

HARDWARE PROTECTIONS INCREASING THE RELIABILITY OF A PROTOTYPE INVERTER WELDER

ZABEZPIECZENIA SPRZĘTOWE ZWIĘKSZAJĄCE NIEAWODNOŚĆ PROTOTYPOWEJ SPAWARKI INWERTOROWEJ

Rafał Białek, Kamila Jadczyk

Military University of Technology, Wojskowa Akademia Techniczna

Abstract: *The subject of the paper is a presentation of hardware protections, which increase the reliability of a prototype inverter welder. Under certain assumptions, the constructed device may be classified to a group containing objects with a serial reliability structure. As a result, the functionality of the inverter welder is provided, when all components (sub-assemblies) operate correctly. The paper presents the results of simulations, which confirm the essence of using each of the hardware protections. The tests were conducted using the ICAP/4 software by Intusoft.*

Keywords: *inverter welder, hardware protections, pulse systems*

Streszczenie: *Tematem publikacji jest przedstawienie zabezpieczeń sprzętowych, zwiększających niezawodność prototypowej spawarki inwertorowej. Przy pewnych założeniach wykonane urządzenie może zostać zakwalifikowane do obiektów o strukturze szeregowej, w których funkcjonalność jest zapewniona, gdy wszystkie elementy składowe (podzespoły) pracują poprawnie. W pracy zostaną przedstawione wyniki badań symulacyjnych potwierdzające istotę zastosowania każdego z zabezpieczeń sprzętowych. Badania zostały przeprowadzone w programie ICAP/4 firmy Intusoft.*

Słowa kluczowe: *spawarka inwertorowa, zabezpieczenia sprzętowe, układy impulsowe*

HARDWARE PROTECTIONS INCREASING THE RELIABILITY OF A PROTOTYPE INVERTER WELDER

1. Introduction

Transformers operating at frequencies of several dozen or even several hundred kHz are currently used in the designs of devices processing electricity (e.g. chargers, power supplies). They are characterized by many advantages (small sizes, weight, high power efficiency and lower energy consumption) relative to systems, in which the transformers operate at grid frequency [2]. Ensuring high reliability of a pulse system requires the use of appropriate protections both in terms of hardware as well as, more and more often, software. The paper will present the basic hardware protections, increasing the reliability of a prototype inverter welder, designed and constructed by one of the authors (fig. 1).

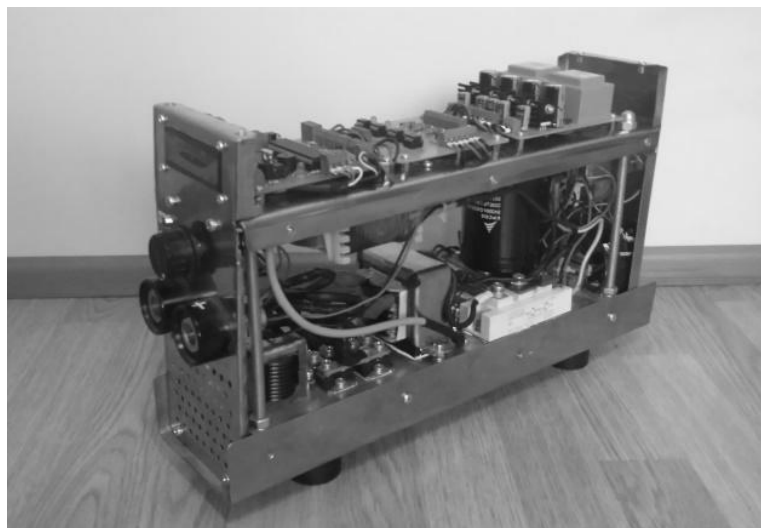


Fig. 1 Prototype inverter welder

2. Reliability structure of the object

The basic sub-assemblies of an inverter welder include: input rectifier, input filter, inverter, transformer, output rectifier and output filter.

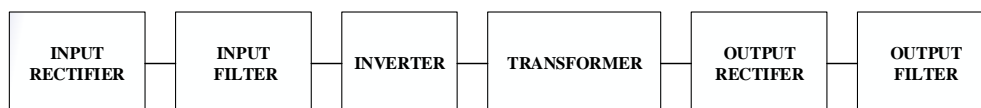


Fig. 2 Reliability structure of the object

The constructed device may be classified to a group containing objects with a serial reliability structure, in which functionality is ensured, when all components (sub-assemblies) operate correctly. The R_s reliability of an n-element object with a serial structure (when the damage of its components are mutually independent damage) is expressed by the formula (1):

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

where

R_i - reliability i - of this element.

The above-mentioned relationship indicates that the reliability of such an object increases with increasing reliability of individual elements and decreases with an increasing number of n elements. Unfortunately, in the case of the constructed welder, the number of sub-assemblies cannot be reduced, and achieving high reliability of an inverter welder will only be possible through the use of additional hardware protections, resulting in increased reliability of individual sub-assemblies.

The paper will present the results of simulation tests using a freeware version of ICAP/4 Windows by *Intusoft*, which confirm the essence of using each of the hardware protections.

3. Input rectifier protection

A common cause for damaged rectifiers, installed on rectifying diodes is overvoltage in the power supply network. The sources of these overvoltages are mainly commutation phenomena. Changing operating conditions give rise to disturbances of the vanishing oscillation nature, with a frequency much higher than 50 Hz. In most cases, the maximum voltage value of damped oscillations is twice as high as the amplitude of the network voltage. In the case of induction consumers (transformers, motors), these overvoltages may have even higher values. Overvoltages of aperiodic character may also appear in power supply systems, usually with maximum values from several hundred Volts to a few Volts, and a duration from a few to several dozen microseconds. The paper [5] presents examples of overvoltage in a supply network.

The role of an input rectifier in the constructed inverter welder is taken by a Graetz KBPC5010 bridge, for which the value of maximum reverse voltage U_{RRM} is 1000V. A system should be designed in such a way, so that the level of this voltage is not exceeded. A metal-oxide varistor, with a rated voltage of 430V was used in the welder. Below you can find a diagram and time analysis results of the system using this element, conducted in the ICAP/4 Windows software. The resistance 50 m Ω represents resistance of the power supply cable. A varistor model is based on catalogue data.

