

**Karol BEDNAREK**

EVER Sp. z o.o.

## **WZROST BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO POPRZEZ ZWIĘKSZANIE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW ZASILANIA ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ**

### **STRESZCZENIE**

W pracy przedstawiono zagadnienia bezpieczeństwa energetycznego o zasięgu lokalnym (w mikroskali – bezpośrednio użytkowników energii elektrycznej), związane z poprawą niezawodności systemów zasilania elektrycznego. Rozważane są układy redundantne systemów zasilania gwarantowanego UPS, których zadaniem jest zwiększenie pewności (niezawodności) zasilania elektrycznego zabezpieczanych odbiorników o znaczeniu priorytetowym poprzez wprowadzenie odpowiednich układów nadmiarowych jednostek zasilających (UPS). Analizie poddane są również układy pracy równoległej tych urządzeń, służące do kształtowania (zwiększania) obciążalności systemu zasilania elektrycznego. Opisano problematykę jakości energii elektrycznej i ważności tych zagadnień w zapewnianiu prawidłowej pracy zasilanych odbiorników energii. Przeanalizowano i skomentowano rezultaty przeprowadzonych badań fizycznych związanych z wprowadzeniem do układu zasilania odbiorników energii elektrycznej systemu zasilania gwarantowanego złożonego z sześciu równoległych pracujących UPS EVER POWERLINE GREEN 33.

## **IMPROVED POWER SAFETY BY INCREASING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS**

### **ABSTRACT**

The paper discusses the issues of power safety with local range of impact (in microscale - directly affecting users of electric energy) related to the improvement of reliability of power supply systems. The paper considers redundant UPS systems that serve to increase the certainty (reliability) of providing power to key receivers through the introduction of appropriate, redundant UPS units. The analysis also covers such units operating in parallel, for the purpose of shaping (increasing) load capacity that can be applied to such power supply systems. The issues related to the quality of electric energy has been described, along with the issue of importance of the quality in relation to ensuring the correct operation of receivers supplied by such systems. The results of physical examinations related to the introduction of a guaranteed power supply system, consisting of six EVER POWERLINE GREEN 33 UPS units operating in parallel, to a system providing power to receivers, have been examined and discussed.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo energetyczne, systemy zasilania gwarantowanego, jakość energii elektrycznej, niezawodność zasilania elektrycznego, układy redundantne, zwiększanie obciążalności systemu zasilania

**Key words:** energetic security, uninterruptible power systems, power quality, reliability of electric supply, redundant systems, increasing load capacity of power supply systems

## WPROWADZENIE

Działalność człowieka, zarówno w zakresie pracy zawodowej, jak również w życiu prywatnym, nierozdzielnie związana jest z wykorzystywaniem energii. We wszelkich obszarach funkcjonowania człowieka, nie tylko w sferze produkcji, ale również w jednostkach usługowych, administracyjnych, informacyjnych, szkołach, obiektach kultury, sił zbrojnych, policji, służby zdrowia itp. stosowane są urządzenia i systemy elektryczne, elektroniczne oraz informatyczne, które wymagają dostarczenia energii elektrycznej.

Prawidłowość funkcjonowania wszelkiego osprzętu elektrycznego i elektronicznego związana jest nierozdzielnie z jakością i pewnością zasilania, z oddziaływaniem zaburzeń przenoszonych przez wspólną sieć zasilającą oraz czynników środowiskowych, jak również ze stanem technicznym oraz obsługą i konserwacją eksploatowanych obiektów. Oprócz poprawności pracy wykorzystywanego w jednostkach gospodarczych sprzętu we wszystkich obszarach bardzo istotnym elementem jest optymalizacja kosztów eksploatacyjnych, związanych z własnościami funkcjonalnymi użytkowanych urządzeń, ale również kosztów wynikających z przestoju oraz strat powstających podczas awarii zasilania. Bardzo istotnym problemem staje się zatem konieczność zapewnienia prawidłowej, niezakłóconej pracy użytkowanych obiektów, czyli ich trwałości i niezawodności [1].

Liczba użytkowanych odbiorników elektrycznych we wszystkich jednostkach gospodarczych, jak również w życiu prywatnym człowieka ciągle wzrasta. Konieczne zatem staje się w wielu przypadkach stworzenie możliwości zwiększenia mocy systemów zasilania elektrycznego.

W pracy zajęto się poprawą jakości, wzrostem niezawodności oraz zwiększaniem obciążalności (pokrycia zapotrzebowanej mocy) systemów zasilania elektrycznego. Przedstawiono zagadnienia związane z wagą jakości dostarczanej do odbiorników energii. Odniesiono się do pracy urządzeń odbiorczych o znaczeniu priorytetowym oraz do systemów zasilania gwarantowanego (UPS) szczególnie zalecanych do wykorzystania w celach zasilania takich odbiorników. Zaprezentowano możliwości zwiększenia pewności działania (niezawodności) oraz rozszerzania mocy układów zasilania elektrycznego, głównie pod kątem zasilania gwarantowanego. Opisano rozwiązania najczęściej wykorzystywanych układów redundantnych. Zamieszczono i skomentowano rezultaty przeprowadzonych badań oraz pomiarów zrealizowanych w układach fizycznych. Obiektem badań były UPS EVER POWERLINE GREEN 33.

## **WAGA JAKOŚCI ENERGII W FUNKCJONOWANIU URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH**

Dla zapewnienia prawidłowej pracy odbiorników elektrycznych niezbędne (a wręcz konieczne) jest dostarczenie im energii elektrycznej o ściśle zdefiniowanych parametrach [5]. Najbardziej podstawowymi parametrami określającymi jakość dostarczanej energii elektrycznej są: wartość napięcia, jego częstotliwość, kształt przebiegu czasowego napięcia (jego odkształcenia od przebiegu sinusoidalnego) oraz ciągłość zasilania (przy zachowaniu określonych parametrów napięcia). Od jakości energii elektrycznej zależą: bezpieczeństwo, niezawodność i poprawność funkcjonowania zasilanych obiektów, ciągłość procesów technologicznych bądź przetwarzania informacji, ilość generowanego ciepła w urządzeniach oraz systemach, powstające straty energetyczne itp. [4].

Nieprawidłowości w jakości energii elektrycznej (zaburzenia) powstają w wyniku wzajemnych oddziaływań systemu elektroenergetycznego i odbiorników energii. Głównymi przyczynami powstania zaburzeń elektrycznych są: rosnąca liczba odbiorników nieliniowych, silne zagęszczenie urządzeń i systemów wzajemnie na siebie oddziałujących elektromagnetycznie, jak również dynamiczne przełączanie dużych obciążeń [6].

