

## Wykorzystanie energii elektromagnetycznej w przemysłowych urządzeniach zgrzewających tworzywa sztuczne

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono sposób wykorzystania energii elektromagnetycznej w przemyśle na przykładzie urządzeń zgrzewających tworzywa sztuczne. Pokazano budowę i zasadę działania zgrzewarki wysokiej częstotliwości omawiając jej najważniejsze elementy składowe. Podjęto również tematykę pola elektromagnetycznego (PEM) w otoczeniu zgrzewarek, jako czynnika nierozdzielnie związanego z procesem zgrzewania, przedstawiając wyniki pomiarów i zasięgi stref ochronnych w otoczeniu tego typu urządzeń w kontekście obowiązujących przepisów.

**Abstract.** The work demonstrates the use of electromagnetic energy in the industry setting as an example plastic welding devices. Showed the construction and operation principles of high-frequency welders and discussed its main components. Focused on the subject of electromagnetic field (EMF) in the vicinity of welder, as an inseparable factor related with the welding process, showing measurement results and protection zone ranges in the vicinity of EMF welder. (**The use of electromagnetic energy in industrial plastic welding machines.**)

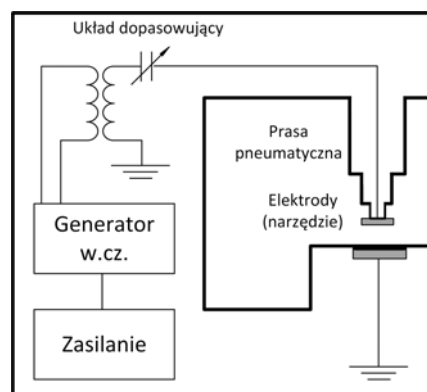
**Słowa kluczowe:** pole elektromagnetyczne, PEM, zgrzewarki w.c.z., tworzywa sztuczne

**Keywords:** electromagnetic field, EMF, HF welders, plastics

### Wstęp

Przemysłowe zastosowania energii pola elektromagnetycznego (PEM) są różnorodne, a jednym z ważniejszych zastosowań jest zamiana energii elektromagnetycznej w ciepło dla podgrzewania pośrednio lub bezpośrednio różne materiały. W takich procesach wykorzystuje się różne zakresy częstotliwości. W grzejnictwie indukcyjnym są to niskie częstotliwości – począwszy od kilkuset Hz do kilku kHz w dużych nagrzewnicach indukcyjnych, kilkunastu kHz w piecach indukcyjnych aż po ponad 100 kHz w układach lutowania indukcyjnego. PEM z zakresu mikrofal (typowo 2,4 GHz lub rzadziej 915 MHz) stosuje się przy nagrzewaniu tworzyw sztucznych, gumy i polimerów – albo w trakcie procesu polimeryzacji, suszenia czy mineralizacji. Zakres częstotliwości od kilkuset kHz do kilkudziesięciu MHz znajduje zastosowanie w nagrzewaniu dielektrycznym – gdzie wykorzystuje się zjawisko strat w dielektrykach i zamianę energii elektromagnetycznej na ciepło.

