprawności energetycznej, dużej prostoty wykonania, małych gabarytów i stosunkowo małej inercji.

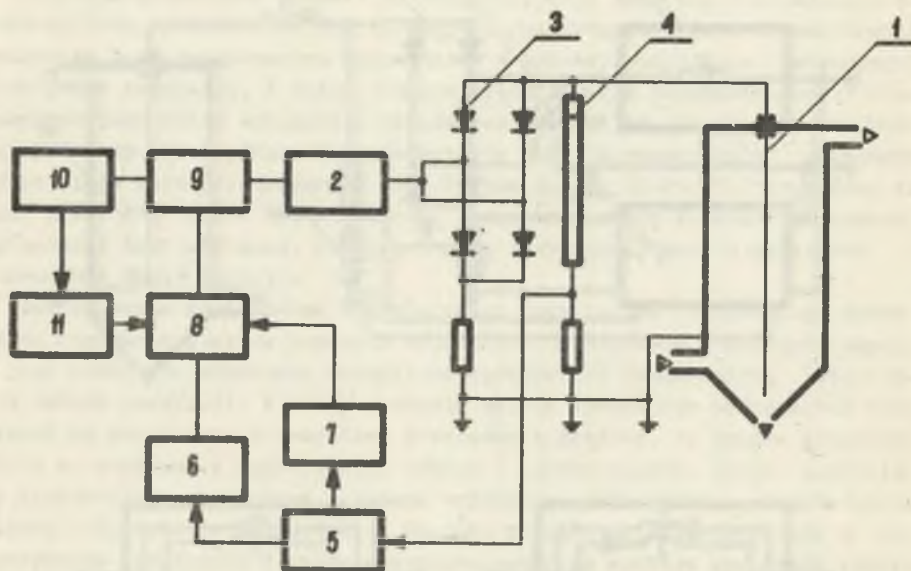
Zastosowanie wzmacniacza tyrystorowego jako członu wykonawczego pozwala na uzyskanie jeszcze lepszych wskaźników ciężarowych i energetycznych, a jego doskonałe własności dynamiczne praktycznie bezinercyjną interwencją układu regulacji. W pewnym stopniu zalety tyrystorów osłabia ich wrażliwość na przepięcia i zwarciove przetężenie prądowe, co zmusza konstruktorów do stosowania odpowiednich ochron i ograniczników. Zespół zasilający elektrofiltr opracowany w ramach współpracy ZWSS BELOS z Politechniką Śląską i Instytutem Energetyki w Gdańsku posiada zalety wynikające z zastosowania tyrystorów w członie wykonawczym oraz spełnia wymagania stawiane nowoczesnym układom regulacji zasilania elektrofiltrów. Zespół zasilający złożony z transformatora sterowanego wzmacniaczem tyrystorowym o układzie przeciwrównoległym, prostownika wysokiego napięcia oraz dzielnika pomiarowego wysokiego napięcia (rys. 4), spełnia trzy zasadnicze funkcje:

- Funkcję regulacyjną w pętli złożonej z dzielnika pomiarowego, detektora przeskoków, elementu uśredniającego i układu sterującego. Wzrost intensywności przeskoków w komorze elektrofiltru ponad wartość nastawioną w elemencie uśredniającym powoduje zmniejszenie kąta przewodzenia tyrystorów, natomiast brak przeskoków powoduje zwiększenie sygnału na wejściu elementu uśredniającego i w konsekwencji zwiększenia kąta przewodzenia tyrystorów, czemu odpowiada zwiększenie prądu i napięcia zasilania elektrofiltru.
- Funkcję ograniczającą średnią wartość prądu obciążenie zespołu, spełnia pętla złożona z przekładnika prądowego, członu pomiaru prądu i układu sterującego. Działanie tej pętli regulacyjnej utrzymuje wartość prądu obciążenia zespołu proporcjonalną do wartości sygnału wyjściowego z elementu uśredniającego, a zatem wyklucza przeciążenia zespołu w jakichkolwiek warunkach.
- Funkcję szybkiego wygaszania zwarć łukowych w elektrofiltrze spełnia pętla złożona z detektora przeskoków, elementu impulsującego i układu sterującego. Ograniczenie prądu zwarcia następuje w półokresie przebiegu prądowego bezpośrednio po zwarciu, przy czym element impulsujący generuje pojedynczy impuls o określonym czasie trwania wygaszający zapłon tyrystora.