W obwodach elektrycznych wszelkich użytkowanych odbiorników energii panują określone napięcia i płyną prądy. Należy mieć na uwadze, że wszędzie, gdzie występuje napięcie (nagromadzenie ładunków elektrycznych), powstaje pole elektryczne, natomiast każdy przepływ prądu (ruch ładunku elektrycznego) jest źródłem powstania pola magnetycznego. Wytwarzane pola elektromagnetyczne oddziałują na występujące w otoczeniu obwody i urządzenia, w efekcie czego powstają zaburzenia, mogące prowadzić do zakłócenia prawidłowości funkcjonowania osprzętu elektrycznego [7]. Właściwe rozumienie i traktowanie tych zagadnień jest bardzo ważne dla użytkowników, ponieważ w wyniku nieprawidłowej jakości energii i oddziaływań zaburzeń może dochodzić do przerwania realizowanych procesów produkcyjnych, utraty przetwarzanych informacji i danych, niestabilnej pracy urządzeń elektrycznych i elektronicznych, migotania źródeł światła, nieprawidłowego funkcjonowania układów napędowych, powstania awarii osprzętu elektrycznego, generowania dodatkowych strat energetycznych oraz ciepła w urządzeniach i układach elektrycznych, powstania nadmiernych drgań mechanicznych i hałasu, zakłóceń poprawności pracy oraz przedwczesnego starzenia się osprzętu, zmiany parametrów technicznych oraz sprawności odbiorników, nieplanowanych wyłączeń odbiorników czułych na zmiany parametrów zasilania itp.

Burzliwy wzrost zastosowań zaawansowanych technicznie i często wrażliwych na jakość napięcia zasilającego urządzeń oraz systemów wpływa na wzrost znaczenia jakości energii elektrycznej [8]. Dlatego poprawa warunków zasilania elektrycznego odbiorników staje się coraz ważniejszym zagadnieniem, skłaniającym często użytkowników do inwestowania w systemy kondycjonowania energii.

## **URZĄDZENIA O ZNACZENIU PRIORYTETOWYM I SYSTEMY ZASILANIA GWARANTOWANEGO (UPS)**

Urządzeniami elektrycznymi o znaczeniu priorytetowym (strategicznym) są odbiorniki, w których niekontrolowane zaniki napięcia i przerwy w ich funkcjonowaniu mogą być źródłem poważnych strat ekonomicznych (finansowych), stanowić zagrożenie dla zdrowia lub życia człowieka albo mogą prowadzić do awarii osprzętu, nieodwracalnej utraty szczególnie ważnych przetwarzanych informacji i danych, jak również innych dotkliwych skutków dla ich użytkowników [4]. Kwalifikacja priorytetowego znaczenia odbiorników nie jest jednoznaczna, jest oceną subiektywną, a powinna być rezultatem wieloaspektowych analiz, jakie powinien przeprowadzić użytkownik.

Przykładami odbiorników o znaczeniu strategicznym są: zaawansowane urządzenia teleinformatyczne, centra przetwarzania danych, urządzenia medyczne (od działania których zależy bezpośrednio zdrowie lub życie człowieka), linie produkcyjne, w których nawet chwilowe przestoje stają się bardzo kosztowne (w tym związane z wytopem materiałów stałych), newralgiczne systemy bezpieczeństwa, itp.

W urządzeniach o znaczeniu priorytetowym poważnym problemem są często nagłe, niekontrolowane zaniki zasilania elektrycznego, nieprawidłowe parametry dostarczanej energii albo zakłócenia przenoszone przez sieć zasilającą. Większość użytkowników (głównie przedsiębiorcy) w celu ograniczenia do minimum niebezpieczeństw przerwania realizowanych procesów, powstania kosztownych przestojów w pracy urządzeń lub systemów, uszkodzeń osprzętu czy utraty bądź błędów przetwarzania informacji wywołanych zanikiem albo nieprawidłową jakością napięcia w sieci elektroenergetycznej decyduje się na instalowanie między systemem dystrybucji energii (układem zasilania sieciowego) a obciążeniami o znaczeniu strategicznym (czyli na wejściu tych odbiorników) układów zasilania gwarantowanego.

Systemy zasilania gwarantowanego (UPS) [10] są urządzeniami bądź grupami urządzeń, których podstawowym zadaniem jest dostarczenie energii elektrycznej o zadanych parametrach do zasilanych odbiorników w przypadkach zaników lub nieprawidłowości napięcia sieciowego (jego wartości i częstotliwości), dzięki wykorzystaniu energii zgromadzonej w akumulatorach (zasobnikach energii) oraz pracy wewnętrznych bloków przetwarzania zasilacza UPS. Ma to na celu ochronę zabezpieczanych urządzeń lub systemów przed niekontrolowanym zanikiem zasilania elektrycznego, czyli pozwala w bezpieczny, kontrolowany sposób zakończyć realizowane procesy. Czas podtrzymania zasilania rezerwowego (awaryjnego) zależy od ilości energii zgromadzonej w akumulatorach, od mocy odbiorników załączonych na wyjściu UPS, jak również w pewnym stopniu od parametrów środowiskowych i warunków użytkowania osprzętu. Wyróżnia się trzy zasadnicze topologie (typy rozwiązań konstrukcyjnych) zasilaczy UPS:

- VFD (Voltage Frequency Dependent) – off-line – w których wartość i częstotliwość napięcia wyjściowego (dostarczanego do odbiorników) zależą od parametrów napięcia wejściowego (sieciowego, zasilającego UPS). W trybie pracy sieciowej (normalnej) niekorygowane napięcie sieciowe, po odfiltrowaniu ewentualnych przepięć i zakłóceń radioelektrycznych, dostarczane jest do odbiorników. Gdy wartość lub częstotliwość napięcia sieciowego przekroczą dopuszczalne, tolerowane zakresy, zasilacz przechodzi w

tryb rezerwowy (baterijny) i zgromadzona w akumulatorach energia, po przetworzeniu przez falownik, dostarczana jest do odbiorników. Ponieważ ma miejsce przełączenie z pracy sieciowej na falownikową, powstaje krótka (rzędu kilku ms) przerwa w zasilaniu.