Na tej technologii swoje rozwiązania opiera firma FIAB, specjalizując się w konstrukcji różnorodnych maszyn do łączenia tworzyw sztucznych metodą zgrzewania wysoką częstotliwością. Idea działania zgrzewarki dielektrycznej polega na wytworzeniu energii elektromagnetycznej i skupieniu jej w zgrzewanym materiale. Źródłem PEM jest zwykle lampowy generator samowzбудny pracujący z częstotliwością 27,12 MHz o mocy od kilku do nawet kilkudziesięciu kW, a pole elektromagnetyczne skupia się między elektrodami roboczymi maszyny. W obszarze elektrod umieszcza się materiał zgrzewany, w którym pod wpływem polaryzacji dipolowej molekuli wprowadzane są drgania, a energia drgań zamienia się w ciepło. W ciągu kilku sekund materiał mięknie i przez docisk mechaniczny poszczególne warstwy są ze sobą trwale łączone. Podstawową zaletą tej metody jest równomierne nagrzewanie materiału w całej objętości w obszarze pod elektrodą, kiedy poza elektrodą materiał praktycznie się nie nagrzewa przy zachowaniu pełnej kontroli parametrów tego procesu. Pozwala to na uzyskanie trwałego zgrzewu bez deformacji czy zmiany parametrów materiału bezpośrednio przyległego do miejsca łączenia. Chociaż –zgrzewarki dielektryczne są powszechnie stosowane w przemyśle, na ich temat nie powstało zbyt wiele opracowań – przykłady to m.in. [1],[2] i [3], a praca niniejsza ma na celu przybliżyć aspektów związane z budową i zasadą działania zgrzewarek oraz z wytwarzaniem przez nie polem elektromagnetycznym.



Rys.1. Schemat blokowy budowy zgrzewarki wysokiej częstotliwości - podstawowe bloki funkcjonalne

### Budowa i zasada działania zgrzewarki wysokiej częstotliwości

Zgrzewarki dielektryczne (zwane inaczej pojemnościowymi lub wysokiej częstotliwości) mogą różnić się konstrukcją w zależności od zastosowania i rodzaju zgrzewanych komponentów, ale budowa ogólna oraz zasada działania pozostaje niezmienna. Zgrzewarka składa się z czterech podstawowych bloków:

- Blok zasilania
- Blok generatora wysokiej częstotliwości (w.c.z.)
- Układ dopasowujący
- Elektrody robocze

W zależności od przeznaczenia konkretnej maszyny mogą występować jeszcze systemy ekranujące, systemy przeciwłukowe oraz układy uziemiające.

Blok zasilania odfiltrowuje i przetwarza energię elektryczną zasilającą zgrzewarkę, w tym przede wszystkim - generator wysokiej częstotliwości. Są to zwykle typowe transformatorowe układy zasilające z filtrami, prostownikami półprzewodnikowymi i blokiem zabezpieczającym (bezpieczniki itp.). Zadaniem układu filtrów w bloku zasilania jest głównie ograniczenie emisji zakłóceń przewodzonych od zgrzewarki do sieci energetycznej.

Blok generatora wysokiej częstotliwości stanowi „serce” zgrzewarki i to w nim wytwarzana jest energia wysokiej częstotliwości (najczęściej 27,12 MHz), za pomocą której zgrzewane są tworzywa sztuczne. Składa się z

wzmacniacza w.cz., w którym w celu utrzymania drgań część energii elektrycznej z obwodu wyjściowego jest przekazywana do obwodu wejściowego poprzez tzw. układ sprzężenia zwrotnego. Tego typu generatory noszą nazwę samowzbudnych. Najczęściej stosuje się generatory lampowe z tzw. rezonatorem wnękowym (zwanym także pudłowym obwodem rezonansowym). Lampa stanowi element wzmacniający, natomiast rezonator wnękowy wytwarza drgania o częstotliwości odpowiadającej częstotliwości znamionowej zgrzewarki). Obwód LC rezonatora wnękowego tworzą elementy jego obudowy i przegród wewnętrznych (rys.3).

Układ dopasowujący spełnia bardzo istotne zadanie - odpowiada za to, by jak największa część energii wytwarzanej w generatorze w.cz. została przekazana do elektrod zgrzewających. Dopasowanie jest tym lepsze im mniejsze różnice są między impedancją na wyjściu generatora a impedancją elektrody. Najczęściej wykonuje się go w postaci układu LC gdzie indukcyjność sprzęga generator z obwodem szeregowo połączonych kondensatora regulowanego i elektrody zgrzewarki. Przez zmianę pojemności kondensatora dopasowuje się, zwykle automatycznie, układ do zmieniającej się w trakcie procesu zgrzewania impedancji elektrod i generatora. Zmiany impedancji powodowane są między innymi zmianami temperatury lampy i rezonatora oraz zgrzewanego materiału, itp.