*Hardware protections increasing the reliability of a prototype inverter welder
Zabezpieczenia sprzętowe zwiększające niezawodność prototypowej spawarki...*

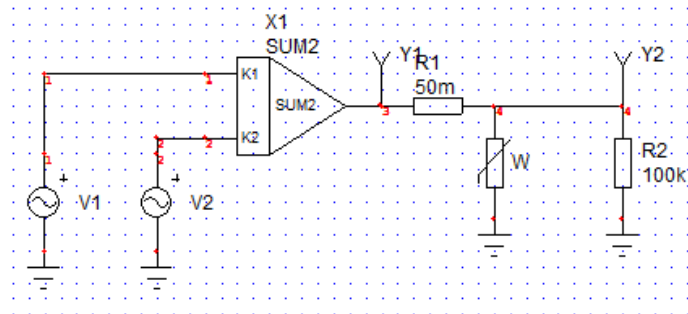


Fig. 3 A diagram of the system with an added varistor

Below you can find an input signal, which is a sum of a sinusoidal signal with a frequency of 50 Hz and an effective value of 230 V, and an impact signal, with a duration of 50 μ s and an amplitude of 1000 V.

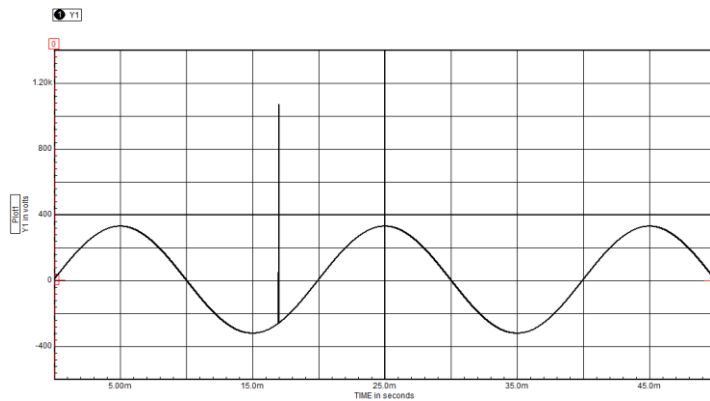


Fig. 4 Time analysis - input signal

Another graph shows the time form of the input signal.

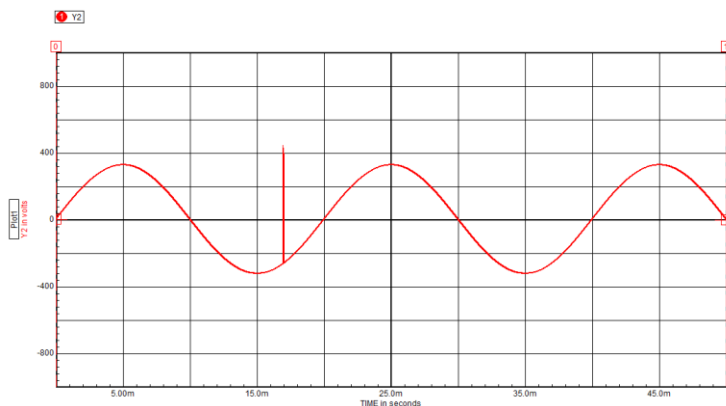


Fig. 5 Time analysis - output signal

The conducted simulation shows that the use of an appropriate varistor efficiently damps overvoltages, which may occur in a power supply network.

4. Input filter protection

The prototype inverter welder utilizes a low-pass second order filter with a limit frequency of 66 Hz. The system consists of a gland with an inductance of 2.6 mH and an electrolytic capacitor by *EPCOS*, with a capacity of 2200 μ F. In order for the system to operate correctly, the voltage on the capacitor cannot exceed 350V, whereas the maximum value of current ripples cannot be higher than 45A. In the course of the simulation, the time response to a discrete signal with an amplitude of 325 V was checked (start-up of the welder when the instantaneous value of the supply signal is equal to the amplitude). The diagram of the system is shown in figure 6.

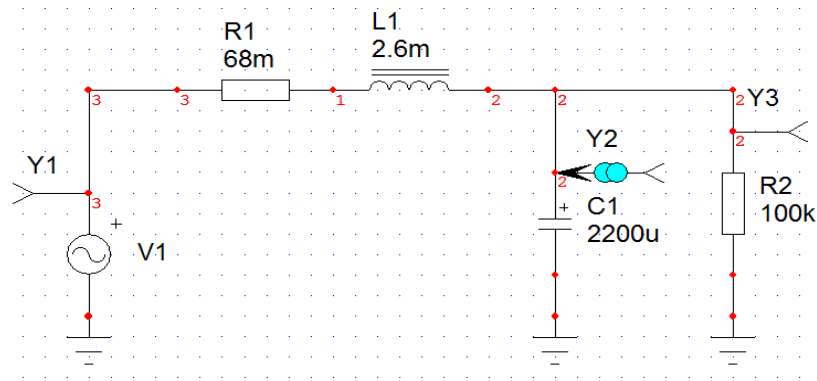


Fig. 6 Filter without a protection in the ICAP/4 simulation software

Figure 7 shows the time response of the filter.

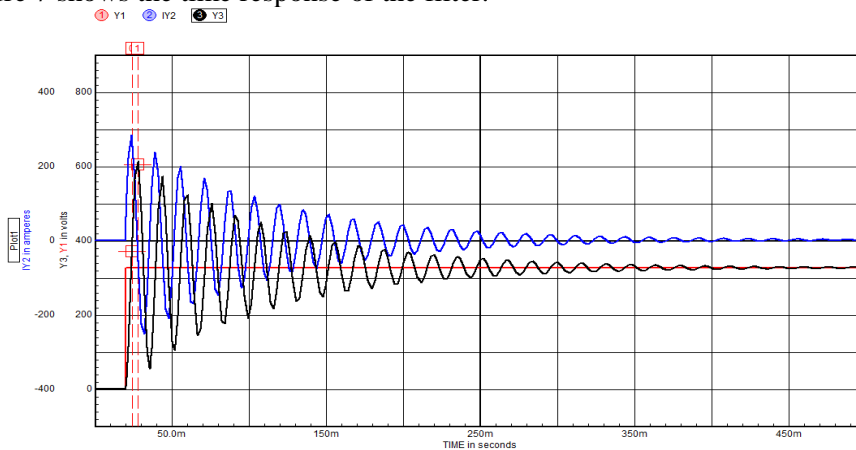


Fig. 7 The results of an ICAP/4 time simulation for a filter without additional protection

*Hardware protections increasing the reliability of a prototype inverter welder
Zabezpieczenia sprzętowe zwiększające niezawodność prototypowej spawarki...*

The maximum overvoltage value on the capacitor is ca. 604 V. While the current value is equal to ca. 272A. Such levels shall damage the capacitor. In order to decrease these values, an additional resistor with a resistance of 470 Ω was added and connected in parallel with a contactor (fig. 8). The contactor trip time was selected so that the value of the current flowing through the additional resistor does not exceed 1.3 A.