- VI (Voltage Independent) – line interactive – w których wartość napięcia na wyjściu nie zależy od napięcia wejściowego, natomiast częstotliwość zależy. Zasada ich funkcjonowania jest podobna do zasilaczy VFD, ale zastosowany jest w nich dodatkowo układ AVR (Automatic Voltage Regulation), czyli regulator poziomu napięcia wyjściowego. Zazwyczaj synchronizują wytwarzane przebiegi przed zmianą trybu pracy, a czas przełączenia na pracę rezerwową jest w nich krótszy.
- VFI (Voltage Frequency Independent) – on-line – w których wartość i częstotliwość napięcia wyjściowego nie zależą od napięcia wejściowego. Ma w nich miejsce podwójne przetwarzanie energii. Polega to na tym, że w trybie pracy sieciowej (normalnej) napięcie sieciowe zostaje wyprostowane przez układy wejściowe zasilacza, a następnie magistralą stałoprądową dostarczone do falownika, gdzie zostaje przetworzone na napięcie sinusoidalne o założonych (bardziej korzystnych) parametrach. Część energii z magistrali stałoprądowej wykorzystywana jest na doładowanie akumulatorów (utrzymanie ich w stanie pełnego naładowania). Gdy napięcie sieciowe zanika bądź jego parametry wykraczają poza tolerowane zakresy, zasilacz przechodzi w tryb rezerwowy i wykorzystując energię zawartą w akumulatorach (po przetworzeniu przez falownik) zasilają zabezpieczone odbiorniki. Odbywa się to całkowicie bezprzerwowo, ponieważ w magistrali stałoprądowej zanikło tylko jedno z dwóch źródeł napięcia stałego (brak jest wyprostowanego napięcia sieciowego, lecz aktywne są akumulatory). Wielkimi korzyściami w przypadku tego typu zasilaczy są: zasilanie odbiorników napięciem o lepszych, ściśle kontrolowanych parametrach oraz eliminacja oddziaływań zaburzeń sieciowych na zabezpieczone odbiorniki w wyniku separacji energetycznej obwodów wejściowego i wyjściowego UPS (efektu podwójnego przetwarzania energii) [10].

Zdecydowanie najkorzystniejszym rozwiązaniem konstrukcyjnym, szczególnie przydatnym do zasilania odbiorników o znaczeniu priorytetowym, są zasilacze VFI (on-line). Znacznie bardziej zaawansowane technicznie bardzo często oferują wiele dodatkowych funkcjonalności, dzięki którym osiąga się zwiększenie niezawodności (bezpieczeństwa i poprawności działania) urządzeń, szersze możliwości wyboru sposobu zarządzania pracą systemu zasilania wrażliwych odbiorników energii, jak również walory ekonomiczne w postaci realnych oszczędności finansowych (będących efektem racjonalnego gospodarowania energią) [2].

## **OBCIĄŻALNOŚĆ SYSTEMÓW ZASILANIA AWARYJNEGO**

Podstawowymi wielkościami przy doborze systemów zasilania gwarantowanego są: moc zabezpieczanych odbiorników, oczekiwany czas podtrzymania zasilania w trybie rezerwowym (baterijnym – związany z doбором liczby i pojemności wykorzystywanych akumulatorów), a także ilość faz na wejściu i wyjściu UPS. Właściwy dobór zasilacza w zakresie zapotrzebowanej przez odbiorniki mocy pozwala osiągnąć optymalną sprawność układu zasilania, co jest związane z prawidłowością gospodarowania energią i osiąganiem korzyści ekonomicznych. W przypadku rozbudowy odbiorników o znaczeniu priorytetowym

pokrycie większej zapotrzebowanej mocy realizowane jest często poprzez wymianę zasilacza UPS na jednostkę o wyższej mocy znamionowej bądź odrębne zasilenie dołączonego osprzętu przez dodatkowo dobrany UPS. W wielu sytuacjach znacznie korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie zasilaczy UPS pracujących równolegle i w ten sposób osiągnięcie przez układ wymaganego poziomu obciążalności. Należy mieć na uwadze, że równolegle mogą pracować wyłącznie takie same jednostki UPS, a jednocześnie prawidłowo precyzyjnie zsynchronizowane. Wynika jednak stąd, że wygodnym sposobem kształtowania obciążalności systemu zasilania gwarantowanego jest równoległe łączenie kilku zasilaczy UPS.

Dzięki pracy równoległej UPS można osiągnąć także zwiększenie niezawodności (pewności działania) układów zasilania gwarantowanego, co zostanie szerzej przedstawione w następujących rozdziałach niniejszej pracy.

Podsumowując przeprowadzone rozważania można stwierdzić, że równoległe łączy się zasilacze UPS w celu [3]:

- kształtowania (zwiększenia) obciążalności systemu, czyli całkowitej mocy dostarczanej do zabezpieczanych odbiorników,
- osiągnięcia wyższej niezawodności systemu zasilania.

## **ZWIĘKSZANIE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW ZASILANIA GWARANTOWANEGO**

Każdy obiekt fizyczny podlega oddziaływaniu określonych czynników wymuszających i funkcjonalnych (wynikających z warunków jego pracy) oraz środowiskowych, jak również wpływowi różnorodnych zjawisk fizycznych, zatem jego stan ulega degradacji, co w konsekwencji prowadzi do jego uszkodzeń (w przypadku urządzeń technicznych do pogorszenia warunków pracy bądź ich awarii). Obszar analiz naukowych, badań inżynierskich i wszelkich działań związanych z dążeniem do zapewnienia prawidłowego, niezakłóconego funkcjonowania elementów i systemów technicznych (spełniania przez nie na wymaganym poziomie wszystkich powierzonych im funkcji i czynności) nazywany jest niezawodnością obiektów [9]. Niezawodność elementów i urządzeń związana jest z procesem projektowania, z jakością materiałów wykorzystanych do produkcji danego obiektu, z zastosowanymi technologiami, z procesami eksploatacji i konserwacji, jak również oddziaływaniem czynników zewnętrznych (wpływem innych obiektów, oddziaływaniem zaburzeń oraz warunków środowiskowych).

W przypadku obiektów o znaczeniu priorytetowym (strategicznym) dążenie do osiągnięcia odpowiednio wysokiego poziomu niezawodności ich funkcjonowania realizowane jest często poprzez zwielokrotnienie ich niewrażliwych elementów bądź całych systemów. Wprowadzenie elementów dodatkowych, nadmiarowych w stosunku do tego, co jest niezbędne nazywa się redundancją [3]. Redundancja w obiektach wprowadzana jest, aby w przypadku wystąpienia awarii określonych układów wykorzystać elementy nadmiarowe i uzyskać nieprzerwaną, prawidłową pracę rozpatrywanego systemu.