Elektrody robocze, tworzące układ kondensatora wypełnionego zgrzewanym materiałem służą do przekazywania energii w.cz. bezpośrednio do tego materiału. Elektrody mogą mieć różny kształt i wielkość, w zależności od zgrzewanych elementów i zastosowania, ale zwykle elektroda „gorąca” kształtuje zgrzew, a elektroda „zimna” jest płaskim blatem połączonym z masą układu..

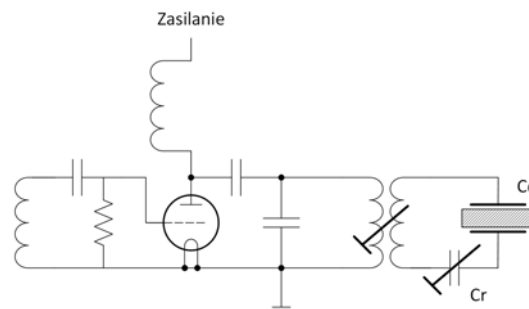
Systemy ekranujące służą do ograniczenia emisji czynnika „ubocznego” przy procesie zgrzewania – pola elektromagnetycznego. Ich zadaniem jest jak największe ograniczenie promieniowania elektromagnetycznego od elektrod i generatora w.cz. Podstawowym elementem ekranującym jest obudowa zgrzewarki, która wykonana jest z odpowiednich materiałów i zachowaniem reguł projektowania zgodnym z wymogami kompatybilności elektromagnetycznej i już w dużej mierze ona tłumii niepożądane PEM.

Systemy przeciwłukowe służą do ograniczenia efektów przepięcia, które niekiedy występuje w elementach zgrzewarki (np. gdy na wyjściu generatora pojawi się zbyt wysokie napięcie), które mogą doprowadzić do powstania łuku elektrycznego na elektrodzie powodując jej uszkodzenie i możliwość trwałego uszkodzenia zgrzewarki.. Systemy przeciwłukowe działają na zasadzie wykrywania wzrostu napięcia i krótkotrwałego wyłączenia generatora dla zgaszenia ewentualnego łuku.

Układy uziemiające spełniają ważną rolę w procesie zgrzewania odprowadzając niewykorzystaną w procesie zgrzewania energię wysokiej częstotliwości do masy układu zasilającego oraz ładunki elektrostatyczne ze zgrzewanego materiału. Elektroda uziemiająca musi ściśle przylegać całą powierzchnią do zgrzewanego materiału ułożonego na płycie stołu; jeżeli pomiędzy elektrodę uziemiającą a materiał dostanie się ciało obce uniemożliwiające prawidłowy kontakt powierzchni elektrody uziemiającej z podłożem wówczas energia wysokiej częstotliwości nie jest prawidłowo odprowadzana do uziemienia. W efekcie może wystąpić znacznie wyższy poziom emitowanego pola elektromagnetycznego, może nastąpić nawet znaczny wzrost temperatury metalowych elementów obudowy maszyny (ryzyko poparzenia!) a także ryzyko wystąpienia

wyładować elektrostatycznych w przypadku dotknięcia obudowy przez operatora.

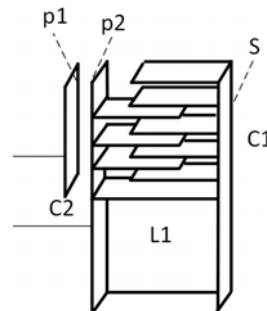
Rysunek 1 przedstawia przekrój mobilnej zgrzewarki typu FIAB900, na którym oznaczono rozmieszczenie poszczególnych elementów zgrzewarki.



