

# Cyfrowe zabezpieczenie od uszkodzeń diod wirujących we wzbudnicach bezszczotkowych

Włodzimierz Garski, Adam Maj

## 1. Wstęp

W maszynach synchronicznych wzbudzenie może być realizowane przy użyciu magnesów trwałych lub poprzez zasilanie uzwojeń wirnika prądem stałym. Typowa konstrukcja maszyny synchronicznej składa się z trójfazowego uzwojenia twornika znajdującego się w stojanie oraz uzwojenia wzbudzenia umieszczonego na wirniku. Uzwojenie wirnika zasilane jest poprzez szczotki i pierścienie ślizgowe lub bezszczotkowo poprzez prostownik diodowy. W rozwiązaniu bezszczotkowym wirnik maszyny synchronicznej, jak i wirnik wzbudnicy umieszczone są na wspólnym wale. Uzwojenie wzbudnicy poprzez wirujący prostownik zasila uzwojenie wzbudzenia maszyny synchronicznej. Eliminując z układu części mechaniczne w postaci szczotek i pierścieni ślizgowych, uzyskano większą niezawodność pracy.

## 2. Układ kontroli diod wirujących

### 2.1. Problemy wzbudnic bezszczotkowych

Zastosowanie wzbudnic bezszczotkowych w znaczący sposób zmniejsza konieczność rewizji i nadzoru wzbudnic, ze względu na brak szczotek i pierścieni ślizgowych. Mankamentem tego rozwiązania jest brak możliwości łatwej kontroli stanu diod prostowniczych.

Diody prostownika wirującego mogą ulec uszkodzeniu w trakcie eksploatacji. Występują dwa rodzaje uszkodzeń: zwarcie diody i przerwa.

Zwarcie diody powoduje przepływ dużego prądu wzbudzenia w uzwojeniu głównym wzbudnicy, co prowadzi do jej nadmiernej nagrzania i w konsekwencji do uszkodzenia. Uszkodzenia tego typu są bardzo niebezpieczne dla całego układu wzbudzenia, musi więc ono zostać szybko wykryte, a cały układ wyłączony z małą zwłoką.

W przypadku wystąpienia przerwy w jednej z gałęzi mostka maszyna może pracować dalej, jednak w pewnych sytuacjach szczególnych może to prowadzić do przeciążenia wzbudnicy, powodując dalsze uszkodzenia.

O ile w przypadku zwarcia diody uszkodzenie jest jednoznaczne i dość łatwe do wykrycia, to w przypadku wystąpienia przerwy w gałęzi mostka obsługa i ekipy remontowe mogą mieć znaczne trudności ze zdiagnozowaniem uszkodzenia, co może doprowadzić do rozprzestrzenienia się uszkodzenia i znacznie podnieść koszty naprawy i czas postoju maszyny.