Redundancja może wiązać się z nadmiarem zbędnym bądź szkodliwym, nieuzasadnionym zużywającym zasoby lub wprowadzającym dodatkowe straty albo koszty, jak również może być pożądana (a niejednokrotnie wręcz konieczna), wprowadzona celowo i świadomie dla zapewnienia – nawet w przypadkach uszkodzenia części systemu – poprawnej, nieprzerwanej,

niezakłóconej pracy obiektów o szczególnym, priorytetowym, a częstokroć strategicznym dla użytkownika znaczeniu. Wprowadzanie elementów nadmiarowych zabezpiecza przed powstaniem skutków niekontrolowanych przerw funkcjonowania wykorzystywanych obiektów, takich jak utrata przetwarzanych informacji, powstawanie dotkliwych strat finansowych lub zasobowych w wyniku awarii urządzeń, zagrożenie dla zdrowia bądź życia ludzi w określony sposób związanych z rozważanymi obiektami itp. Z tych względów, w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa załamania pracy systemu, coraz powszechniej stosuje się zdublowanie bądź zwielokrotnienie krytycznych elementów systemu, czyli jego redundancję. W przypadku układów redundantnych niezwykle istotnym problemem jest eliminacja tzw. pojedynczych punktów awarii. Pojedynczym punktem podatności na awarię (ang. SPOF) jest dowolny element konfiguracji systemu redundantnego, który nie podlegał zwielokrotnieniu i dla którego nie zaimplementowano mechanizmów przeciwdziałania skutkom jego usterek, jest wspólnym dla struktur redundantnych, a jego uszkodzenie może doprowadzić do awarii i braku wypełniania założonych funkcji przez obiekt (system) o znaczeniu krytycznym (priorytetowym). Pojedynczym punktem awarii może być człowiek, element procesu lub czynności, jak również komponent infrastruktury.

Ogólnie rzecz ujmując maksymalną niezawodność obiektów osiąga się poprzez:

- wprowadzenie mechanizmów podtrzymujących funkcjonowanie tych obiektów nawet w przypadkach awarii ich poszczególnych elementów składowych (redundancji),
  - minimalizację liczby pojedynczych punktów awarii w środowisku rozważanych obiektów.
- Zagadnienia niezawodności urządzeń mają szczególny wymiar w systemach zasilania energią elektryczną, a jeszcze większej istotności nabierają w układach zasilania gwarantowanego, przez które z samego założenia dostarczana jest energia do obiektów o wysokim priorytecie zapewnienia ich prawidłowej, niezakłóconej pracy. Zasilacze bezprzerwowe UPS, podobnie jak każde inne urządzenie techniczne, mogą ulec uszkodzeniu i wówczas powstałoby niebezpieczeństwo wystąpienia przerwy w zasilaniu priorytetowych odbiorników. Z tego względu w przypadku zasilania odbiorników wymagających szczególnie wysokiego poziomu niezawodności pracy realizowane są układy redundantne urządzeń zasilania gwarantowanego (UPS). Rozwiązania konstrukcyjne poprawiających niezawodność zasilania elektrycznego układów redundantnych UPS wykorzystywanych w praktyce związane są z jednej strony z oczekiwanym poziomem niezawodności zasilania zabezpieczanych odbiorników oraz możliwościami eliminacji pojedynczych punktów awarii, z drugiej natomiast z kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi powstającej rozbudowanej struktury zasilania.

## **ROZWIĄZANIA I WŁASNOŚCI UKŁADÓW REDUNDANTNYCH UPS**

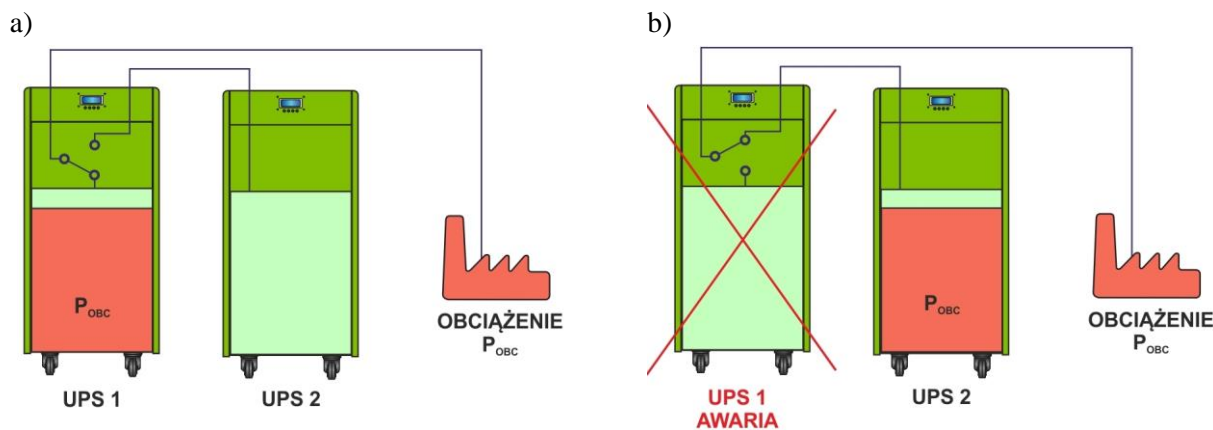
Podstawową strukturą zasilania gwarantowanego jest praca zasilacza UPS bądź równolegle połączonych zasilaczy UPS dobranych w ten sposób, że w pełni pokrywają zapotrzebowanie energetyczne zabezpieczanych odbiorników. Według kanonów funkcjonowania systemów zasilania gwarantowanego moc załączanych na wyjściu UPS odbiorników nie powinna przekraczać 80% mocy znamionowej zasilacza, aby w sytuacji powstania przypadkowych

chwilowych przeciążeń zasilacz nie przechodził w tryb awaryjny, lecz nieprzerwanie zasiliał podłączone do jego wyjścia urządzenia. Jest to tzw. struktura wydajnościowa (oznaczana jako N) bez nadmiarowości jednostek zasilających – prosta, relatywnie tania, optymalna energetycznie (z uwagi na dopasowanie mocy do obciążenia), lecz w przypadku awarii UPS niezawodność zasilania ograniczona jest w niej do poziomu niezawodności oferowanej przez sieć energetyczną. Analogicznie sprawa niezawodności wygląda podczas czynności konserwacyjnych, przy przełączeniu na bypass serwisowy. Jest to konfiguracja spełniająca najniższy poziom wymagań niezawodnościowych w zakresie zapewniania ochrony odbiorników o znaczeniu priorytetowym.

