

Jerzy DORA¹, Ryszard KACPRZYK²,
Anna KISIEL², Paweł ŻYŁKA²

Dora System, Wilczyce (1),
Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii (2)

System zasilania głowic atomizacyjnych do wytwarzania elektro-aerozoli

Streszczenie. W pracy przedstawiono problematykę wysokonapięciowego zasilania układu do elektryzacji indukcyjnej cząstek aerozoli wytwarzanych w głowicach z naddźwiękowym rozpraszaniem pneumatycznym w dyszy de Laval. Do zasilania elektrod indukcyjnych głowic zastosowano indywidualne zasilacze wysokiego napięcia stałego małej mocy, pracujące w układzie rezonansowych przetwornic dc-dc. Zasilacze zamontowano na belce prototypowego, elektro-aerozolowego opryskiwacza agrotechnicznego bezpośrednio przy głowicach w celu ograniczenia do minimum połączeń w obwodzie WN. System zasilania wysokonapięciowego wyposażono w zdalny układ sterujący oraz opto-akustyczny sygnalizator stanu systemu wielogłowicowego. W pracy przedstawiono właściwości typowego zasilacza małej mocy oraz zwrócono uwagę na problematykę zagrożeń porażeniowych, jakie mogą wystąpić w warunkach awaryjnych. Oszacowano energię gromadzoną w układzie powielacza wysokiego napięcia, która może być rozproszona w warunkach niekontrolowanego rozładowania lub zwarcia, np. przez ciało człowieka.

Abstract. The paper discusses problems related to HV supply system for induction charging of aerosol droplets generated in supersonic pneumatic atomizing heads fitted with de Laval nozzle. Individual low power DC HV supply units, configured as resonant DC-DC converters, are applied for induction electrode charging. Supply units are installed on a drag-bar of prototype electro-aerosol agricultural spraying machine directly next to atomizing heads in order to minimize HV wiring length. The HV supply system is fitted with remote unit and opto-acoustic indicator for multi-head system state control. Operational characteristics of a standard HV low-power supply unit are presented and attention is drawn to problems related to electric shock hazards, which may arise in case of HV supply failure. Energy accumulated in HV multiplier subsystem, which may be discharged in case of any uncontrolled shorting (e.g. involving human body), is also assessed. (**Supply system for electro-aerosol atomizing heads**).

Słowa kluczowe: przetwornica rezonansowa, atomizer, dysza de Laval, energia rozładowania.

Keywords: resonant converter, atomizer, de Laval nozzle, discharge energy.

Wstęp

Klasycznym obszarem zastosowania aerozoli są systemy oprysku roślin. Nadal jednak nierozwiązanym problemem jest ochrona agrochemiczna roślin w uprawach polowych, rosnących w wysokich, zwartych łanach o gęstym ulistnieniu (m.in. kukurydza, słonecznik). W takim wypadku - nawet przy użyciu opryskiwaczy z rękawami powietrznymi - wprowadzenie strumienia aerozolu w głąb łanu jest praktycznie niemożliwe a straty środków chemicznych są olbrzymie. A w obszarze łodyg i korzeni żeruje większość agrofagów (m.in. omacnica proso-wianka *Ostrinia nubilalis*), powodujących straty plonu - w rejonach intensywnej uprawy kukurydzy dochodzą one do 30%.

W tym wypadku najbardziej obiecującym rozwiązaniem są technologie elektro-aerozolowe. Technologie oprysku wspomaganego elektrostatycznie są rozwijane od lat (prace Law'a i in. [1, 2]) i z powodzeniem są stosowane w agrotechnice m.in. do chemicznej ochrony roślin, ich zapylenia czy też zwalczania szkodników na płodach po

zbiorze. Wprowadzenie ładunku elektrycznego do kropli aerozolu, dzięki uzyskaniu elektrostatycznego oddziaływania z ładunkiem zwierciadlanym, pozwala na znaczne zwiększenie wydajności oprysku i stopnia pokrycia cieczą roboczą, zmniejszenie dawki preparatów chemicznych i zmniejszenie skażenia gleby. Szacunkowe dane (Law, 1995) sugerują, iż powszechne stosowanie elektro-statycznego opryskiwania roślin spowodowałoby tylko w USA zaoszczędzenie 3 miliardów dolarów i 200 milionów kilogramów pestycydów rocznie. Obecnie elektrostatycznie wspomagane systemy agrooprysku oferowane są przez kilka – głównie amerykańskich – firm (Spraytec, Spectrum Electrostatic Sprayers Inc., Wolfson Electrostatics).