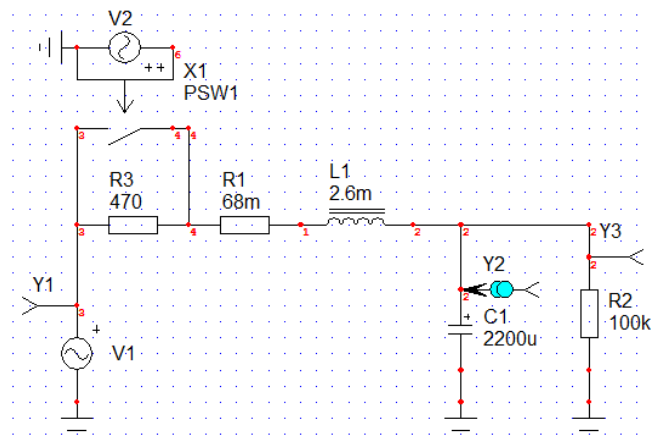


Fig. 8 A filter with a protection in the ICAP/4 simulation software

Figure 9 shows a filter time response after using the additional protection.

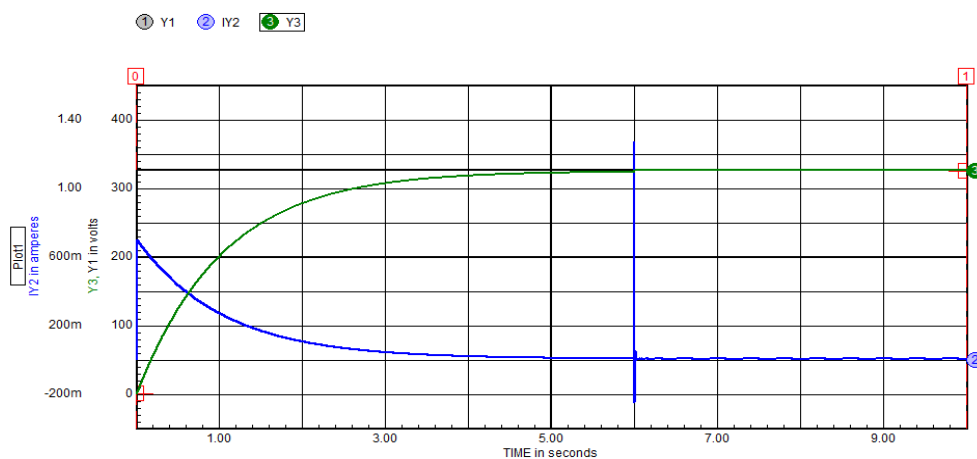


Fig. 9 The results of an ICAP/4 time simulation for a filter with additional protection

Activation of a contactor after 6 s will ensure a maximum current value of 1.27 A, while the maximum voltage on the capacitor is 326 V. Such levels will not result in damaging an input filter.

5. Inverter protection

The basic element of the inverter is an H bridge based on IGBT transistors with parallel connected free-wheeling diodes. The basic issue at induction load of such a system are overvoltages on the transistors. In order to limit the overvoltage levels, each of the transistors has a parallel connection with a system, which is a serial connection of a resistor with a value of $47\ \Omega$ and a $10\ \text{nF}$ capacitor. For high-frequency components, the system is a load with an impedance of $47\ \Omega$. The system was designed in such a way, so that signals with a frequency ca. 20 times higher than the inverter operating frequency ($16\ \text{kHz}$) are damped. The diagram of the system in ICAP/4 is shown in figure 10.

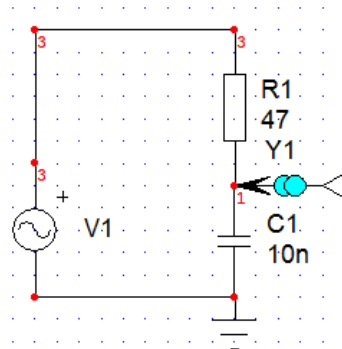


Fig. 10 A diagram of the IGBT transistor protection system

Frequency analysis results are shown in figure 11.

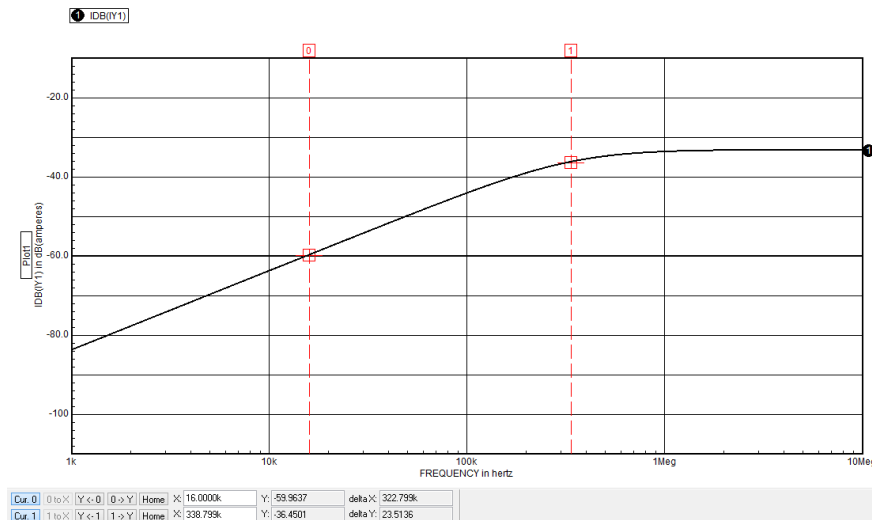


Fig. 11 Frequency analysis of the IGBT transistor protection system

The conducted analysis shows that limit frequency of the filter is ca. $339\ \text{kHz}$.

6. Transformer protection

In case of differences in the duration of H bridge controlling pulses, a DC component appears on the inverter output. It is very undesirable in terms of transformer operation. This component does not transform into the secondary side, but only slightly magnetizes the core of the flux uni-direction component, increasing the value of magnetizing current and deteriorating its magnetic properties. Moreover, transformer operation in such conditions causes the emission of larger quantities of heat [6]. In order to eliminate the possibility of a DC component appearing on a transformer output, a serial connection of two parallel capacitors, with a capacity of $1.47 \mu\text{F}$ was added to the primary winding. Figure 12 shows the diagram in simulation software. R1 resistor represents the primary winding resistance, and the L1 coil, its inductance.

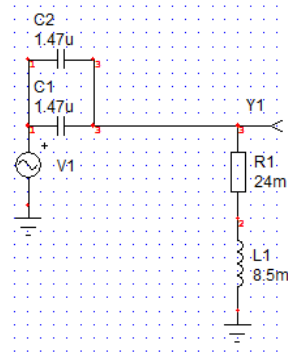


Fig. 12 Diagram of a transformer protection system

Frequency analysis results are shown in fig. 13.