Rys.2. Schemat lampowego generatora w.cz. z obciążeniem sprzężonym magnetycznie

### Generator wysokiej częstotliwości

Samowzbudny generator wysokiej częstotliwości to układ wzmacniający, w którym do wytwarzania drgań część energii elektrycznej z obwodu wyjściowego przekazywana jest do obwodu wejściowego poprzez układ dodatniego sprzężenia zwrotnego. W układach opartych o lampy mocy realizuje się to poprzez sprzężenie obwodu anodowego z siatkowym spełniające warunek fazy i amplitudy dla sprzężenia dodatniego. Zgrzewarka dielektryczna najczęściej posiada właśnie taki generator, pracujący na częstotliwości 27,12 MHz – paśmie ISM (ang. Industrial, Scientific, Medical – "przemysłowe, naukowe, medyczne"). W Polsce jest to dokładnie zakres częstotliwości 26,957 - 27,283 MHz. Konstrukcja generatora powinna zapewnić stabilność częstotliwości bazowej generatora w.cz. w powyższym zakresie. Zależy ona przede wszystkim od elementów konstrukcyjnych generatora, ponieważ jej wartość ustala się dobierając elementy tworzące obwód rezonansowy. W tego typu rozwiązaniach obciążenie generatora stanowią dwa obwody rezonansowe sprzężone magnetycznie poprzez indukcyjność wzajemną (Rys. 2). Obwód pierwotny nastrojony jest na częstotliwość 27,12 MHz a obwód wtórny, którego jednym z elementów są elektrody zgrzewające  $C_e$  a drugim kondensator dopasowujący o zmiennej pojemności  $C_r$ , dostraja się samoczynnie w czasie zgrzewania (tzw. samodopasowanie). Na skutek tego zjawiska podczas zgrzewania następuje zmiana impedancji obwodu wtórnego, ponieważ zgrzewany materiał zmienia swoją strukturę i parametry dielektryczne i w związku z tym generator w.cz. może nieznacznie odstrajać się od częstotliwości bazowej, a prąd anody zmieniać skokowo swój poziom. Powyższe zjawisko wpływa na charakter pola elektromagnetycznego w otoczeniu zgrzewarki.

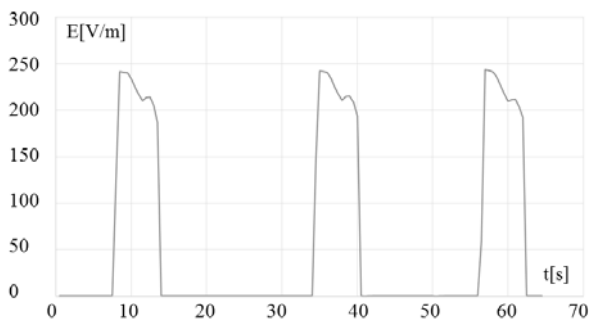


Rys.3. Schemat pudłowego obwodu rezonansowego generatora w.cz. Tworzy go indukcyjność  $L_1$  i pojemność  $C_1$ . Kondensator  $C_2$  (składający się z okładek  $p_1$  i  $p_2$ ) sprzęga anodę lampy z obwodem rezonansowym.

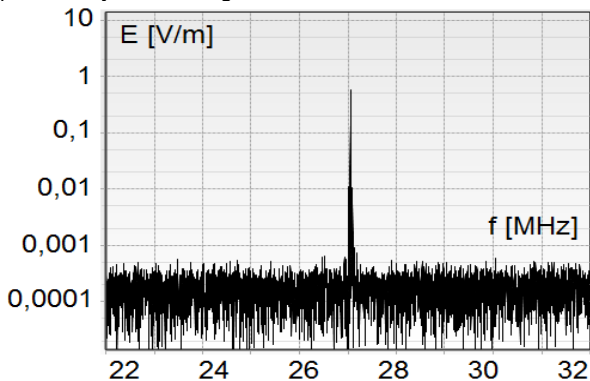
Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w generatorach lampowych są rezonansowe obwody pudłowe (Rys.3), w których indukcyjność i pojemność stanowią elementy wewnętrzne pudła, które jednocześnie jest obudową całego układu. Połączenia wykonuje się możliwie jak najkrótsze, zwykle z taśmy miedzianej. Ścianki buduje się najczęściej z aluminium, łączonego przez spawanie lub za pomocą śrub mosiężnych.