Jednak również znane rozwiązania elektrostatyczne nie pozwalają na skuteczną ochronę chemiczną upraw wysokich. Ograniczeniem jest tutaj przede wszystkim zasięg i początkowa energia kinetyczna strugi elektro-aerozolu - musi ona posiadać dużą prędkość początkową, aby mogła zostać efektywnie wtłoczona w głąb zwartego ładu roślin. Taka struga aerozolu może być jednak wytworzona pneumatycznie przy użyciu atomizera gazodynamicznego z naddźwiękowym przepływem dwu-fazowym, wyposażonego w dyszę de Lavalą. Rozwiązanie to umożliwia uzyskanie prędkości strugi gazu kilkukrotnie przekraczającej prędkość dźwięku oraz wytworzenie – poprzez oddziaływanie fali uderzeniowej – strugi aerozolu o średnicy kropli rzędu kilku-kilkunastu μm (tzw. suchej mgły).

Wprowadzenie niezbędnej ilości ładunku elektrycznego do kropli aerozolu, generowanego przez naddźwiękowe głowice gazodynamiczne z dyszą de Lavalą, nie jest zadaniem trywialnym. Wskazują na to m.in. wyniki prac opisanych w publikacji [3]. Publikacja ta zawiera również informacje, dotyczące działania i budowy naddźwiękowych głowic atomizacyjnych z typoszeregu 11xEFEN, w których została wykorzystana technologia generacji suchych mgieł o dużej prędkości strugi, opracowana i opatentowana przez firmę Telesto sp. z o.o. W niniejszym artykule omówiono zagadnienia, związane z wysokonapięciowym systemem zasilania głowic elektro-aerozolowych EFEN110,5, przeznaczonych do zastosowania w prototypowym, elektro-aerozolowym opryskiwaczu agrotechnicznym z nad-dźwiękowym rozpraszaniem cieczy roboczej [4].

Wysokonapięciowe zasilanie głowic typu EFEN

W głowicach elektro-aerozolowych typu 110,5EFEN zastosowano elektryzację cieczy roboczej poprzez indukcję elektryczną z użyciem pierścieniowej elektrody indukcyjnej, wbudowanej w ujście gardzieli dyszy de Lavalą. Badania pokazują, iż elektroda indukcyjna głowicy wymaga zasilania prądem o wartości ok. 2-5 μA przy napięciu 2,5 kV [4, 5]. Jednak w stanach przejściowych (np. zawirowania strumienia cieczy, zwiększenie prądu upływu w wyniku zawilgocenia izolatora elektrody indukcyjnej, zwarcie w obwodzie elektrody indukcyjnej wywołane kropleniem z rurki prowadzącej ciecz po wyłączeniu zasilania pneumo-hydraulicznego) prąd ten może przekraczać wartość 100 μA . Wymienione wartości pozwalają na oszacowanie wymaganej mocy zasilania elektrycznego głowicy elektro-aerozolowej typu 110,5EFEN na poziomie 0,25 W. Ze względów bezpieczeństwa oraz w związku z docelowym montażem układu elektro-aerozolowego na przyczepnym opryskiwaczu agrotechnicznym, napędzanym z ciągnika rolniczego, system wysokonapięciowego (WN) zasilania głowic wymaga zasilania akumulatorowego napięciem w zakresie 11,5-14,4 V.