W wielu przypadkach istnieje potrzeba zwiększenia poziomu niezawodności zasilania poprzez wprowadzenie nadmiarowości jednostek zasilających (redundancji), przy uwzględnieniu eliminacji pojedynczych punktów podatności na awarię. Wiąże się to zawsze z powstaniem dodatkowych kosztów: inwestycyjnych, związanych z zakupem elementów i jednostek nadmiarowych, jak również eksploatacyjnych, wynikających z ich pracy i obsługi (głównie konserwacji oraz wymiany akumulatorów). Należy jednak mieć na uwadze, że koszty usuwania skutków niekontrolowanego przerwania zasilania odbiorników o znaczeniu priorytetowym (bez możliwości bezpiecznego zakończenia realizowanych funkcji lub procesów) są często wielokrotnie wyższe od wspomnianych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Ponadto część z tych skutków może być nieprzeliczalna ekonomicznie, jak np. utrata przetwarzanych informacji (będących czasami czynnikiem egzystencjalnym dla firmy) czy uszczerbek na zdrowiu człowieka (powstały np. w wyniku awarii aparatury medycznej). Wybór najkorzystniejszego rozwiązania układu redundantnego jest zatem zawsze kompromisem między oczekiwanym poziomem niezawodności (kosztami eliminacji skutków nieprzewidzianego zaniku zasilania) a powstającymi kosztami dodatkowymi rozbudowy systemu zasilania [3].

**I. Układ zasilania gwarantowanego redundantny szeregowy** (nazywany także „pracą w gorącej rezerwie”, układem z redundancją bierną albo redundantnym izolowanym) o konfiguracji N+1 stanowi jedną z najprostszych struktur redundantnych. Zasilanie zabezpieczanych odbiorników realizowane jest wyłącznie przez UPS główny (będący zasilaczem podstawowym). W statyczny tor obejściowy zasilacza głównego (rys. 1a) włączony jest UPS nadmiarowy (będący zasilaczem podrzędnym), który pracuje jałowo (nie jest obciążony). W przypadku awarii zasilacza głównego następuje przełączenie obciążenia na jego statyczny tor obejściowy i zasilacz podrzędny (nadmiarowy) w pełni przejmuje zasilanie odbiorników, natomiast UPS główny zostaje odłączony (rys. 1b). Parametry wykorzystywanych zasilaczy mogą się różnić, jednakże każdy z nich musi w pełni pokryć moc zapotrzebowaną przez zasilane odbiorniki.





Rys. 1. Układ zasilania redundantny szeregowy (1+1)

a) praca normalna systemu, b) praca systemu podczas awarii zasilacza głównego (UPS 1)

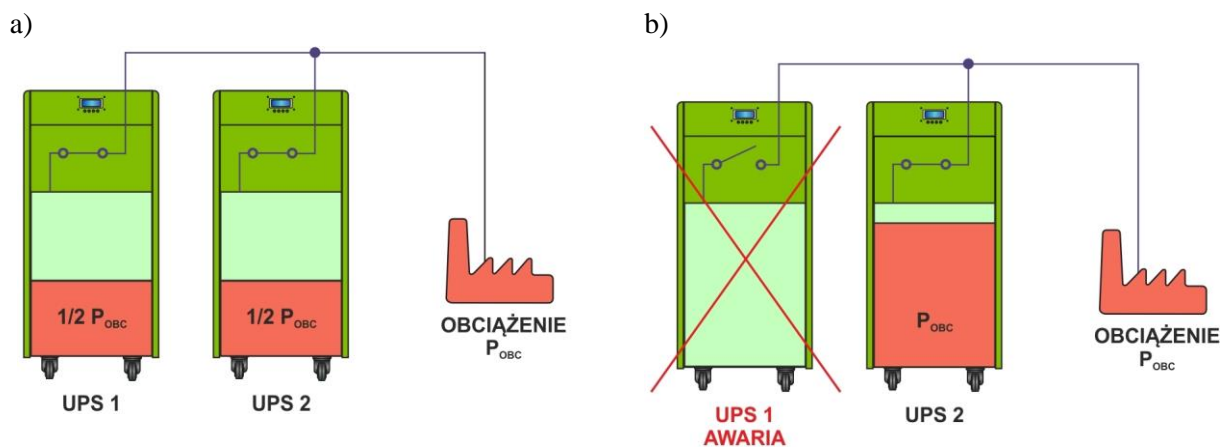
Najważniejszą zaletą układu szeregowego jest możliwość wykorzystania różnych zasilaczy zarówno w zakresie parametrów i wydajności, jak również co do marek i modeli. Wiąże się to dodatkowo z korzyścią w postaci możliwości wprowadzenia redundancji systemu, który jej wcześniej nie miał – przez dołączenie UPS nadmiarowego. Układ ten może charakteryzować się wyższą sprawnością ze względu na pełne obciążenie pracującego UPS (należy jednak uwzględnić, że UPS podrzędny pracuje jałowo, więc generuje także pewne straty z tym związane). Zdecydowanie prostsze w tym rozwiązaniu są również warunki synchronizacji UPS-ów (ograniczające się wyłącznie do synchronizacji fazy wytwarzanych napięć).

Jako główną wadę układu można uznać konieczność zapewnienia odporności zasilacza podrzędnego na nagły skok obciążenia w momencie eliminacji uszkodzonego UPS głównego i przełączania się na zasilacz nadmiarowy (podrzędny). W przypadku łączenia różnych zasilaczy jako UPS nadmiarowy należy wybrać urządzenie o wyższej mocy, a przede wszystkim odporne na dynamiczne zmiany nawet pełnego obciążenia. Niekorzystnym elementem może być także możliwość powstania krótkiej (rzędu ms) przerwy w zasilaniu urządzeń odbiorczych, związanej z przełączaniem się z UPS głównego na podrzędny – zarówno podczas awarii zasilacza głównego, jak również podczas prac serwisowych. Należy również wziąć pod uwagę, że w UPS nadmiarowym powstają energetyczne straty jałowe, wynikające z jego ciągłej gotowości do pracy. Układ ten zawiera więcej pojedynczych punktów awarii.