#### Pole elektromagnetyczne w otoczeniu zgrzewarki w.cz.

Zgrzewarka w.cz. nie pracująca w trybie ciągłym. Każdy zgrzew wymaga przygotowania zgrzewanego materiału i odpowiedniego ułożenia, co często jest czynnością trwającą dłużej, niż sam proces zgrzewania trwający zwykle od kilku do kilkunastu sekund. Obserwując zmiany PEM w czasie procesu zgrzewania widać charakterystyczny kształt impulsu (Rys. 4 przedstawia serię 3 zgrzewów) – zniekształcony prostokąt o zmiennej wysokości na skutek wspomnianego zjawiska zmian dopasowania obciążenia generatora a tym samym natężenie emitowanego PEM. Układy sterujące procesem zgrzewania muszą na bieżąco kontrolować te wahania i sterować dopasowaniem tak, by przeciwdziałać zmianom impedancyjnym obciążenia generatora. Tego typu zmienność nie sprawia problemów pomiarowych większości szerokopasmowych mierników PEM najczęściej stosowanych do tego typu pomiarów, ale znacznie istotniejszy jest całkowity czas zgrzewu – jeżeli jest krótszy niż 0,5s, pomiar PEM może być obciążony znacznym błędem [4].



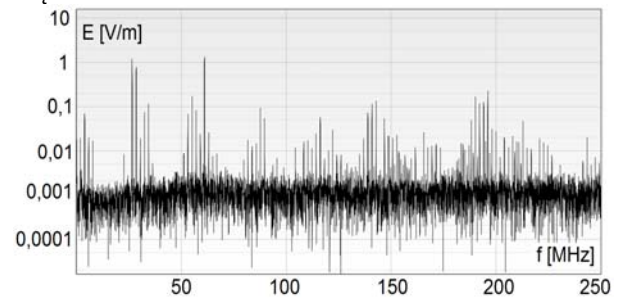
Rys.4. Pole elektromagnetyczne w otoczeniu zgrzewarki w.cz. podczas wykonania 3 zgrzewów



Rys.5. Widmo pola elektromagnetycznego w otoczeniu zgrzewarki w.cz.

Prawidłowo wykonany generator w.cz. powinien generować sygnał o widmie z pojedynczym prążkiem odpowiadającym częstotliwości bazowej (Rys.5). W rzeczywistości, podczas zmian dopasowania w układzie obciążenia generatora dochodzi do odchylenia częstotliwości bazowej generatora w.cz. Odchylenie to nie powinno przekraczać kilkudziesięciu kHz, ale możliwe są sytuacje, w których oprócz częstotliwości bazowej pojawiają

w widmie inne częstotliwości – nie tylko harmoniczne przebiegu bazowego, ale też szereg innych częstotliwości (Rys. 6). Może to być spowodowane między innymi przesterowaniem generatora czy zadziałaniem układu przeciwłukowego lub skutkiem niewidocznych gołym okiem wyładowań iskrowych.. System sterowania zgrzewarki powinien mieć odpowiednie zabezpieczenia, by nie dopuścić do takiej sytuacji. Należy tu również wspomnieć o notowanych przestrojeniach częstotliwości pracy generatora nawet o kilka-kilkanaście MHz, ale wygląda to ewidentnie na nieprawidłowe działanie układu, które musi być eliminowane choćby ze względu na zakłócanie służb radiokomunikacyjnych pracujących w otoczeniu częstotliwości 27 MHz.