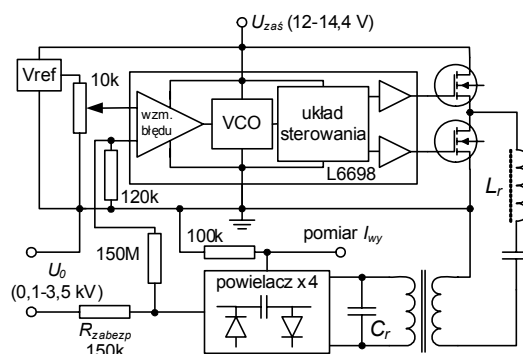
Wnioski płynące z wcześniejszych prac nad modelem elektro-aerozolowego opryskiwacza agrotechnicznego [4], wyposażonego w 4 głowice elektro-aerozolowe, 2 centralne zasilacze WN oraz sieć połączeń o długości kilkudziesięciu metrów sugerują, iż optymalnym rozwiązaniem jest wyposażenie każdej z głowic w indywidualny zasilacz wysokonapięciowy oraz montaż zasilaczy bezpośrednio przy głowicach w celu ograniczenia do minimum długości połączeń w obwodzie WN – a co za tym idzie –

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

zmniejszenie prawdopodobieństwa mechanicznego uszkodzenia tego obwodu i ograniczenie jego pojemności. System zasilania wysokonapięciowego wymaga również zdalnego pulpitu sterującego i opto-akustycznego sygnalizatora stanu zestawu wielogłowicowego, montowanego w kabinie kierowcy ciągnika.

Wysokonapięciowa, rezonansowa przetwornica dc-dc

Do zasilania elektrod indukcyjnych głowic zastosowano indywidualne, miniaturowe zasilacze wysokiego napięcia stałego małej mocy, pracujące w układzie wysokonapięcio-wych, impulsowych przetwornic dc-dc. Przetwornice tego typu zostały zaprojektowane i opracowane specjalnie na potrzeby prezentowanego projektu jako sinusoidalne układy przetwarzania energii z szeregowym obwodem rezonansowym, w którym energia pobierana jest równolegle z pojemności rezonansowej. Schemat blokowy przetwornicy pokazano na rysunku 1. Układ składa się z generatora mocy, obwodu rezonansowego, powielacza napięcia i układu sprzężenia zwrotnego. Fale napięcia prostokątnego, potrzebną do wzbudzenia obwodu rezonansowego, wytwarza półmостkowy generator mocy z tranzystorami polowymi MOSFET z kanałem n. Do kontroli i sterowania półmостka wykorzystano scalony sterownik L6698. Układ ten wybrano ze względu na zintegrowany sterownik tranzystorów wyjściowymi z pompą ładunkową, wzmacniacz błędów oraz oscylator przestrajany napięciem (VCO). Generator półmостkowy wzbudza szeregowy obwód rezonansowy, w którym indukcyjność rezonansowa L_r rezonuje z pojemnością C_r . Pojemność rezonansowa C_r jest w stanie zgromadzić wystarczającą porcję energii gdyż jej wartość jest mnożona przez kwadrat przekładni transformatora.

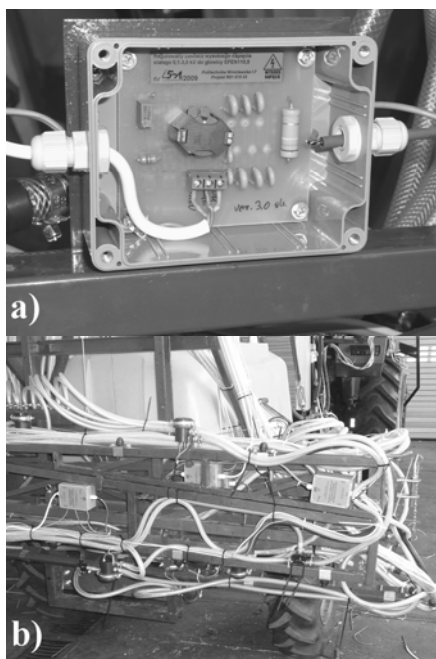


Rys. 1. Schemat blokowy wysokonapięciowej, rezonansowej przetwornicy dc-dc do zasilania głowic atomizacyjnych