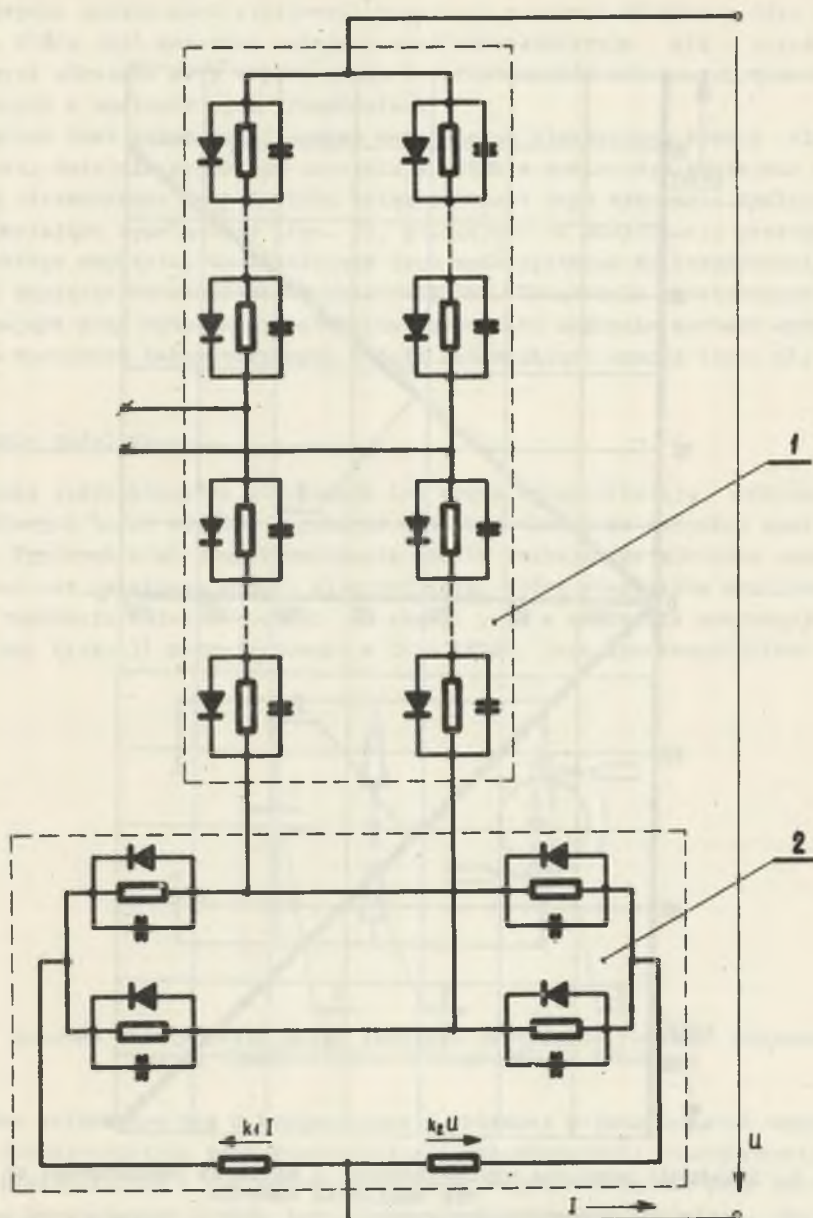
Rys. 3. Uproszczony schemat zespołu zasilającego elektrofiltry z transduktorowym członem wykonawczym

Objaśnienia: 1 - transduktorowy człon wykonawczy w układzie: amplitatu (a), szeregowym (b), oszczędnościowym (c), równoległym (d), zmodyfikowany Ramey'a (e) oraz Ramey'a (f), 2 - transformator wysokiego napięcia, 3 - prostownik wysokiego napięcia, 4 - komora elektrofiltru, 5 - układ regulacji, 6 - rezystor pomiarowy prądu uletu, 7 - dzielnik wysokiego napięcia