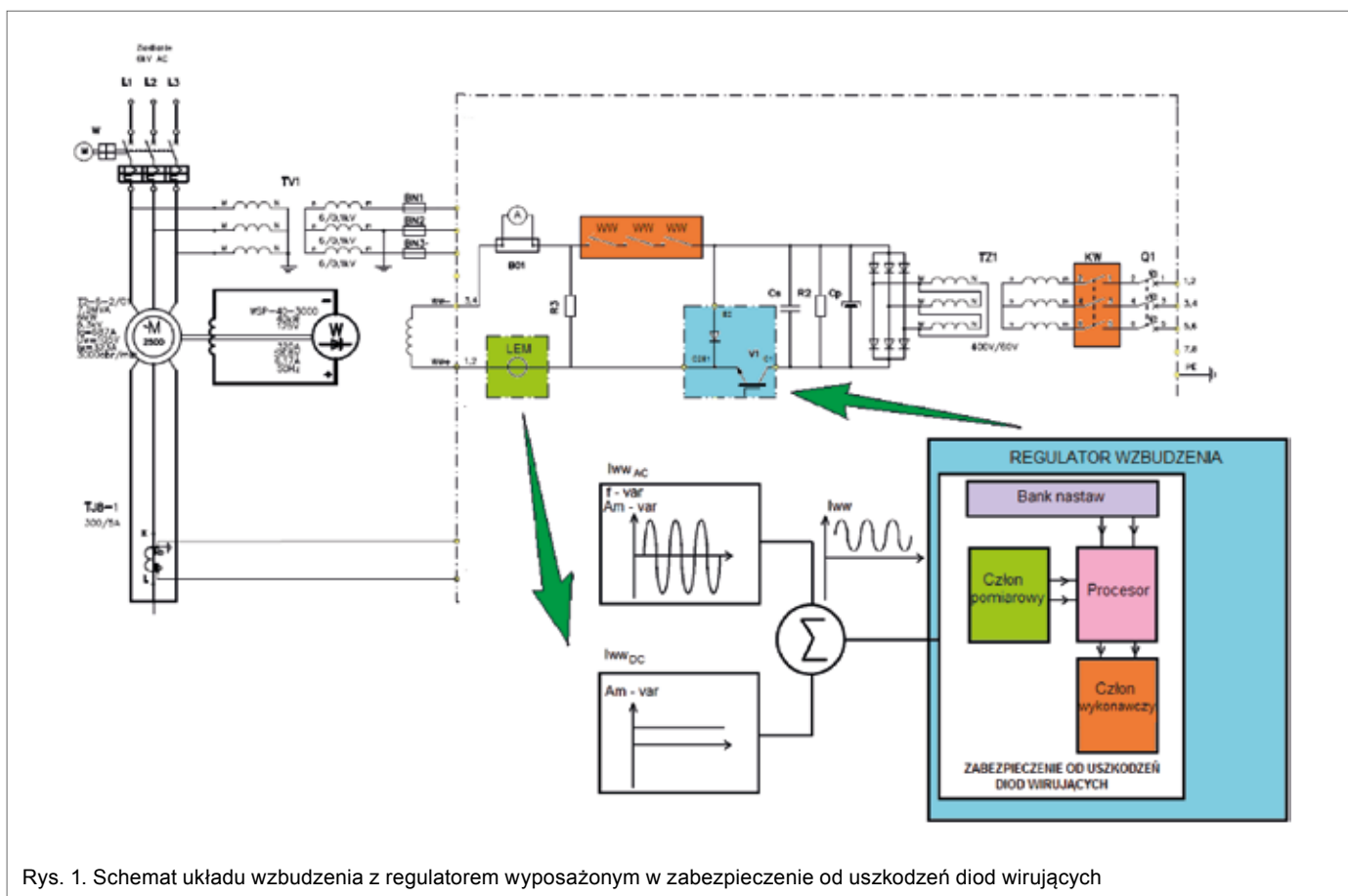
### 2.2. Cyfrowe zabezpieczenie od uszkodzeń diod wirujących

Cyfrowe zabezpieczenie od uszkodzeń diod wirujących we wzbudnicach bezszczotkowych ma za zadanie w przypadku

## 🇬🇧 DIGITAL PROTECTION AGAINST DIODE FAILURE FOR BRUSHLESS EXCITERS

**Abstract:** This paper presents a newly designed digital protection against diode failure for brushless exciters for synchronous generators and motors. There have been a brief explanation of the advisability of such a type of the protections. There are presented two possible configurations of the proposed protection. At one configuration the protection is an integral part of the excitation control system, at second as an independent separate unit, equipped with a measuring transducers system. The article presents the assumptions and description of the proposed method for detecting diode failure. Presented simulation results confirm correctness of the algorithm adopted for the implementation of protection functions. Presented waveforms were, taken by running protection, working as an integral part of the excitation control system of a synchronous motor. They were obtained during tests with open diode failure in the rectifier circuit. Operation at protection work in real conditions was assessed positively.