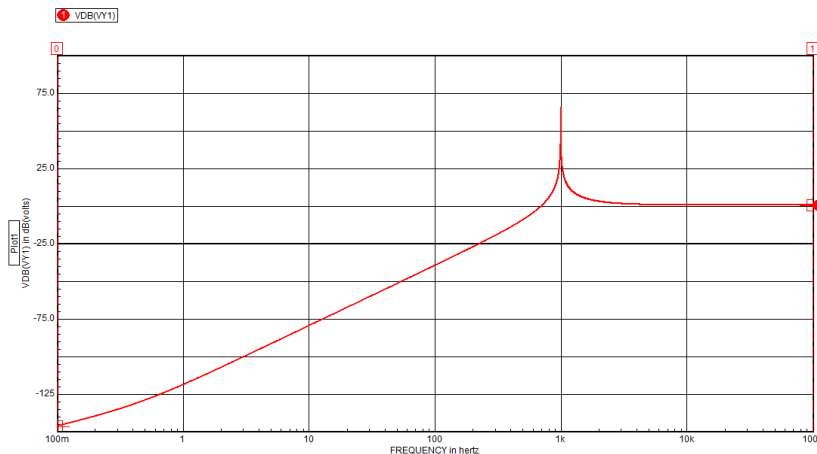


Fig. 13 Frequency analysis of a transformer protection system

Added capacitors together with transformer primary winding form a high-pass filter with a resonant frequency of ca. 1 kHz. A signal with an inverter primary frequency (16 kHz) will in such a case be transformed without any problems.

7. Output rectifier protection

The role of an output rectifier in the constructed inverter welder is taken by a Graetz bridge built on APT2X101S20J circuits. The diodes included in this system are characterized by a maximum reverse voltage value U_{RRM} equal to 200 V. In order to limit the possibility of overvoltages, a system of a serial connected resistor and capacitor, connected in parallel to the rectifier input was used. For high-frequency components, the system is a load with an impedance of 47 Ω . The protection system is shown in figure 14.

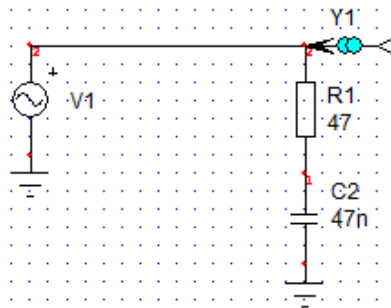


Fig. 14 Output rectifier protection system diagram

Frequency analysis results are shown in figure 15.

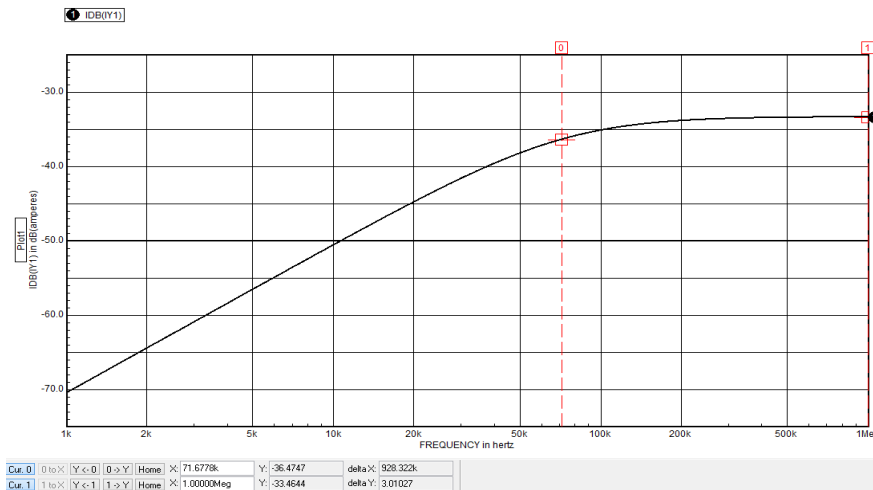


Fig. 15 Frequency analysis result of the output rectifier protection system

The conducted analysis shows that limit frequency of the filter is ca. 72 kHz.

8. Conclusions

The constructed device may be classified to a group containing objects with a serial reliability structure. The worthiness probability of such an object is the probability of maintaining the worthiness of each of its elements. Achieving high reliability of an inverter welder was possible only by increasing the reliability of its individual sub-assemblies. The paper presents basic hardware protections and simulation results confirming the essence of their application. The use of additional protection systems tested in simulation software, enabled the construction of a functional welding machine.

9. Literature

- [1] Będkowski L., Dąbrowski T.: Podstawy eksploatacji. cz. 2. Podstawy niezawodności eksploatacyjnej [*Basic of operation, part 2. Basics of operational reliability*], Warszawa 2006
- [2] Białek R.: Pomiar sprawności energetycznej podzespołów spawarki inwerterowej [*The measurement of electric power efficiency of welding inverter components*], Przegląd Elektrotechniczny, no. 12/2016, p. 185- 187
- [3] Macha E.: Niezawodność Maszyn [*Reliability of machinery*], Opole 2001
- [4] Dobrowolski A.: Pod maską SPICE'a. Metody i algorytmy analizy układów elektronicznych [*Under the hood of SPICE. Methods and algorithms for analysing electronic systems*], Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004
- [5] Aniserowicz K.: Udary przepięciowe w obwodach elektroenergetycznych niskiego napięcia [*Overvoltage surges in low-voltage power circuits*], Przegląd Elektrotechniczny, no. 2/2016, p. 8-13
- [6] Majer K.: Magnesowanie rdzeni transformatorów przy podmagnesowaniu składową stałą [*The influence of unidirectional (constant) sub magnetization of the ferromagnetic core of a transformer*], Przegląd Elektrotechniczny, no. 7/2017, p. 5-13



M.Sc. Eng. Rafał Białek- a research and didactic assistant in the Department of Measurement and Information Systems of Military University of Technology. Research interests include the measurements of high-power electromagnetic pulses and the design of high-power switching mode systems.(Share 80%)

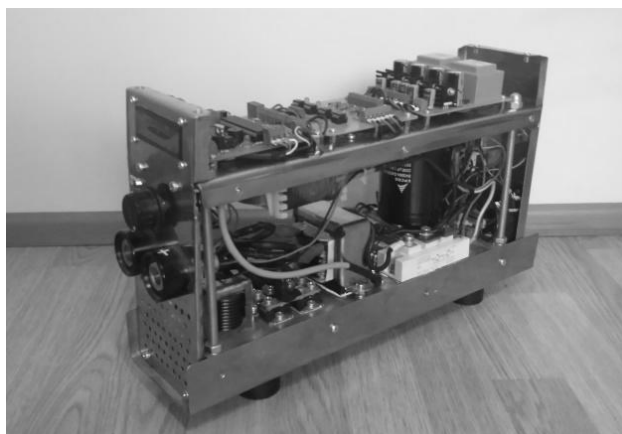


M.Sc. Eng. Kamila Jadczak – a research and didactic assistant in the Department of Measurement and Information Systems of Military University of Technology. Research interests include the issues, among others, of machine learning and electronics in medicine. (Share 20%)