Rys.6. Emisje uboczne w paśmie do 250 MHz

Praktycznie poza radiokomunikacją, wszystkie inne zastosowania energii elektromagnetycznej nie wymagają jej emisji do środowiska, a wręcz emisja taka traktowana jest jako strata energii. Niestety, zwykle ten efekt uboczny nie jest możliwy do pełnego wyeliminowania i dlatego w środowisku pracy mogą występować PEM o znacznym natężeniu, nawet o wartościach nieobojętnych dla organizmów. Powoduje to, że pracowników obejmuje się ochroną przed nadmierną ekspozycją na pola elektromagnetyczne – traktując je jako jeden z czynników szkodliwych w środowisku pracy. W Polsce dopuszczalne poziomy czynniki szkodliwych opisuje [5]. Dyrektywa [6] opracowana zgodnie z zaleceniami określonymi przez Międzynarodową Komisję Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ang. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), z którą wszystkie państwa unijne powinny zharmonizować swoje przepisy ochronne do końca czerwca 2016r., zaowocowała publikacją rozporządzenia [5], które uaktualnia graniczne wartości natężenia pola w funkcji częstotliwości (niezależnie elektrycznego i magnetycznego) w środowisku pracy. Szczegóły BHP w polach elektromagnetycznych podaje Rozporządzenie [7]. Skutkami nadmiernej ekspozycji na PEM w zależności od częstotliwości i natężenia oddziałującego pola może być między innymi pobudzenie tkanki nerwowej lub mięśniowej, efekt poparzenia przez przepływ zbyt dużego prądu kontaktowego, a dla wysokich częstotliwości również wzrost temperatury tkanek. Ponadto pracownik narażony jest na pośrednie elektromagnetyczne zagrożenia wypadkowe, które mogą być spowodowane dysfunkcjami sprzętu elektronicznego – w tym urządzeń sterujących, implantów, zabezpieczeń itp. Przepływ prądów kontaktowych może spowodować wyładowania iskrowe i zagrożenie wybuchem. I tak od bezpośredniego narażenia pracownika można przejść płynnie do problemów natury (nie)kompatybilności elektromagnetycznej.

Dla oceny narażenia pracowników w otoczeniu zgrzewarek przeprowadzono pomiary pola elektromagnetycznego zgodnie z rozporządzeniami [5] i [7]. Pomiary wykonano przy użyciu szerokopasmowego miernika PEM z sondami do pomiaru składowej elektrycznej

oraz magnetycznej. Zestaw pomiarowy posiadał świadectwo wzorcowania wydane przez akredytowane laboratorium wzorcujące. Niepewność pomiaru wynosiła 15%. Dodatkowo do zbadania widma elektromagnetycznego użyto analizatora z sondą magnetyczną na pasmo 1-250 MHz. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli 1, a zasięgi stref ochronnych w otoczeniu zgrzewarki na rysunkach 7 i 8.

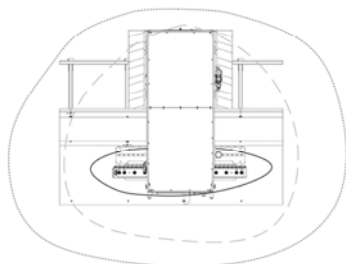
Tabela 1. Wyniki pomiarów PEM w otoczeniu zgrzewarki w.cz.

Składowa	Elektryczna	Magnetyczna
Stanowisko Operatora	215 V/m	1,35 A/m
Wartość maksymalna	828 V/m	9,84 A/m
Zasięg strefy pośredniej	220 cm	110 cm
Zasięg strefy zagrożenia	135 cm	70 cm
Zasięg strefy niebezpiecznej	45 cm	20 cm



Rys.7. Strefy ochronne w otoczeniu zgrzewarki w.cz. – pomiar składowej elektrycznej

— Strefa Niebezpieczna  
 - - - Strefa Zagrożenia  
 ..... Strefa Pośrednia



Rys.8. Strefy ochronne w otoczeniu zgrzewarki w.cz. – pomiar składowej magnetycznej