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono nowo zaprojektowane cyfrowe zabezpieczenie wykrywające uszkodzenie diod wirujących wzbudnic bezszczotkowych do generatorów i silników synchronicznych. Dokonano krótkiego uzasadnienia celowości stosowania takiego rodzaju zabezpieczenia. Przedstawiono dwie możliwe konfiguracje proponowanego zabezpieczenia. Jedno w konfiguracji, mogące stanowić integralną część regulatora układu wzbudzenia, drugie jako niezależna samodzielna jednostka, wyposażona w układ przetworników pomiarowych. W artykule przedstawiono założenia i opis proponowanej metody wykrywania uszkodzenia zaworu półprzewodnikowego. Przedstawiono wyniki symulacji potwierdzające prawidłowość algorytmu przyjętego do realizacji funkcji zabezpieczających. Zaprezentowano rejestracje przebiegów, wykonanych podczas uruchomienia prototypu zabezpieczenia pracującego w konfiguracji jako integralna część układu wzbudzenia silnika synchronicznego. Przedstawiono rzeczywiste przebiegi uzyskane w czasie próby z rozwartą diodą układu prostowniczego. Dokonano oceny pracy zabezpieczenia w warunkach rzeczywistych.



Rys. 1. Schemat układu zbudzenia z regulatorem wyposażonym w zabezpieczenie od uszkodzeń diod wirujących

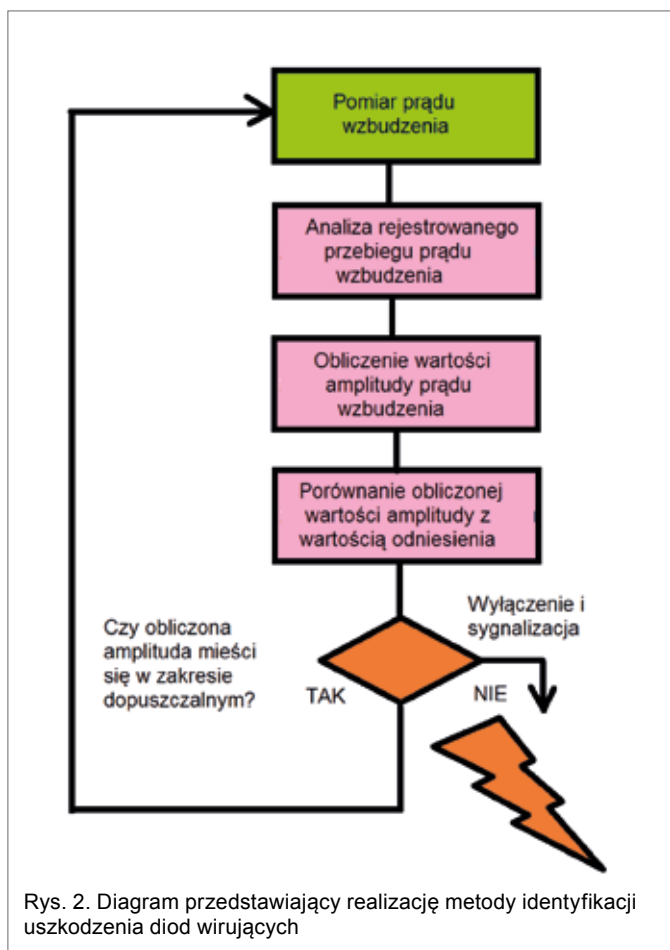
wystąpienia zwarcia lub przerwy w gałęzi mostka wyłączyć pracującą maszynę w określonym czasie, sygnalizując jednocześnie wystąpienie tego typu uszkodzenia.

Zabezpieczenie opracowane zostało w dwóch konfiguracjach jako integralna część regulatora układu zbudzenia, gdzie algorytm odpowiedzialny za detekcję uszkodzenia zaadaptowany został przez program główny regulatora (rys. 1). Drugim rozwiązaniem jest zabezpieczenie stanowiące samodzielną jednostkę polową, doposażoną w układ przetworników pomiarowych. Oba proponowane rozwiązania realizowane są w oparciu o sterownik DX 369-03 firmy Energotest Sp. z o.o. Zabezpieczenie umożliwia współpracę z regulatorami układu zbudzenia maszyn synchronicznych lub może pracować niezależnie, współpracując z systemem zabezpieczeń maszyny.