Pobudzony w ten sposób obwód rezonansowy zasila czterokrotny powielacz pojemnościowo-diodowy, na wyjściu którego otrzymujemy napięcie o wartości do 3,5 kV. Otrzymane napięcie wyjściowe mierzone jest przy pomocy dzielnika rezystancyjnego 150MΩ/120kΩ a podzielona wartość napięcia podana jest na wzmacniacz błędów, który porównuje go z nastawą, określającą żądane napięcie wyjściowe U_o (2,5 kV). Wynik porównania jest następnie wzmacniany a otrzymanym sygnałem błędów sterowany jest generator VCO. Układ został zestawiony w taki sposób, że wzrost napięcia wyjściowego zmienia częstotliwość oscylatora VCO w górę, odstrajając tym samym częstotliwość pracy układu od częstotliwości rezonansowej obwodu LC. Tak działająca pętla

sprężenia zwrotnego uniezależnia napięcie wyjściowe od obciążenia jak i zmian napięcia zasilania w szerokim zakresie wartości.

Dodatkowym wyposażeniem układu są obwód kontroli prądu wyjściowego i sygnalizacji stanu przeciążenia. Pomiar prądu wyjściowego realizowany jest poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze 100k Ω , włączonym w obwód powielacza napięcia od strony masy. W celu sygnalizacji stanu przeciążenia napięcie błędne podawane jest na bazę dodatkowego tranzystora npn małej mocy (niepokazany na schemacie blokowym), pracującego w układzie OC. W obwód kolektora tego tranzystora włączona jest przez rezystor ograniczający dioda LED. Przy obciążeniu przetwornicy w nominalnym zakresie jej pracy wzmacniacz błędny wytwarza napięcie od 3 do 10V, przy przeciążeniu napięcie to spada do wartości bliskiej 0. Wystarcza to do wystereowania tranzystora, dzięki czemu dioda LED świeci przy nominalnej pracy. W warunkach przeciążenia dioda gaśnie. Konfiguracja OC pozwala na prądowe sterowanie diody LED - a co za tym idzie - umieszczenie jej nawet w dużej odległości od przetwornicy.



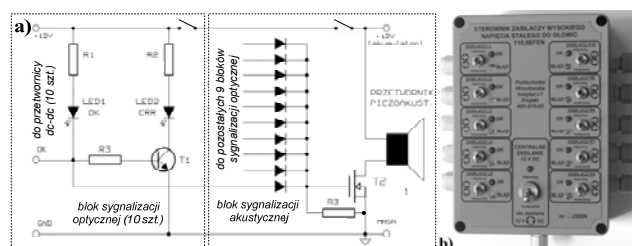
Rys. 2. Wysokonapięciowa przetwornica dc-dc: a) płytką montażową w wodoszczelnej obudowie, b) przetwornice zamontowane wraz z głowicami elektro-aerozolowymi EFEN110,5 na belce prototypowego opryskiwacza agrotechnicznego

Płytki drukowane przetwornic dc-dc z elementami elektronicznymi zostały zamontowane w wodoszczelnych obudowach z tworzywa ABS o wymiarach 9x8x5,5 cm. Pod spodem obudowy przewidziano wyprowadzenie - poprzez śrubę M3 - masy elektrycznej układu przystosowując tym samym przetwornice do pracy w układzie zasilania akumulatorowego z ujemnym biegunem na masie. Przewody zasilania 12 V, sygnalizacji pracy w zakresie nominalnym i wysokiego napięcia wyprowadzono przez przepusty wodoszczelne. Rysunek 2a ilustruje sposób montażu płytki we wnętrzu obudowy (na płytce drukowanej widoczny jest rezystor zabezpieczający 150k Ω , umieszczony w obwodzie wyjściowym WN). Docelowo przetwornice zostały

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

zainstalowane, wraz z 10 głowicami elektro-aerozolowymi 110,5EFEN, na belce prototypowego opryskiwacza agrotechnicznego jak na rysunku 2b.

Ze względu na sposób instalacji oraz konieczność indywidualnej kontroli stanu zasilaczy przez obsługę opryskiwacza system zasilania WN wyposażono w zdalny pulpit sterujący oraz opto-akustyczny sygnalizator stanu każdego z 10 obwodów WN. Schemat zdalnego układu zasilania, sterowania i sygnalizacji pracy przetwornic pokazano na rysunku 3a, natomiast rysunek 3b ilustruje widok pulpitu zamontowanego w bryzgoszczelnej obudowie w kabinie ciągnika.