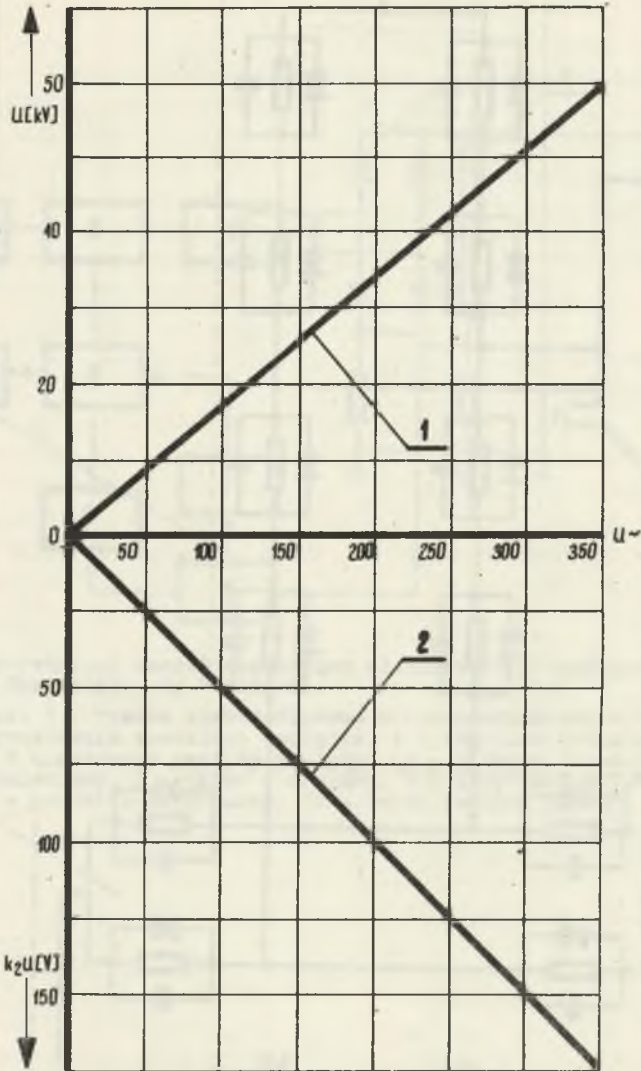
Rys. 4. Tyrystorowy zespół zasilający elektrofiltry (zgłoszenie patentowe Instytutu Energetyki, Nr P-140630).

Objaśnienia: 1 - komora elektrofiltru, 2 - transformator wysokiego napięcia, 3 - prostownik wysokiego napięcia, 4 - dzielnik pomiarowy wysokiego napięcia, 5 - detektor szczytów napięcia, 6 - element uśredniający, 7 - element impulsujący, 8 - układ sterujący, 9 - tyrystorowy człon wykonawczy, 10 - przekładnik prądowy, 11 - człon pomiaru prądu



Rys. 5. Urządzenie prostownicze wykorzystujące prąd wsteczny do pomiaru napięcia wyprostowanego (zgłoszenie patentowe PRL Nr P-140865)

Objaśnienia: 1 - prostownik wysokiego napięcia, 2 - urządzenie prostownicze do pomiaru napięcia wyprostowanego i prądu ulotu



Rys. 6. Zależność napięcia wyprostowanego i napięcia pomiarowego od napięcia zasilania zespołu

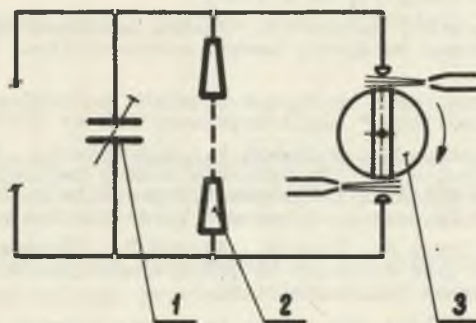
Objaśnienia: 1 - zależność napięcia wyprostowanego od napięcia zasilania zespołu, 2 - zależność napięcia pomiarowego od napięcia zasilania zespołu

W zespole zastosowano prostownik wysokiego napięcia złożony z diod krzemowych, który jest znacznie mniejszy oraz charakteryzuje się znacznie mniejszymi stratami mocy w porównaniu do prostowników selenowych uprzednio stosowanych w analogicznych urządzeniach

Pożądanym jest bezpośredni pomiar napięcia na elektrodach komory elektrofiltru. Dzielnik wysokiego napięcia w członie pomiarowym zmniejsza wypadkową niezawodność zespołu oraz zwiększa koszt jego wykonania. Znalaziono zadawalające rozwiązanie (rys. 5), polegające na modyfikacji prostownika wysokiego napięcia, umożliwiające jego wykorzystanie do bezpośredniego pomiaru napięcia na elektrodach elektrofiltru. Urządzenie prostownicze wykorzystujące prąd wsteczny prostownika do pomiaru napięcia zostało sprawdzone w warunkach laboratoryjnych i dało zadawalające wyniki (rys. 6).