### 3. Metoda wykrywania uszkodzenia diody

Proponowana metoda identyfikacji uszkodzenia diody polega na detekcji pojawiającej się harmonicznej określonego rzędu w prądzie zbudzenia wzbudnicy i na podstawie jej amplitudy określeniu, czy doszło do uszkodzenia. Algorytm realizujący zaproponowaną metodę identyfikacji uszkodzenia diody przedstawiono w postaci diagramu na rys. 2.

Realizacja pomysłu sprowadza się do wykonania rozkładu w szereg Fouriera rejestrowanego przebiegu prądu zbudzenia wzbudnicy, w celu określenia amplitudy harmonicznej. Następnie wartość amplitudy zostaje poddana ocenie. Jeśli amplituda mieści się w przedziale wartości dopuszczalnych, zabezpieczenie zezwala na dalszą pracę maszyny, jeśli przekroczy wartość dopuszczalną, zabezpieczenie generuje impuls na wyłączenie.



Rys. 2. Diagram przedstawiający realizację metody identyfikacji uszkodzenia diod wirujących

Założeniem proponowanej metody jest detekcja określonej jednej harmonicznej bez badania całego widma przebiegu prądu wzbudzenia, co znacznie upraszcza algorytm oraz skracza czas obliczeń. Przyjęto założenia, iż amplituda szukanej harmonicznej w znaczącym stopniu zależy od rodzaju uszkodzenia, natomiast rząd szukanej harmonicznej ściśle związany jest z liczbą biegunów wzbudnicy, maszyny synchronicznej oraz z aktualną częstotliwością sieci zasilającej. Amplitudy harmonicznych obliczyć można z ogólnego wzoru:

$$A_n = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2} \quad (1)$$

Wyrazy  $a_n$  i  $b_n$  są składowymi ortogonalnymi szeregu Fourier'a obliczane według wzorów:

$$a_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \left( I_{ww_m} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot m \cdot n\right) \right) \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \left( I_{ww_m} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot m \cdot n\right) \right) \quad (3)$$

gdzie:

$N$  – ilość próbek na okres aktualnej częstotliwości sieci zasilającej;

$n$  – rząd harmonicznej;

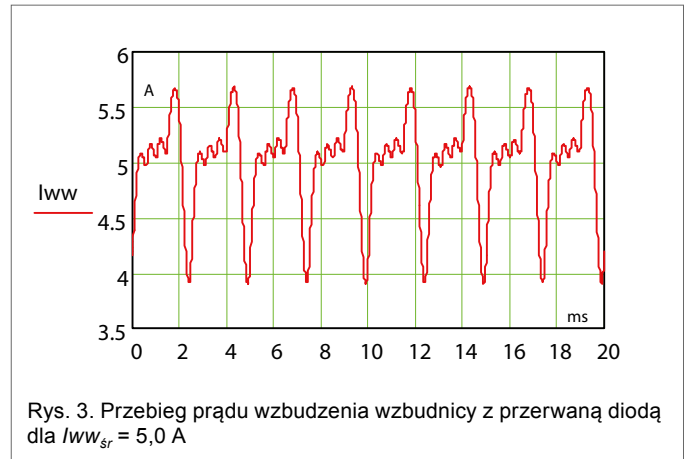
$m$  – kolejne wyrazy szeregu;

$I_{ww}$  – wartość prądu wzbudzenia wzbudnicy.