ZABEZPIECZENIA SPRZĘTOWE ZWIĘKSZAJĄCE NIEAWODNOŚĆ PROTOTYPOWEJ SPAWARKI INWERTOROWEJ

1. Wstęp

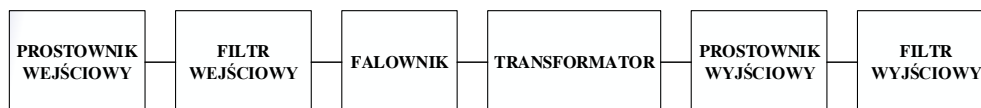
Obecnie w budowie większości urządzeń przetwarzających energię elektryczną (np. ładowarki, zasilacze) wykorzystywane są transformatory pracujące na częstotliwościach rzędu kilkudziesięciu a nawet kilkuset kiloherców. Charakteryzują się one wieloma zaletami (małymi wymiarami, wagą, wysoką sprawnością energetyczną i mniejszym poborem prądu) w odniesieniu do układów, w których transformatory pracują na częstotliwości sieciowej [1]. Zapewnienie wysokiej niezawodności układu impulsowego wymaga zastosowania odpowiednich zabezpieczeń zarówno sprzętowych jak i coraz częściej programowych. W pracy zostaną przedstawione podstawowe zabezpieczenia sprzętowe, zwiększające niezawodność prototypowej spawarki inwertorowej, zaprojektowanej i skonstruowanej przez jednego z autorów artykułu (rys. 1).



Rys. 1 Prototypowa spawarka inwertorowa

2. Struktura niezawodnościowa obiektu

Do podstawowych podzespołów prototypowej spawarki inwertorowej należy zaliczyć: prostownik wejściowy, filtr wejściowy, falownik, transformator, prostownik wyjściowy oraz filtr wyjściowy.



Rys. 2 Struktura niezawodnościowa spawarki inwertorowej

Wykonana spawarka inwertorowa może zostać zakwalifikowana do obiektów o strukturze niezawodnościowej szeregowej, w których funkcjonalność jest zapewniona, gdy wszystkie elementy składowe (podzespoły) pracują poprawnie. Niezawodność R_s obiektu n -elementowego o strukturze szeregowej (w przypadku kiedy uszkodzenia jego elementów składowych są uszkodzeniami wzajemnie niezależnymi) wyrażona jest wzorem (1):

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

gdzie R_i - niezawodność i -tego elementu.

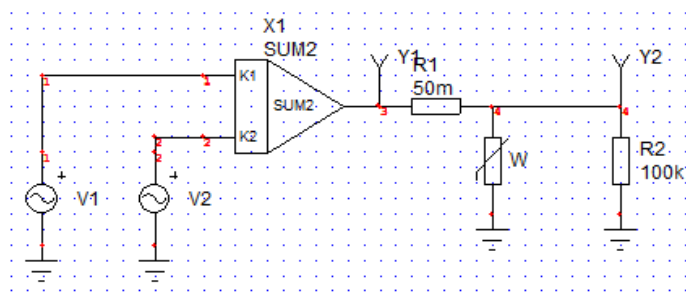
Z powyższej zależności wynika, że niezawodność takiego obiektu zwiększa się wraz ze zwiększeniem niezawodności poszczególnych elementów oraz zmniejsza wraz ze zwiększeniem liczby n elementów. Niestety w przypadku wykonanej spawarki, liczba podzespołów nie może zostać zredukowana a uzyskanie wysokiej niezawodności spawarki inwertorowej będzie jedynie możliwe poprzez zastosowanie dodatkowych zabezpieczeń sprzętowych powodujących zwiększenie niezawodności poszczególnych podzespołów.

W pracy zostaną przedstawione wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem wersji demonstracyjnej programu ICAP/4 Windows firmy *Intusoft*, potwierdzające istotę zastosowania każdego z zabezpieczeń sprzętowych.

3. Zabezpieczenie prostownika wejściowego

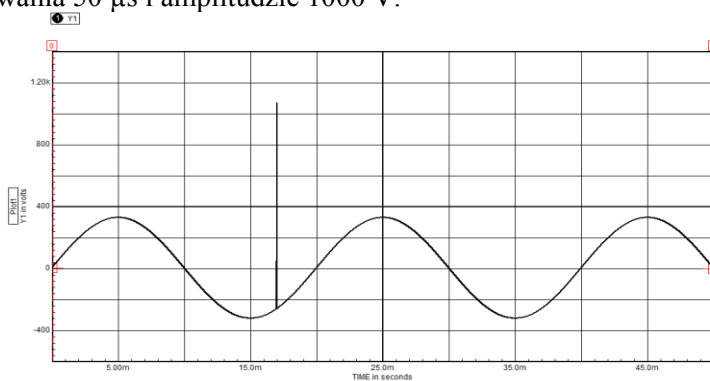
Częstą przyczyną powodującą uszkodzenie prostowników, zbudowanych na diodach prostowniczych są przepięcia występujące w sieciach zasilających. Źródłem powstania tych przepięć są głównie zjawiska komutacyjne. Zmiany warunków pracy systemu powodują powstawanie zaburzeń o charakterze zanikających oscylacji, o częstotliwości znacznie wyższej niż 50 Hz. W większości przypadków maksymalna wartość napięcia tłumionych oscylacji jest dwukrotnie większa od amplitudy napięcia panującego w sieci. W przypadku występowania odbiorników indukcyjnych (transformatory, silniki), przepięcia te mogą mieć jeszcze większe wartości. W obwodach zasilających mogą również występować przepięcia o charakterze aperiodycznym, zwykle o wartościach maksymalnych od kilkuset woltów do kilku kilowoltów i o czasie trwania od kilku do kilkudziesięciu mikrosekund. W pracy [4] przedstawiono przykłady przepięć w sieciach zasilających.