Rys. 3. Zdany układu zasilania, sterowania i sygnalizacji pracy 10 przetwornic dc-dc do głowic atomizacyjnych: a) schemat ideowo-blokowy, b) widok bryzgoszczelnej obudowy sterownika.

Charakterystyki elektryczne przetwornic dc-dc

Częstotliwość pracy prezentowanych przetwornic w stanie rezonansowym leży w zakresie 23-28 kHz i zależy od napięcia wyjściowego jak i obciążenia. Przy przekroczeniu mocy znamionowej częstotliwość pracy, a co za tym idzie również napięcie wyjściowe i oddawana moc, gwałtownie spadają. Charakterystykę wyjściową przetwornicy dla nominalnego napięcia wyjściowego $U_0=2,5$ kV pokazano na rysunku 4 (przez napięcie nominalne rozumiane jest napięcie w stanie jałowym przy obciążeniu wyjścia przetwornicy tylko wysokonapięciową sondą pomiarową o rezystancji 1GΩ). Testowane przetwornice rozpoczynają pracę przy napięciu zasilania $U_{zas}>11,2V$.

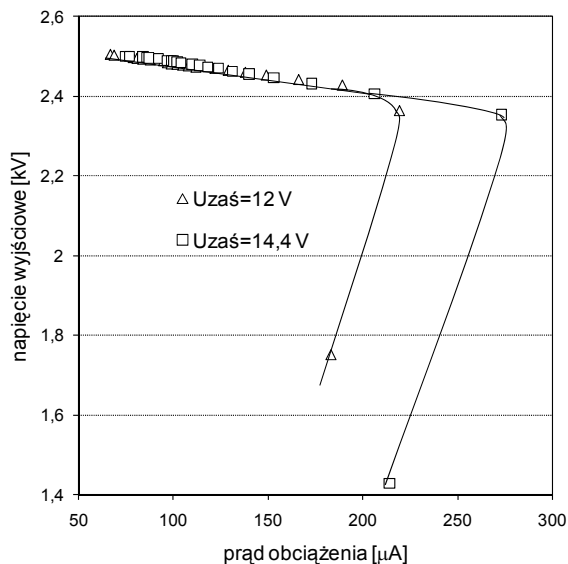
Układ sygnalizuje odcięciem tranzystora wyjściowego OC przekroczenie maksymalnego prądu wyjściowego w zakresie 530-700 μA dla U_{zas} od 11,5 do 14,4 V. Maksymalna moc oddawana przez przetwornicę zmienia się od 1,25 do 1,6 W w zakresie U_{zas} 11,5-14,5 V (przy mocy pobieranej 2,6-3,8 W). Maksymalna sprawność przetwornicy wynosi zatem ok. 45-48% i zmienia się nieznacznie z napięciem zasilania. Rezystancja wewnętrzna, oszacowana na podstawie rysunku 4, rośnie ze wzrostem U_{zas} od ok. 630 do ok. 720 kΩ.

Napięcie wyjściowe przetwornicy zawiera niewielką składową zmienną o charakterze piłokształtnym. Wielkość amplitudy przydźwięku praktycznie nie zależy od napięcia zasilania i rośnie pierwiastkowo wraz ze wzrostem napięcia oraz prądu wyjściowego (amplituda przydźwięku w stanie jałowym dla $U_0=2,5$ kV wynosi ok. 18 V czyli ok. 0,7%).