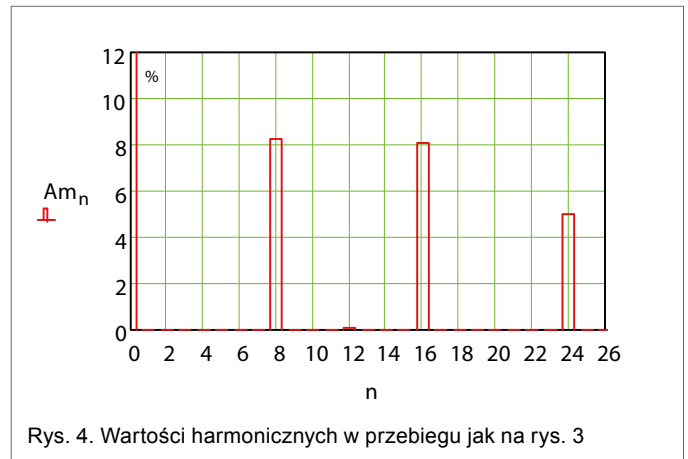
W celu potwierdzenia założeń w pierwszym etapie badań przy użyciu symulatora zamodelowano układ maszyny synchronicznej ze wzbudnicą bezszczotkową o liczbie biegunów  $2p = 16$ . Wykonano symulacje pracy układu z uszkodzeniem diody w wirującym prostowniku. Zarejestrowane przebiegi prądów wzbudzenia układu z rozwartą i zwartą diodą przedstawiono na rysunkach 3 i 5. Wykonano analizę zawartości harmonicznych dla obu rozpatrywanych przypadków (rys. 4 i 6). Na podstawie przeprowadzonej analizy potwierdzone zostały założenia, iż w przypadku uszkodzenia diody w widmie prądu wzbudzenia pojawiają się harmoniczne określonego rzędu. W rozpatrywanym przypadku pojawiła się harmoniczna rzędu 8 i jej wielokrotności. W przypadku zwarcia diody procentowa zawartość amplitudy harmonicznej odniesiona do wartości średniej prądu wzbudzenia  $I_{ww_{sr}} - Am_n$  sięgała 60%, a dla przerwy osiągała wartość ok. 8%. Oznacza to, że wartości amplitud mogą stanowić podstawę do określenia, czy doszło do uszkodzenia diody.

W drugim etapie wykonano układ modelujący przebieg prądu wzbudzenia wzbudnicy z uszkodzonym wirującym prostownikiem, którego schemat blokowy przedstawiono na (rys. 7). Człon pomiarowy regulatora wzbudzenia z wprowadzonym algorytmem detekcji harmonicznej określonego rzędu połączono z zaprojektowanym układem.

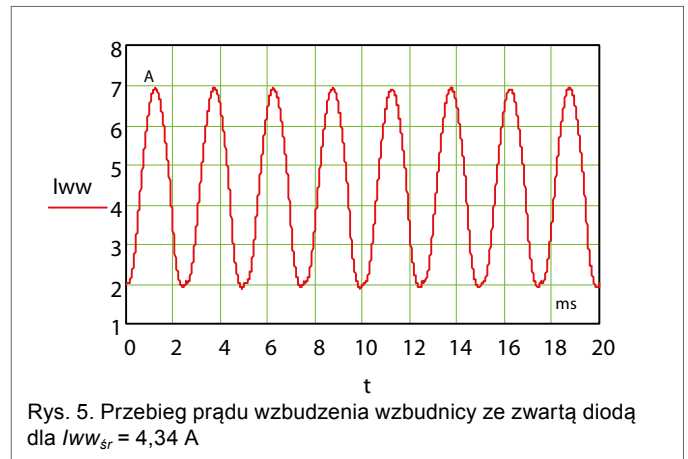
Na podstawie symulacji oraz badań laboratoryjnych potwierdzono, iż w przypadku uszkodzenia diody we wzbudnicy bezszczotkowej w widmie prądu wzbudzenia pojawiają się harmoniczne określonego rzędu o znacznej wartości amplitudy. Parametrami kryterialnymi dla detekcji właściwej harmonicznej są ilość biegunów wzbudnicy oraz maszyny synchronicznej oraz aktualna częstotliwość sieci zasilającej. Wykrycie prze-