W wykonanej spawarce inwertorowej rolę prostownika wejściowego pełni mostek Graetza KBPC5010 dla którego wartość maksymalnego napięcia wstecznego U_{RRM} wynosi 1000V. Układ powinien być tak zaprojektowany aby poziom tego napięcia nie został przekroczony. W wykonanej spawarce zastosowano warystor metalowo-tlenkowy o napięciu znamionowym 430 V. Poniżej przedstawiono schemat oraz wyniki analizy czasowej układu z wykorzystaniem tego elementu w programie ICAP/4 Windows. Rezystancja 50 m Ω reprezentuje rezystancję przewodu zasilającego. Model warystora wykonano w oparciu o dane katalogowe.



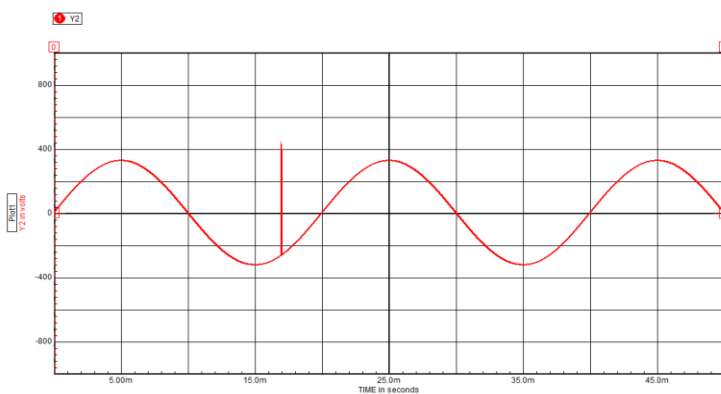
Rys. 3 Schemat układu z dołączonym warystorem

Poniżej przedstawiono sygnał wejściowy będący sumą sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej 230 V oraz sygnału udarowego o czasie trwania 50 μ s i amplitudzie 1000 V.



Rys. 4 Analiza czasowa - sygnał wejściowy

Kolejny wykres przedstawia postać czasową sygnału wyjściowego.

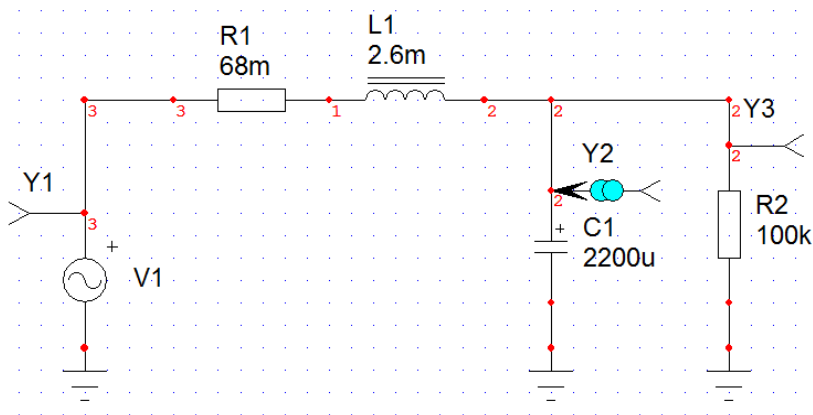


Rys. 5 Analiza czasowa - sygnał wyjściowy

Przeprowadzone badanie symulacyjne pokazuje, że zastosowanie odpowiedniego warystora skutecznie tłumi przepięcia, które mogą wystąpić w sieci zasilającej.

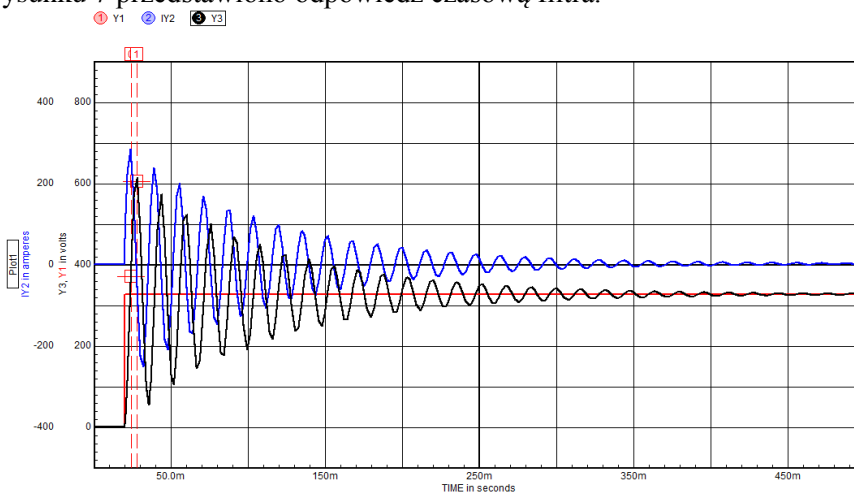
4. Zabezpieczenie filtra wejściowego

W prototypowej spawarce inwerterowej zastosowano filtr dolnoprzepustowy drugiego rzędu o częstotliwości granicznej 66 Hz. Układ stanowi dławik o indukcyjności 2,6 mH oraz kondensator elektrolityczny firmy EPCOS o pojemności 2200 μ F. Aby układ mógł pracować poprawnie napięcie na kondensatorze nie może przekroczyć 350 V. Natomiast maksymalna wartość prądu tętnień nie może być większa niż 45 A. Podczas symulacji zbadano odpowiedź czasową układu na sygnał skokowy o amplitudzie 325 V (załączenie spawarki w momencie, gdy wartość chwilowa sygnału zasilającego równa amplitudzie). Schemat układu przedstawiono na rysunku 6.



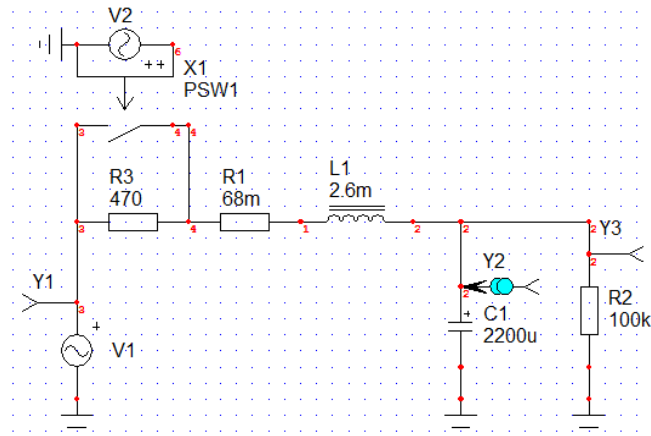
Rys. 6 Filtr bez zabezpieczenia w programie symulacyjnym ICAP/4

Na rysunku 7 przedstawiono odpowiedź czasową filtra.



