

Rejestracja sporadycznych zaburzeń w sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia zakładu przemysłowego

▶ Eligiusz Pawłowski

W referacie przedstawia się system pomiarowy do wykrywania i rejestracji zaburzeń w sieci energetycznej niskiego napięcia, zestawiony z typowej aparatury pomiarowej i komputera PC. Zaburzenia mogą być identyfikowane na podstawie analizy kształtu krzywej napięcia oraz zmian jej wartości skutecznej. Algorytm identyfikacji zaburzeń może być łatwo modyfikowany poprzez zmianę oprogramowania sterującego. Prezentuje się przykładowe wyniki pomiarów uzyskane w rzeczywistej sieci energetycznej niskiego napięcia zakładu przemysłowego.

Registration sporadic disturbances in low voltage electric power network of industrial plants

In the article a PC-based measurements system and an algorithms for registration of disturbances in electric power network are presented. System hardware consists of a PC that hosts a data acquisition (DAQ) board and a digital multimeter, linked to the power system by a voltage transformer. The computer communicates with a multimeter, controls the acquisition task and processes data. The voltage transformer guarantees galvanic insulation from the power network. The main features of the DAQ multifunction board are 12-bit resolution, maximum sampling and data transfer frequencies of 20 kS/s, and input ranges of ± 5 V.

1. Wprowadzenie

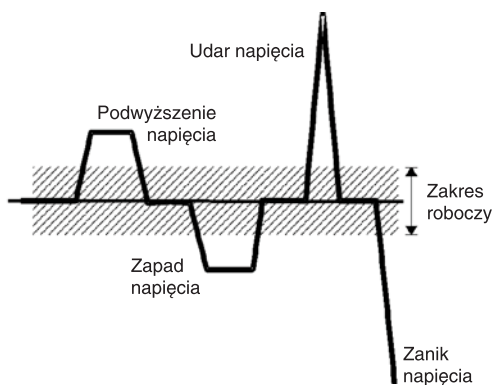
Odbiorniki elektryczne do prawidłowej pracy wymagają zasilania energią elektryczną o odpowiedniej jakości, która jest zależna zarówno od parametrów napięcia w punkcie dostarczania energii przez jej dostawcę, jak również od warunków pracy wewnętrznej sieci elektroenergetycznej w zakładzie przemysłowym. Zdarzenia pochodzenia zewnętrznego lub wewnętrznego, oddziałujące na urządzenie lub sieć zasilającą, które zakłócają ich poprawne działanie są nazywane zaburzeniami. Występują one zazwyczaj sporadycznie, co utrudnia ich analizę i ustalenie źródła pochodzenia. Szczególnie podatne na oddziaływanie zaburzeń są systemy informatyczne i czuła aparatura kontrolno-pomiarowa. Dlatego też istotnym problemem jest monitorowanie pracy sieci, rejestracja występujących w niej zaburzeń i ustalenie źródeł w celu ich eliminacji.

▶ Eligiusz Pawłowski – e-mail: e.pawlowski@pollub.pl
Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

2. Zaburzenia w sieciach zasilających

Wymagania jakości energii elektrycznej dostarczanej do odbiorcy są określone w licznych dokumentach, takich jak: Prawo Energetyczne [1], Rozporządzenie Ministra Gospodarki [2] oraz Polskie Normy [3, 4]. Jednocześnie są określone wymagania dla urządzeń dołączanych do sieci energetycznej, które mogłyby negatywnie wpłynąć na parametry jakościowe napięcia zasilającego [5, 6, 7, 8]. Dodatkowo, dla sieci zakładów przemysłowych określono trzy klasy środowiska elektromagnetycznego ze zdefiniowanymi poziomami kompatybilności, odpowiednimi do zasilania urządzeń o różnej wrażliwości na zaburzenia [6].

Jak wskazują badania, ponad 45 % awarii systemów komputerowych jest spowodowanych niewłaściwą pracą sieci zasilających. Do najczęstszych przyczyn tych awarii należą zapady napięcia, które stanowią aż 87 % wszystkich skutkujących awariami systemów informatycznych; w dalszej kolejności należy wymienić: udary napięcia – 7,4 %, zaniki napięcia – 4,7 % oraz podwyższenia napięcia – 0,7 %. Pozostałe zaburzenia stanowią tylko 0,2 %. Zaburzenia szczególnie niebezpieczne dla systemów informatycznych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Typowe zaburzenia w sieciach zasilających
Fig. 1. Typical disturbances in supply systems

3. Ochrona przed skutkami zaburzeń

Częstymi skutkami zaburzeń w sieci zasilającej są awarie sprzętu informatycznego i utrata cennych danych. Skutecznym sposobem zapobieżenia konsekwencjom takich awarii jest stosowanie zasilaczy bezprzerwowych (UPS) oraz dublowanie danych (*mirroring*) i regularne wykonywanie kopii zapasowych na dodatkowych nośnikach danych (*backup*). Podstawową funkcją zasilacza UPS jest zabezpieczenie przed zapadami, zanikami i podwyższeniami napięcia. Dodatkowo, wbudowane układy przeciwprzebiegiowe zabezpieczają przed skutkami udarów napięcia. Przykładowe punkty przełączania zasilacza UPS na pracę bateryjną przedstawia rys. 2, z którego wynika znaczny margines bezpieczeństwa zasilania w stosunku do wymagań na parametry napięcia zasilającego określone w przepisach [2, ..., 8].