Przeprowadzone pomiary pola elektromagnetycznego w otoczeniu zgrzewarki FIAB 900 z odkrytą elektrodą wykazały występowanie w przestrzeni obsługi wszystkich stref ochronnych, a w szczególnych przypadkach poziomy PEM w otoczeniu badanej zgrzewarki potrafiły przekroczyć wartość 970 V/m dla składowej elektrycznej oraz 9 A/m dla składowej magnetycznej. Poziomy także występowały w testach przy nieprawidłowym podłączeniu urządzenia – np. niewłaściwe uziemienie czy niedokładne połączenia mas poszczególnych elementów urządzenia. Pokazuje to przy okazji jak istotny jest nadzór nad instalacją ale również kontrola w trakcie eksploatacji i okresowe pomiary PEM.

## Wnioski

Zgrzewarki wysokiej częstotliwości są powszechnie wykorzystywane w przemyśle obróbki tworzyw sztucznych. Choć technologia ta znana jest od kilkudziesięciu lat, to nie wiele zmieniło się w konstrukcji generatorów w.cz. Nieustannie pracuje się nad optymalizacją procesu zgrzewania, szczególnie pod kątem sprawności energetycznej oraz zgrzewania coraz szerszej gamy materiałów. Zgrzewarki stanowią bardzo specyficzne źródło pola elektromagnetycznego, wokół którego mogą występować natężenia PEM istotne z punktu widzenia BHP, a których właściwa eksploatacja powiązana ze znajomością budowy i zasady działania urządzenia przekłada się nie tylko na sprawność procesu zgrzewania, ale także na bezpieczeństwo pracowników obsługujących proces technologiczny.

*Praca zrealizowana w ramach prac badawczych finansowanych przez środki wewnętrzne Politechniki Wrocławskiej oraz prac w ramach projektu pt.: „Opracowanie innowacyjnych maszyn nowej generacji do łączenia tworzyw sztucznych: PVC, silikon, teflon, etylen, wykorzystujących energię elektromagnetyczną” (POIR.01.01.01-00-0012/15-00).*

**Autorzy:** dr hab. inż. Paweł Bieńkowski prof. PWR, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.bienkowski@pwr.edu.pl;  
 mgr inż. Paweł Cała, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.cala@pwr.edu.pl;  
 Paulina Grabarczyk, FIAB Sp. z o.o. sp.k. Pietrzykowice, ul. Fabryczna 20D, 55-080 Kąty Wrocławskie, E-mail: p.grabarczyk@fiabmachines.com;  
 Rafał Jabłoński, FIAB Sp. z o.o. sp.k. Pietrzykowice, ul. Fabryczna 20D, 55-080 Kąty Wrocławskie, E-mail: r.jablonski@fiabmachines.com;  
 mgr inż. Bartłomiej Zubrzak, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: bartlomiej.zubrzak@pwr.edu.pl;

## LITERATURA

- [1] Grewell D., Benatar A., "Welding of plastics: fundamentals and new developments", *International Polymer Processing XII*, Hanser, Germany, s. 43-60, 2007
- [2] Conover D. L., Parr W.H., Sensintaffer E.L., Murray W.E., Measurement of electric and magnetic field strengths from industrial radiofrequency (15-40.68 MHz) sources, *DHEW Publication*, FDA, USA, s. 356-362, 1976.
- [3] Eriksson A., Mild K.H., "Radiofrequency Electromagnetic Leakage Fields", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* vol. 20,(1985) International Microwave Power Institute, s. 95-107
- [4] Bieńkowski P., Emilianowicz J., Zubrzak B.: A prototype of pulse electromagnetic field standard setup with envelope shaping, *Microwave and Radio Electronics Week, MAREW 2015, 14th Conference on Microwave Techniques, COMITE 2015*, Pardubice, Czech Republic, April, s. 22-23
- [5] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 czerwca 2016 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. poz. 952)
- [6] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi)
- [7] Rozporządzeniem Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne (Dz.U. poz. 950)