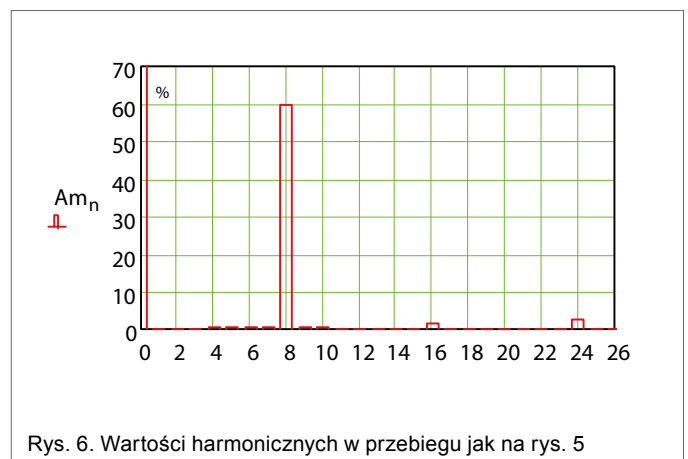
Rys. 3. Przebieg prądu wzbudzenia wzbudnicy z przerwaną diodą dla  $I_{ww_{sr}} = 5,0$  A



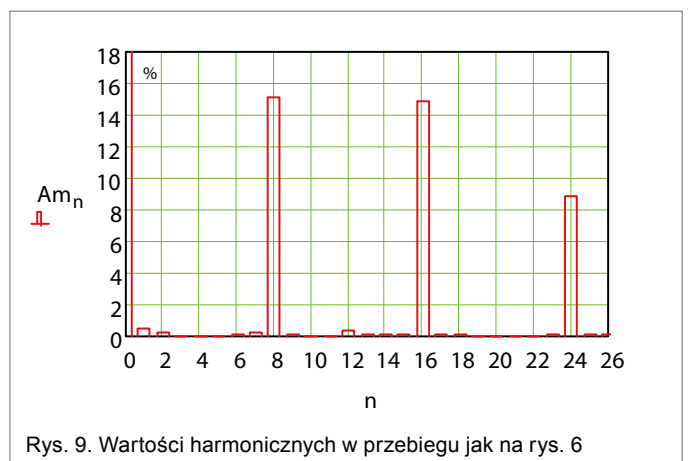
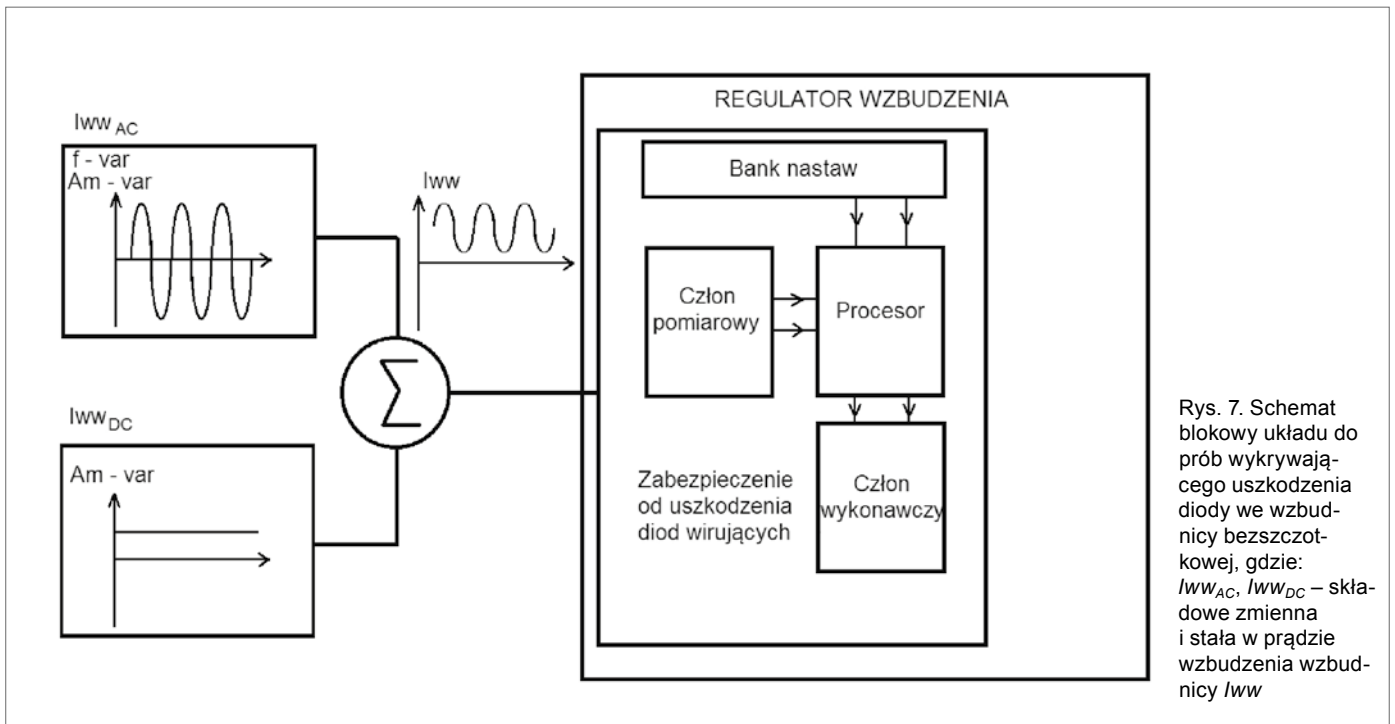
Rys. 4. Wartości harmonicznych w przebiegu jak na rys. 3