**II. Układ zasilania gwarantowanego redundantny równoległy** (system z redundancją czynną) o konfiguracji N+1 jest rozwiązaniem, w którym UPS nadmiarowy jest włączony równoległe do zasilacza bądź zasilaczy, które normalnie w pełni pokrywają zapotrzebowaną moc, przejmując część obciążenia całego systemu (rys. 2a – przykład układu o konfiguracji 1+1). W łatwy sposób można jeszcze dodatkowo zwiększyć poziom niezawodności systemu, co odbywa się przez równoległe dołączenie kolejnych jednostek nadmiarowych, uzyskując system redundantny o konfiguracji N+2, N+3 itp. W celu zapewnienia prawidłowej pracy systemu łączone są zasilacze o identycznych parametrach i ich praca jest w pełni synchronizowana. W efekcie wszystkie zasilacze (łącznie z nadmiarowymi) obciążane są równomiernie. Ponieważ wprowadzona jest nadmiarowość jednostek UPS, to zasilacze w normalnym stanie systemu pracują przy niższym obciążeniu od znamionowego (w układzie z

rys. 2a oba zasilacze obciążone są połową ich zalecanej mocy). W przypadku uszkodzenia którejkolwiek z jednostek składowych (rys. 2b) pozostałe bezprzerwowo przejmują obciążenie (nadal równomiernie rozłożone na wszystkie pozostałe jednostki) i następuje to w łagodniejszy sposób niż w sytuacji układu szeregowego. Jednostka uszkodzona zostaje odłączona od systemu. Po uszkodzeniach i eliminacji kolejnych jednostek odbiorniki są nieprzerwanie zasilane dopóki moc pozostałych jednostek w pełni pokrywa założoną całkowitą moc obciążenia. Systemy takie budowane są przez łączenie klasycznych zasilaczy awaryjnych bądź przy wykorzystaniu UPS modułowych.

Jedną z najistotniejszych zalet tego rozwiązania jest możliwość rozbudowy systemu zarówno w zakresie jego niezawodności, jak również wydajności (pokrycia większego zapotrzebowania na dostarczaną moc) przez dołączanie dodatkowych jednostek. Musi jednak zostać zadeklarowane, ile z połączonych jednostek pracuje jako podstawowe (w pełni zabezpieczające zakładane obciążenie), a ile funkcjonuje jako nadmiarowe. Ważne jest jednak, że w tej samej instalacji można skonfigurować większą liczbę zasilaczy. Kolejną zaletą jest zupełnie bezprzerwowe zasilanie odbiorników podczas eliminacji jednostek nadmiarowych ulegających uszkodzeniu (następuje tylko odłączenie wadliwej jednostki z pracującego systemu, a nie ma zwłoki czasowej wynikającej z przełączania zasilania z jednego UPS na drugi). Bardzo ważnym elementem jest także możliwość bezprzerwowego serwisowania układu poprzez kolejne odłączanie i konserwowanie pojedynczych jednostek, przy zachowaniu niezakłóconej pracy całego systemu. Istotną korzyścią tego układu jest także zwiększenie trwałości podzespołów funkcjonalnych wykorzystywanych zasilaczy z uwagi na występowanie niższych prądów roboczych (niepełnego ich obciążenia), a jednocześnie wydłużenie żywotności akumulatorów dzięki korzystniejszym warunkom ich pracy w trybie rezerwowym (podczas gdy każda z jednostek składowych systemu ma własne akumulatory). Układ ten stanowi ekonomiczny, a zarazem prosty koncepcyjnie system.



Rys. 2. Układ zasilania redundantny równoległy (1+1)

a) praca normalna systemu, b) praca systemu podczas awarii jednego z zasilaczy

Do niekorzystnych czynników ich funkcjonowania zaliczyć należy możliwość wykorzystania wyłącznie takich samych zasilaczy (o identycznych parametrach), bardziej skomplikowane technicznie warunki współpracy jednostek wchodzących w skład systemu, a także osiągnięcie

niższych sprawności układu ze względu na pracę przy częściowym (niepełnym) obciążeniu [3].

### **III. Inne struktury redundantne systemów zasilania gwarantowanego**

W przypadkach zasilania odbiorników priorytetowych o szczególnie wysokich wymaganiach niezawodnościowych realizowane są również bardziej skomplikowane i zaawansowane technicznie układy redundantne, dzięki którym osiąga się jeszcze wyższe poziomy niezawodności bądź dodatkowe korzyści, ale odbywa się to kosztem kolejnych znacznych nakładów finansowych, a czasami dodatkowo w bardziej rozbudowanych sieciach zasilających.

Na wyróżnienie w tych rozważaniach zasługuje struktura redundantna „system + system”, gdzie wykorzystywane są dwie odrębne sieci zasilające, do których dołączone są odrębne układy zasilania gwarantowanego. Funkcjonuje ona w różnych konfiguracjach (np.  $2(N+1)$ ,  $2N+1$  czy  $2N$ ) i umożliwia konstruowanie systemów, w których może nigdy nie być potrzeby przełączenia odbiorników na zewnętrzną sieć zasilającą. Ma w niej miejsce pełna nadmiarowość elementów systemu na całej linii: od sieci elektroenergetycznej do podłączenia obciążeń o znaczeniu krytycznym (priorytetowym). Osiąga się w niej najwyższy poziom niezawodności dzięki eliminacji zdecydowanej większości pojedynczych punktów awarii. Jest jednak niezwykle skomplikowana technicznie i bardzo kosztowna. Ponadto występują w niej wyższe straty energii spowodowane niepełnym obciążeniem wykorzystywanych zasilaczy w normalnych warunkach pracy. Wśród innych stosowanych rozwiązań o zwiększonej niezawodności spotykane są również struktury typu Y, układy redundantne rozproszone, mieszane itp.

Podczas doboru struktur redundantnych bardziej rozbudowanych, zaawansowanych technicznie należy znaleźć kompromis między uzyskiwaną dodatkową odpornością systemu na awaryjne wyłączenie zasilania a wzrostem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, jak również zwiększeniem prawdopodobieństwa uszkodzenia jednostki w systemie (z uwagi na wzrost ilości stosowanych urządzeń).

W praktyce najczęściej wykorzystywane są struktury redundantne równoległe, przy czym często pokrycie zakładanej mocy zabezpieczanych odbiorników realizowane jest przez kilka łączonych równoległe jednostek podstawowych, dzięki czemu redundancję uzyskuje się przez dołączanie jednostek nadmiarowych o mniejszych mocach.