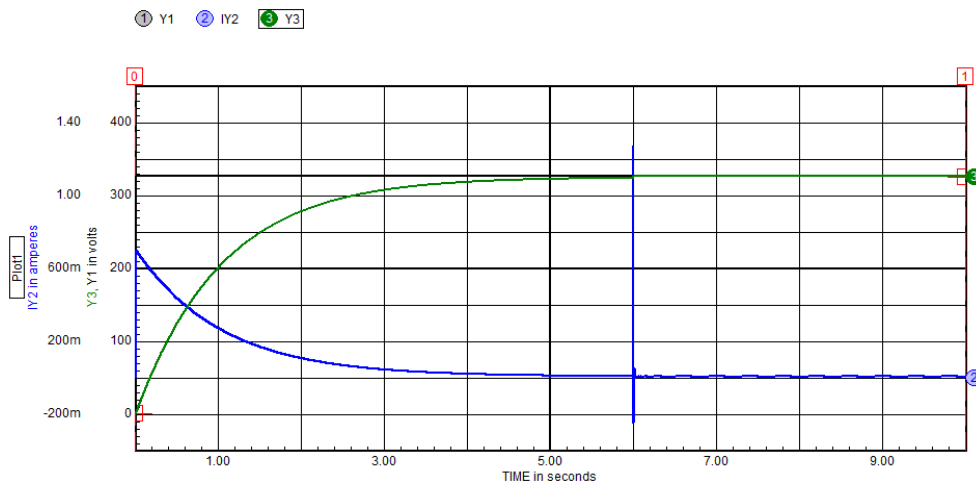
Rys. 7 Wyniki symulacji czasowej filtra w programie ICAP/4 bez dodatkowego zabezpieczenia

Maksymalna wartość napięcia na kondensatorze wynosi ok. 604 V. Natomiast wartość prądu jest równa ok. 272 A. Takie poziomy spowodują uszkodzenie kondensatora. W celu zmniejszenia tych wartości dodano dodatkowy rezystor o rezystancji $470\ \Omega$ połączony równoległe ze stycznikiem (rys. 8). Czas załączenia stycznika dobrano tak, aby wartość prądu płynącego przez dodatkowy rezystor nie przekraczała 1,3 A.



Rys. 8 Filtr z zabezpieczeniem w programie symulacyjnym ICAP/4

Na rysunku 9 przedstawiono odpowiedź czasową filtra po zastosowaniu dodatkowego zabezpieczenia.



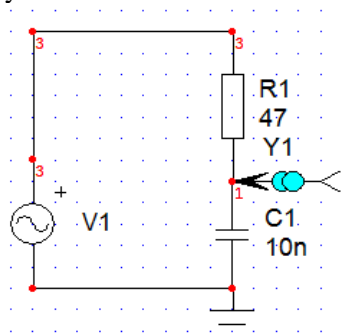
Rys. 9 Wyniki symulacji czasowej filtra w programie ICAP/4 z dodatkowym zabezpieczeniem

*Hardware protections increasing the reliability of a prototype inverter welder
Zabezpieczenia sprzętowe zwiększające niezawodność prototypowej spawarki...*

Załączenie stycznika po czasie 6 s zapewni maksymalną wartość prądu równą 1,27 A. Natomiast maksymalne napięcie na kondensatorze wynosi 326 V. Takie poziomy nie spowodują uszkodzenia filtra wejściowego.

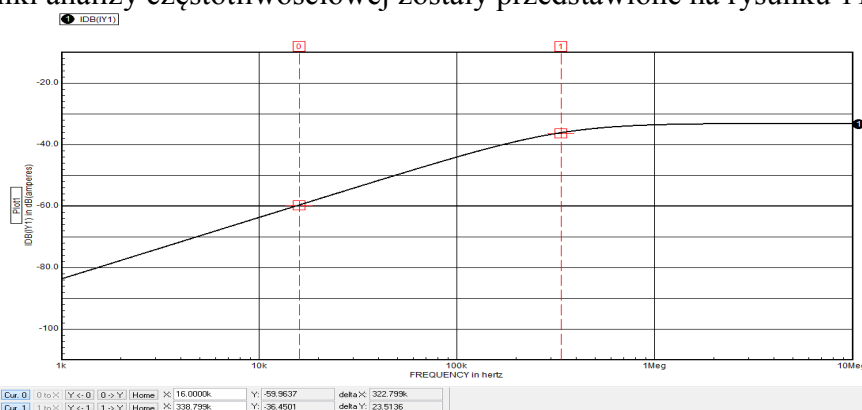
5. Zabezpieczenie falownika

Podstawowym elementem falownika jest mostek H zbudowany na tranzystorach IGBT z połączonymi równolegle diodami zwrotnymi. Podstawowym problemem przy obciążeniu indukcyjnym takiego układu są przepięcia występujące na tranzystorach. W celu ograniczenia poziomów przepięć do każdego z tranzystorów został dołączony równolegle układ będący szeregowym połączeniem rezystora o wartości 47Ω i kondensatora o pojemności 10 nF . Dla składowych wysokoczęstotliwościowych układ stanowi obciążenie o impedancji 47Ω . Układ zaprojektowano tak, aby tłumione były sygnały o częstotliwości ok. 20 razy większej niż częstotliwość pracy falownika (16 kHz). Schemat układu w programie ICAP/4 przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10 Schemat układu zabezpieczającego tranzystor IGBT

Wyniki analizy częstotliwościowej zostały przedstawione na rysunku 11.

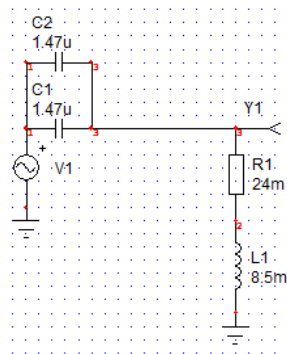


Rys. 11 Analiza częstotliwościowa układu zabezpieczającego tranzystor IGBT

Z przeprowadzonej analizy wynika, że częstotliwość graniczna filtra wynosi ok 339 kHz .