Rys. 5. Przebieg prądu wzbudzenia wzbudnicy ze zwartą diodą dla  $I_{ww_{sr}} = 4,34$  A



Rys. 6. Wartości harmonicznych w przebiegu jak na rys. 5



rwy i zwarcia w mostku prostowniczym bez wprowadzenia ww. parametrów do algorytmu uniemożliwia właściwą detekcję uszkodzenia.

#### 4. Realizacja projektu i ocena pracy zabezpieczenia

Regulator wzbudzenia z wprowadzonym algorytmem detekcji uszkodzenia diod wirujących uruchomiony został z silnikiem synchronicznym ze wzbudnicą bezszczotkową. Wykonano próby pracy układu bez uszkodzenia prostownika oraz z uszkodzonym (rozwarciem diody) prostownikiem wirującym. Podczas prób nie nastąpiło niepotrzebne pobudzenie zabezpieczenia w przypadku pracy sprawnego układu, natomiast w przypadku uszkodzenia diody nastąpiło pobudzenie zabezpieczenia i wyłączenie układu. Na rys. 8 przedstawiono zarejestrowany przebieg prądu wzbudzenia, a na rys. 9 wartości harmonicznych w zarejestrowanym przebiegu prądu.

Zarejestrowane przebiegi oraz wartości harmonicznych potwierdzają, iż w przypadku przerwy diody we wzbudnicy

w przebiegu prądu wzbudzenia pojawiają się charakterystyczne harmoniczne o znacznych amplitudach.

Podczas badań nie było możliwości przeprowadzenia próby funkcjonowania zabezpieczenia dla wzbudnicy ze zwartą diodą. Jednakże symulacje przeprowadzone na wstępnym etapie projektowania zabezpieczenia wykazały, iż w przebiegu prądu wzbudzenia dla stanu zwarcia także pojawiają się harmoniczne tego samego rzędu, co dla przypadku pracy z rozwartą diodą, a amplituda charakterystycznej harmonicznej jest nawet większa niż dla przypadku z rozwartą diodą.

mgr inż. Włodzimierz Garski – kierownik działu Automatyki Elektroenergetycznej, Energotest Sp. z o.o. Biuro Gdańsk, wgarski.energotest.com.pl, 80-308 Gdańsk, Polanki 12;  
mgr inż. Adam Maj – specjalista ds. Układów Energoelektronicznych, amaj.energotest.com.pl