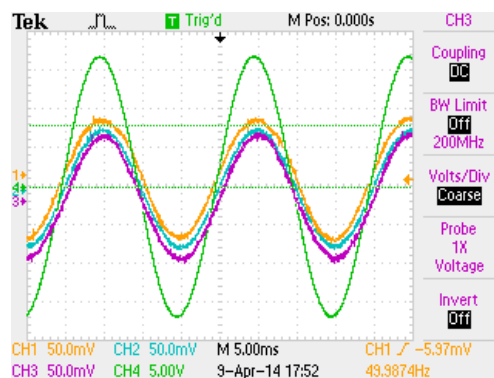
### **WYNIKI BADAŃ**

Obiektem badań jest zespół zasilaczy UPS EVER POWERLINE GREEN 33. Moc wyjściowa (pozorna / czynna) każdego UPS o trójfazowym zasilaniu i trójfazowym napięciu na wyjściu wynosi 20 kVA / 16 kW. W urządzeniach tych, poza licznymi dodatkowymi funkcjonalnościami, wprowadzono możliwość realizacji pracy równoległej (do 6 jednostek) – w zależności od potrzeb – w celu uzyskania większej niezawodności systemu (redundancji) lub zwiększenia obciążalności układu zasilania. Badania zrealizowano na systemie składającym się sześciu równoległe połączonych UPS (rys. 3).



Rys. 3. Badane podczas pracy równoległej zasilacze UPS EVER POWERLINE GREEN 33 z podłączonymi miernikami

Podczas pracy równoległej elementów systemu zasilania elektrycznego o napięciu sinusoidalnie zmiennym bardzo ważnym czynnikiem jest właściwy dobór łączonych źródeł oraz precyzyjna synchronizacja przebiegów napięć wytwarzanych przez poszczególne jednostki składowe. Jest to konieczne w celu eliminacji możliwości powstania przepływu prądów wewnętrznych między łączonymi w system jednostkami składowymi – aby uniknąć strat energetycznych, jak również zagrożeń powstania awarii takiego układu zasilania. Pozytywnym skutkiem poprawnie dobranych i wysterowanych źródeł pracujących w układzie równoległym jest osiągnięcie równomiernych prądów obciążenia poszczególnych jednostek. W celu sprawdzenia prawidłowości pracy badanego systemu zrealizowano badania napięcia w układzie równolegle połączonych sześciu zasilaczy UPS EVER POWERLINE GREEN 33 oraz prądów pobieranych z poszczególnych jednostek składowych przez załączony odbiornik energii. Na rys. 4 zamieszczono zarejestrowane za pomocą oscyloskopu przebiegi napięcia na wyjściu układu oraz prądów odpowiadających sobie faz (L1) trzech z sześciu równolegle pracujących zasilaczy UPS.

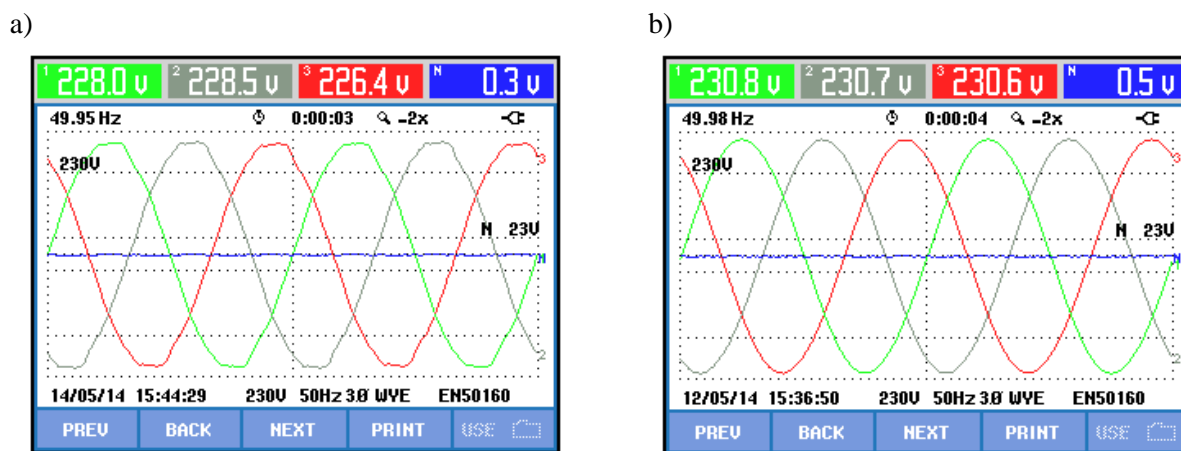


Rys. 4. Przebiegi napięcia oraz prądów na trzech z sześciu równolegle pracujących UPS

Na wszystkich elementach układu równoległego panuje to samo napięcie, natomiast analizując przebiegi prądów na rys. 4 zauważyć można, że wszystkie trzy UPS obciążone są równomiernie (analogicznie sprawa przedstawia się na kolejnych trzech z sześciu UPS). W praktyce przebiegi prądów niemalże pokrywają się – w celu ich zaprezentowania na ekranie oscyloskopu zostały nieco przesunięte względem siebie w pionie.

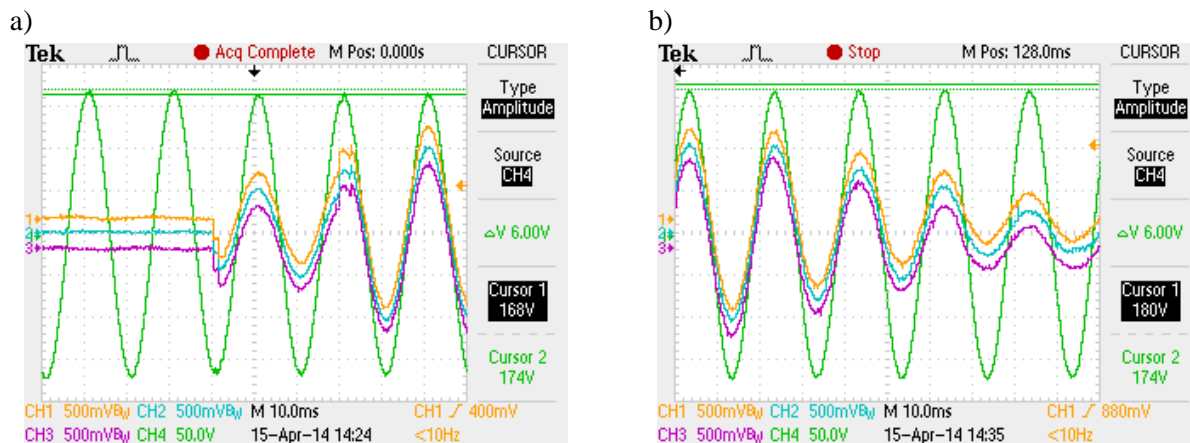
UPS poprawia jakość i przebieg napięcia zasilającego zabezpieczone odbiorniki. Porównanie przebiegów napięcia sieciowego oraz wyjściowego z UPS przedstawiono na rys. 5. Szczyty przebiegów napięcia sieciowego (rys. 5a) są spłaszczone, z odkształceniami, natomiast kształt napięć na wyjściu UPS (rys. 5b) jest sinusoidalny, niezakłócony. Zabezpieczone odbiorniki zasilane są zatem napięciem o znacznie korzystniejszych parametrach. Ma to pozytywny wpływ na prawidłowość pracy odbiorników oraz na powstające straty energetyczne.