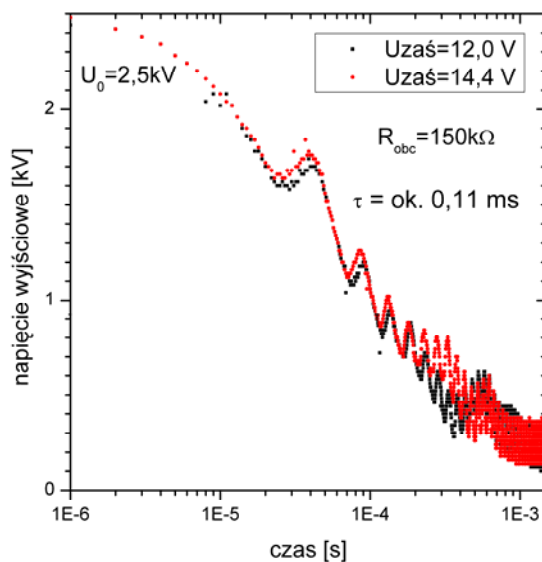
Bardzo ważnym elementem układu konstrukcyjnego przetwornicy jest wysokonapięciowy rezystor wyjściowy $R_{zabezp}=150$ kΩ, pełniący rolę zabezpieczającą w przypadku zwarcia wyjścia przetwornicy do masy. Zabezpiecza on zarówno układ elektroniczny przed uszkodzeniem jak również ogranicza energię wyzwalaną w przypadku zwarcia np. przez ciało człowieka.

Ze względu na aktywnie działający układ sprzężenia zwrotnego oraz stosunkowo skomplikowaną konfigurację obwodu wyjściowego powielacza WN

wyznaczenie zastępczej pojemności wyjściowej C_{wy} przetwornicy jest dość trudne. C_{wy} można jednak oszacować na podstawie pomiaru szybkości spadku napięcia wyjściowego po gwałtownym zwarceniu wyjścia przetwornicy WN do masy tylko przez rezystor R_{zabezp} (rys. 5).



Rys. 4. Charakterystyka wyjściowa przetwornicy rezonansowej dc-dc dla znamionowego napięcia wyjściowego 2,5 kV



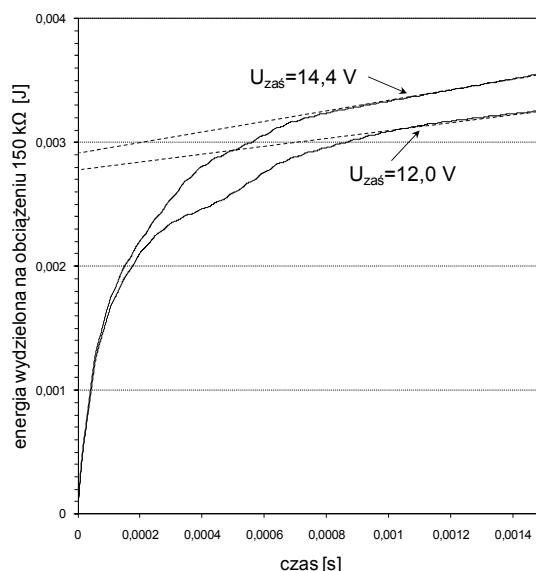
Rys. 5. Spadek napięcia wyjściowego przetwornicy dc-dc po gwałtownym zwarcieniu wyjścia do masy przez rezystor 150 kΩ

Jeżeli zaniedbamy oscylacje (wywołane przez układ sprzężenia zwrotnego oraz zabezpieczenie prądowe sterownika) to spadek napięcia na wyjściu przetwornicy ma

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

charakter pseudo-ekspotencjalny. Zakładając, iż pojemność wyjściowa w czasie zwarcia do masy nie jest praktycznie doładowywana mamy do czynienia z rozładowaniem układu RC o stałej czasu τ , którą można w przybliżeniu oszacować na podstawie rysunku 5 na 0,11 ms. Pojemność wyjściową C_{wy} można zatem określić ze wzoru: $C_{wy} = \tau / R_{obc}$, (gdzie R_{obc} to rezystancja zabezpieczająca 150 k Ω); oszacowanie to daje wartość C_{wy} rzędu 0,7 nF.

Dane pomiarowe, przedstawione na rysunku 5 pozwalają również na oszacowanie zmian w czasie energii wydzielonej na rezystorze R_{zabezp} w czasie zwarcia wyjścia przetwornicy do masy a zatem oszacowanie całkowitej energii zgromadzonej w przetwornicy. Wydzielona energia (rys. 6) początkowo w czasie 4-5 ms rośnie wykładniczo w wyniku rozładowywania pojemności wyjściowej, następnie wzrost energii przyjmuje charakter liniowy, co jest związane z ciągłym dostarczaniem energii przez układ przetwarzania dc-dc na wyjście przetwornicy, nawet w stanie jej zwarcia. Dzieje się tak dlatego, iż przetwornica nie wyłącza się przy zwarciu na wyjściu a jej napięcie wyjściowe nie spada do zera tylko gwałtownie maleje w wyniku odstrojenia układu LC od rezonansu. W stanie zwarcia moc przetwornicy gwałtownie spada poniżej 0,4-0,45 W.