3. Badania modelowe

Warunki eksploatacyjne utrudniają lub wręcz uniemożliwiają wykonanie szczegółowych badań układów regulacji bądź też elementów zespołów zasilających. Wyniknął stąd pomysł wykonania modelu imitującego zjawiska zachodzące podczas działania komory elektrofiltru, który stanowiłby symulowany obiekt regulacji umiejscowionych na stacji prób w zakładzie produkcyjnym. Model taki (rys. 7) zaprojektowano w ZWSS BELOS, jako wysokonapięciowe u-



Rys. 7. Schemat modelu imitującego zjawiska zachodzące podczas działania komory elektrofiltru (Patent PRL Nr 57674)

urządzenie składające się z kondensatora o zmiennej pojemności, stosu warstwowego o charakterystyce prądowo-napięciowej odpowiadającej charakterystyce komory elektrofiltru i iskiernika o zmiennej częstotliwości łączeń przy gaszeniu łuku powstającego między jego elektrodami podmuchem powietrza. Zastosowanie tego modelu do badań zespołów zasilających komory elektrofiltru pozwoli na przeprowadzenie całości badań technicznych tych urządzeń łącznie z ustawieniem układu regulacji w zakładzie produkującym zespoły zasilające elektrofiltry.

4. Możliwości dalszej optymalizacji zasilania elektrofiltrów

W celu dalszej optymalizacji zasilania komór elektrofiltrów prowadzone są prace zmierzające do zastosowania w zespołach ekstremalnych regulatorów mocy ulotu.

Istniejący związek zachodzący między skutecznością odpylania elektrofiltru a mocą wydzielaną w komorze osadcej można wykorzystać w czło- nie pomiarowym układu regulacji zespołu zasilającego komorę elektrofil- tru. Przy koincydencji ekstremum mocy wydzielanej w komorze elektrofiltru i skuteczności odpylania uzyskano by wtedy prosty technicznie układ bazu- jący na pomiarach wielkości elektrycznej.

LITERATURA

- [1] White H.I.: "Industrial electrostatic precipitation" Pergamon Press, Oxford-London-Paris-Frankfurt 1963.
- [2] Paszek Wł.: "Zastosowanie wzmacniaczy magnetycznych do układów regula- cji napięcia" PWN Warszawa 1967.
- [3] Simm W.: "Untersuchungen über das Rücksprühen bei der elektrischen Staubabscheidung" Chem.-Ing.Tech. 31 1955.
- [4] Drysz P., Nycz E.: "Wytyczne doboru zespołów zasilających elektrofil- try" Ochrona Powietrza Nr 4 1967.
- [5] Drysz P., Nycz E., Paszek Wł.: "Model analogowy imitujący zjawiska za- chodzące podczas działania komory elektrofiltru" Ochrona Powietrza Nr 2 1969.
- [6] Nycz E.: "Urządzenie imitujące zjawiska zachodzące podczas działania komory elektrofiltru" (Opis Patentowy PRL Nr 57674).
- [7] Drysz P., Koralun M., Hellmann W., Morawski Cz., Nycz E., Paszek Wł., Sołtys A., Wycisk W.: "Tyrystorowy zespół zasilający elektrofiltr z jednoczesnym pomiarem intensywności przeskoków iskrowych oraz prądu zasilania" (Zgłoszenie Patentowe Instytutu Energetyki).
- [8] Paszek Wł., Drysz P., Nycz E., Wycisk W.: "Urządzenie prostownicze wy- korzystujące prąd wsteczny do pomiaru napięcia wyprostowanego".(Zgło- szenie Patentowe Politechniki Śl.)

Wpłynęło do redakcji w maju 1971 r.

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ АГРЕГАТОВ
ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Р е з ю м е

Описаны главные качества электрофильтров в аспекте специфических условий работы этих устройств при очистке газов при малых и больших сопротивлениях пылей.

Представлены направления и результаты исследований электрического питания электрофильтров. Описан агрегат питания электрофильтров с кремневыми управляемыми вентилями, которого устройство для автоматического регулирования исполняет три основные функции: автоматическое установление напряжения, ограничение нагрузочного тока агрегата, быстрое гашение дуговых разрядов электрофильтра.

Представлены возможности использования высоковольтного выпрямителя для измерения напряжения на электродах электрофильтра. Описаны возможности использования модели симулирующей работу осадительного пространства электрофильтра, представлены также области практического применения этой модели.

DEVELOPMENTS OF MODERN SUPPLY DEVICES OF ELECTROSTATIC
PRECIPITATORS

S u m m a r y

There were described the fundamental properties of the electrostatic precipitator operation with precipitated dusts of small and big resistivity.

Trends and results of the development of the electrical supply have been presented. High voltage precipitator assembly with thyristor regulation unit performs three fundamental functions: selfoperations of voltage leveling, limiting of load current value, and fast extinguishing of arc discharges in the precipitator. The possibilities of using high voltage rectifier to measure DC precipitator voltage is presented, as well as a simulating device of the precipitator. Its practical use is discussed.