W pracy systemów zasilania ważne jest również zachowanie się wartości i przebiegu napięcia podczas wystąpienia dynamicznych zmian obciążenia w układzie. Na rys. 6 zamieszczono rezultaty badań stabilności wartości napięcia podczas nagłego przełączania obciążeń o wartości prądu fazowego  $I_f = 45$  A. Zarówno w momentach załączania, jak i wyłączenia obciążenia chwilowa zmiana wartości napięcia (krótkotrwanie) wynosiła zaledwie 6 V (dotyczy to amplitudy), po czym ponownie następowała jego stabilizacja. Dopuszczalna normatywnie zmiana jest ponad pięciokrotnie wyższa, co świadczy o bardzo dobrych warunkach pracy zapewnianych zasilanym odbiornikom.



Rys. 5. Przebiegi napięć trójfazowych

a) na wejściu UPS (sieciowych), b) na wyjściu UPS (dostarczanych do odbiorników)



Rys. 6. Zmiana wartości napięcia na wyjściu UPS pracujących równolegle przy skokowym  
a) załączeniu prądu obciążenia, b) wyłączeniu prądu obciążenia

Przy nagłej, dynamicznej zmianie poboru mocy od zera do pełnego obciążenia i odwrotnie realizowanej dla pojedynczego UPS EVER POWERLINE GREEN 33 chwilowa zmiana napięcia wyjściowego nie przekraczała 12 V (dla amplitudy), czyli była około trzykrotnie niższa od dopuszczalnej. Potwierdza to słuszność wcześniej wysuniętego wniosku.

## UWAGI I WNIOSKI

- Wprowadzenie pracy równoległej zasilaczy bezprzerwowych stwarza możliwość osiągnięcia dużej łatwości dostosowania systemu zasilania gwarantowanego do rosnącego zapotrzebowania energetycznego urządzeń odbiorczych o znaczeniu priorytetowym (skalowalności mocy systemu), a także dużej elastyczności w kształtowaniu poziomu bezpieczeństwa (niezawodności) rozpatrywanych systemów (ich redundancji). W UPS pracujących równolegle prąd obciążenia rozkłada się równomiernie na poszczególne jednostki składowe.
- Zasilacze UPS poprawiają jakość (kształt i wartość) oraz stabilność napięcia dostarczanego do odbiorników (nawet przy skokowych zmianach obciążenia).
- Układy zasilania rezerwowego (UPS) są bardzo ważnym elementem systemów zasilających, wykorzystywanym w celu osiągnięcia pewności i prawidłowości funkcjonowania zabezpieczanych odbiorników.
- Zastosowanie systemów zasilania gwarantowanego w układach zasilania odbiorników o znaczeniu strategicznym (szczególnie wrażliwych na oddziaływania nieprawidłowości napięcia zasilającego, jak również zaburzeń przenoszonych sieciowo), umożliwia zabezpieczenie tych obiektów przed powstaniem poważnych konsekwencji (wynikających z braku bądź nieprawidłowości zasilania elektrycznego) w postaci utraty przetwarzanych informacji, powstawania dodatkowych strat mocy, zakłóceń poprawnego funkcjonowania podzespołów elektrycznych lub elektronicznych, uszkodzeń bądź zmiany parametrów technicznych oraz sprawności odbiorników, powstawania kosztownych przestojów w pracy urządzeń, utraty możliwości skorzystania z urządzeń kontroli dostępu (jak np. automatyczne drzwi, okna, bramy, windy), uniemożliwienia prawidłowego funkcjonowania systemów grzewczych, przyspieszonego starzenia się osprzętu itp.

- Jakość zasilania elektrycznego odbiorników oraz wprowadzenie układów redundantnych mają znaczący wpływ na prawidłowość pracy, pewność funkcjonowania, bezpieczeństwo i trwałość urządzeń (aspekty techniczne), jak również ciągłość procesów produkcyjnych lub przetwarzania danych czy powstające straty energetyczne (walory ekonomiczne).

## Literatura

1. Bednarek K., *Jakość, pewność i właściwa konstrukcja układu zasilania a bezpieczeństwo urządzeń elektrycznych*, „Elektro.info” 2012, nr 12, s. 26-31.
2. Bednarek K., *Kompensacja mocy biernej i praca hybrydowa w systemach zasilania gwarantowanego (UPS)*, „Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering” 2013, nr 74, s. 33-41.
3. Bednarek K., *Poziom niezawodności a wzrost obciążalności systemów zasilania gwarantowanego (UPS)*, „Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering” 2014, nr 78, s. 255-262.
4. Bednarek K., *Wzrost bezpieczeństwa energetycznego poprzez poprawę jakości i pewności zasilania elektrycznego*, [w:] *Bezpieczeństwo energetyczne. Rynki surowców i energii – teraźniejszość i przyszłość, tom 2. Technologia – Prawo – Ochrona środowiska*, P. Kwiatkiewicz (red.), Poznań 2014, s. 85-104.
5. Bednarek K., Kasprzyk L., *Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, No 12b, s. 236-239.
6. Bielecki S., *Jakość energii elektrycznej na rynku energii*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2007, nr 7/8, s. 68-72.
7. Charoy A., *Compatibilite electromagnetique. Parasites et perturbations des electroniques. 1-4*, Paris 1996.
8. Hanzelka Z., Warecki J., Piątek K., Chmielowiec K., *Zła jakość energii elektrycznej a zagrożenie pożarowe – analiza przypadku*, [w:] *Ochrona przeciwpożarowa w instalacjach elektrycznych*, (pr. zb), Warszawa 2012.
9. Lesiński S., *Jakość i niezawodność*, Bydgoszcz 1996.
10. Strona firmy EVER Sp. z o.o., <http://ever.eu/c/pl/artykuly> [dostęp: 31.07.2014].

**Opublikowano w: Europejski wymiar bezpieczeństwa energetycznego a ochrona środowiska. Bezpieczeństwo – edukacja, gospodarka, ochrona środowiska, polityka – prawo – technologie, praca zbiorowa pod redakcją P. Kwiatkiewicza, R. Szczerbowskiego i in., Fundacja na rzecz Czystej Energii, Poznań 2014, s. 377-392.**