Rys. 6. Energia wydzielona na rezystorze zabezpieczającym 150 k Ω w czasie zwarcia wyjścia przetwornicy do masy

Energię wydzieloną na obciążeniu odpowiadającą tylko rozładowaniu pojemności wyjściowej zasilacza można oszacować przez poprowadzenie linii stycznej do prostoliniowej części krzywej czas-energia i odczytanie współrzędnej przecięcia tej linii z osią dla $t=0$. Oszacowanie to daje wartość rzędu 2,8-2,9 mJ dla U_{zas} 12-14,4 V.

Biorąc pod uwagę typowy elektryczny model zastępczy ciała ludzkiego z rezystancją zastępczą 1 k Ω można oszacować, iż w przypadku zwarcia wyjścia przetwornicy do masy wprost przez ciało człowieka przy napięciu wyjściowym 2,5 kV na ciele ludzkim zostanie wydzielona energia rzędu 20 μ J. Jest to energia znacznie niższa

niż próg wrażliwości (odczuwania bólu) przy wyładowaniu elektrostatycznym, przyjmowany umownie jako 1 mJ.

Podsumowanie

Przedstawiony system wysokonapięciowego zasilania naddźwiękowych zestawu 10 głowic atomizacyjnych do wytwarzania elektro-aerozoli przeszedł pozytywne testy polowe w lecie 2009 r. podczas badań agrotechnicznych prototypu opryskiwacza potwierdzając w pełni słuszność założeń konstrukcyjnych jak i poprawność montażu układu. Obsługa systemu jest bardzo prosta, układ zasilania wysokonapięciowego głowic jest w pełni odporny nawet na długotrwałe zwarcie w poszczególnych obwodach WN a także na bardzo niekorzystne warunki eksploatacyjne (zawilgocenie, zabrudzenie, wibracje) jak i atmosferyczne (silne nasłonecznienie, deszcz).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy rozwojowy R01 015 03.

LITERATURA

- [1] Law S. E., Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century, *J. Electrostatics*, 51-52 (2001), 25-42
- [2] Law S. E., S. C. Cooper, Air-Assisted Electrostatic Sprays for Postharvest Control of Fruit and Vegetable Spoilage Microorganisms, *IEEE Trans. Industry Appl.*, 37 (2001), no. 6, 1597-1602
- [3] Kacprzyk R., Żyłka, Electrification of aerosol particles by an induction method using supersonic atomizing heads, *New electrical and electronic technologies and their industrial implementation, NEET 2009: 6th international conference*, Zakopane, Poland, 23-26 June 2009 /ed. by Tomasz Kołtunowicz, Lublin, Lublin University of Technology Press, (2009), 81
- [4] Kacprzyk R., Ulatowski W., Żyłka P., Projekt modelu głowicy elektro-aerozolowej do zastosowań agrotechnicznych oraz stanowiska do testów głowic agrotechnicznych, *Raporty Inst. Podst. Elektrotech. Elektrotechnol. P.Wroc.*, seria SPR (2008), nr 11
- [5] Kacprzyk R., Ulatowski W., Żyłka P., Badania funkcjonalne i optymalizacja modelu głowicy elektro-aerozolowej do zastosowań agrotechnicznych oraz opracowanie dokumentacji prototypu głowicy agrotechnicznej, *Raporty Inst. Podst. Elektrotech. Elektrotechnol. P.Wroc.*, seria SPR (2008), nr 14

Autorzy: inż. Jerzy Dora, Dora System, ul. Wilczycka 8, Wilczyce; dr hab. inż. Ryszard Kacprzyk, dr inż. Anna Kisiel, dr inż. Paweł Żyłka, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: ryszard.kacprzyk@pwr.wroc.pl, anna.kisiel@pwr.wroc.pl, pawel.zylka@pwr.wroc.pl