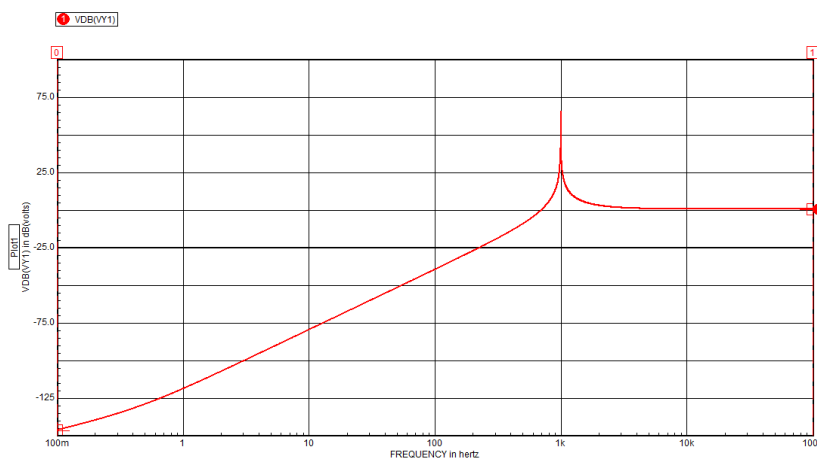
6. Zabezpieczenie transformatora

W przypadku pojawienia się różnic czasu trwania impulsów sterujących mostkiem H, na wyjściu falownika pojawi się składowa stała. Jest ona bardzo niepożądana dla pracy transformatora. Składowa ta nie transformuje się na stronę wtórną a jedynie podmagnesowuje rdzeń składową jednokierunkową strumienia, zwiększając wartość prądu magnesującego i pogarszając jego własności magnetyczne. Ponadto praca transformatora w takich warunkach powoduje wydzielanie się większej ilości ciepła [5]. W celu wyeliminowania możliwości pojawienia się składowej stałej na wejściu transformatora, do uzwojenia pierwotnego dołączono szeregowo dwa równolegle połączone kondensatory o pojemności $1,47 \mu\text{F}$. Na rysunku 12 przedstawiono schemat w programie symulacyjnym. Rezystor R1 reprezentuje rezystancję uzwojenia pierwotnego a cewka L1 jego indukcyjność.



Rys. 12 Schemat układu zabezpieczającego transformator

Wyniki analizy częstotliwościowej przedstawiono na rys. 13.

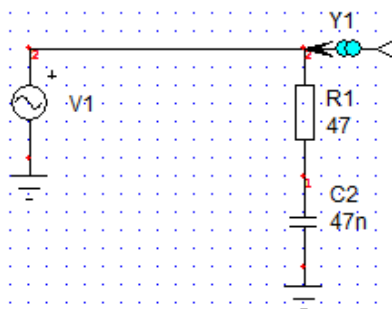


Rys. 13 Analiza częstotliwościowa układu zabezpieczającego transformator

Dołączone kondensatory wraz z uzwojeniem pierwotnym transformatora tworzą filtr górnoprzepustowy o częstotliwości rezonansowej ok. 1 kHz. Sygnał o częstotliwości podstawowej falownika (16 kHz) będzie w takim układzie bez problemu transformowany.

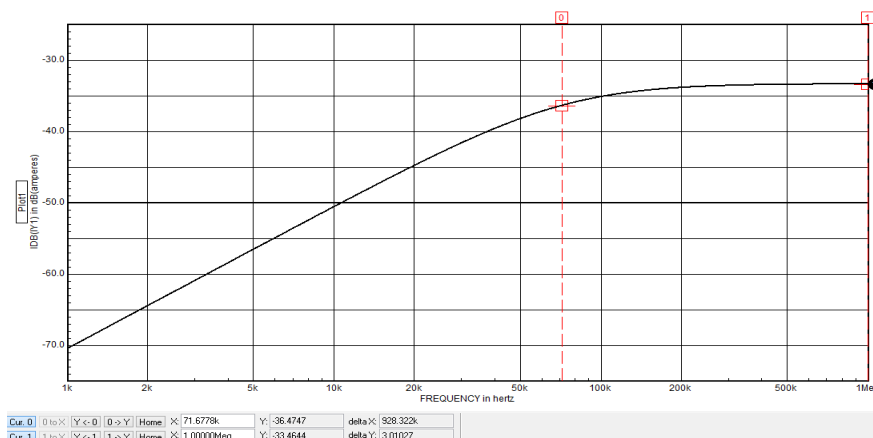
7. Zabezpieczenie prostownika wyjściowego

W wykonanej spawarce inwerterowej rolę prostownika wyjściowego pełni mostek Graetza zbudowany na układach APT2X101S20J. Diody zawarte w tym układzie charakteryzują się maksymalną wartością napięcia wstecznego U_{RRM} równą 200 V. W celu ograniczenia możliwości powstawania przepięć zastosowano układ szeregowo połączony rezystora i kondensatora równolegle dołączony do wejścia prostownika. Dla składowych wysokoczęstotliwościowych układ stanowi obciążenie o impedancji 47 Ω . Układ zabezpieczający przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14 Schemat układu zabezpieczającego prostownik wyjściowy

Wyniki analizy częstotliwościowej zostały przedstawione na rysunku 15.



Rys. 15 Analiza częstotliwościowa układu zabezpieczającego prostownik wyjściowy

Z przeprowadzonej analizy wynika, że częstotliwość graniczna filtra wynosi ok 72 kHz.

8. Podsumowanie

Wykonana spawarka inwerterowa może zostać zaliczona do obiektów o strukturze niezawodnościowej szeregowej, w której osiągnięcie wysokiej niezawodności było możliwe jedynie poprzez zwiększenie niezawodności poszczególnych podzespołów. W pracy zostały przedstawione podstawowe zabezpieczenia sprzętowe oraz wyniki symulacji potwierdzające istotę zastosowania każdego z nich. Zastosowanie dodatkowych układów zabezpieczających przebadanych w programie symulacyjnym pozwoliło skonstruować funkcjonalne urządzenie spawalnicze.

9. Literatura

- [1] Będkowski L., Dąbrowski T.: Podstawy eksploatacji. cz. 2. Podstawy niezawodności eksploatacyjnej, Warszawa 2006
- [2] Białek R.: Pomiar sprawności energetycznej podzespołów spawarki inwerterowej, Przegląd Elektrotechniczny, nr 12/2016, str. 185- 187
- [3] Macha E.: Niezawodność Maszyn, Opole 2001
- [4] Dobrowolski A.: Pod maską SPICE'a. Metody i algorytmy analizy układów elektronicznych, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004
- [5] Aniserowicz K.: Udary przepięciowe w obwodach elektroenergetycznych niskiego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2/2016, str. 8-13
- [6] Majer K. : Magnesowanie rdzeni transformatorów przy podmagnesowaniu składową stałą, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/2017, str. 5-13



Mgr inż. Rafał Białek- asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Systemów Informacyjno-Pomiarowych Wojskowej Akademii Technicznej. Zainteresowania naukowe obejmują pomiary wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych oraz projektowanie układów impulsowych dużej mocy. (Udział 80%)



Mgr inż. Kamila Jadczyk – asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Systemów Informacyjno-Pomiarowych Wojskowej Akademii Technicznej. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia m.in. nauczania maszynowego oraz elektroniki w medycynie. (Udział 20%)

Hardware protections increasing the reliability of a prototype inverter welder
Zabezpieczenia sprzętowe zwiększające niezawodność prototypowej spawarki...