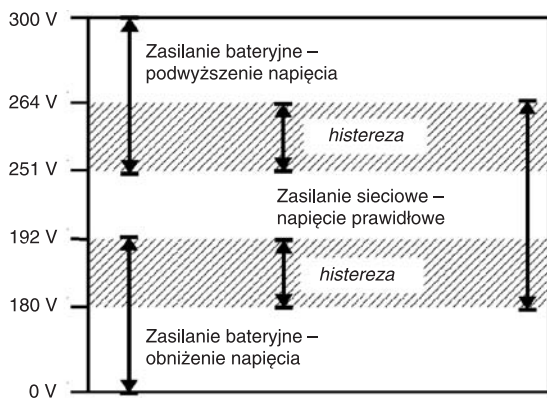
Dodatkową funkcją współczesnych zasilaczy UPS jest rejestracja wykrytych zaburzeń w sieci zasilającej i spowodowanych nimi przełączeń na pracę bateryjną. Przykładowy komunikat zapisany w pliku SYSLOG.LOG w wyniku wystąpienia w sieci stanu awaryjnego, krótszego niż 4 sekundy, jest następujący:

```
May 15 22:10:45 sipXX /usr/sbin/ups_
mond[1177]: /usr/sbin/ups_mond:
UPS /dev/tty0p1 AC POWER FAILURE -
running on UPS battery
May 15 22:10:45 sipXX /usr/sbin/
ups_mond[1177]: If power is
not returned within previously
configured time period, your
system will automatically go to
graceful shutdown
May 15 22:10:49 sipXX /usr/sbin/ups_
mond[1177]: /usr/sbin/ups_mond:
UPS /dev/tty0p1 OK: AC Power back
on
May 15 22:10:49 sipXX /usr/sbin/ups_
mond[1177]: /usr/sbin/ups_mond:
AC Power to all recognized, system
critical UPS's OK! System will not
shutdown.
```

Analiza zawartości pliku SYSLOG.LOG pozwala ocenić jakość zasilania systemu komputerowego. Nadmierna liczba przełączeń na pracę bateryjną świadczy o złej pracy sieci zasilającej i wymaga podjęcia odpowiednich działań. W jednym z zakładów przemysłowych stwierdzono, że liczba przełączeń zasilacza UPS na pracę bateryjną waha się od kilkunastu do kilkuset w ciągu jednej doby, a w ciągu tygodnia wynosi blisko 2000. Było to bezpośrednią przyczyną zaplanowania i wykonania pomiarów opisanych w dalszej części artykułu, mających na celu zidentyfikowanie rodzaju występujących w sieci zaburzeń i próbę ustalenia ich źródła.

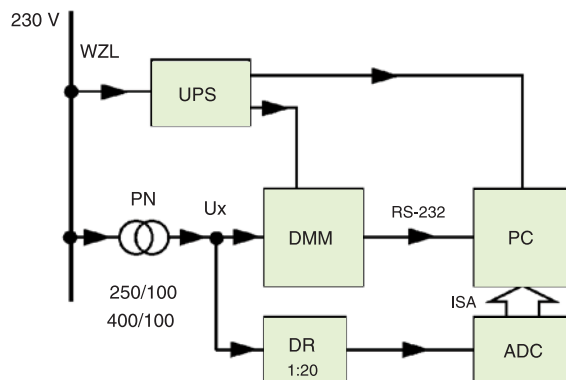
4. Zastosowany układ pomiarowy

W celu oceny jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej system informatyczny i rejestracji występujących w niej zaburzeń zestawiono system pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawia rys. 3. Napięcie na wewnętrznej linii zasilającej WLZ poprzez przekładnik napięciowy PN jest podane na wejście multimetru



Rys. 2. Punkty przełączania napięcia w zasilaczu bezprzerwowym UPS

Fig. 2. Voltage switch points in uninterruptible power supplies UPS



Rys. 3. Schemat blokowy układu pomiarowego
Fig. 3. Block diagram of measurements system

DMM typu HP 34401A oraz po dodatkowym obniżeniu za pomocą dzielnika rezystorowego DR na przetwornik analogowo-cyfrowy ADC o rozdzielczości 12 bitów. Komputer osobisty PC nadzoruje wykonywanie pomiarów i gromadzi uzyskane wyniki, komunikując się z multimetrem DMM poprzez interfejs RS-232 i z przetwornikiem ADC poprzez magistralę ISA. Odpowiednie warunki zasilania przyrządów pomiarowych i komputera podczas występowania zaburzeń i stanów awaryjnych w sieci zapewnia zasilacz bezprzewodowy UPS.

5. Algorytmy pomiarowe

Zastosowany multimetr cyfrowy umożliwia pomiary prawdziwej wartości skutecznej napięcia w sieci z szybkością do 50 pomiarów na sekundę (pomiar/s), natomiast przetwornik analogowo-cyfrowy zapewnia pomiary wartości chwilowej z szybkością do 20000 pomiar/s. W pierwszej fazie analizy pracy sieci energetycznej zrealizowano ciągły pomiar wartości skutecznej napięcia z szybkością 1 pomiar/s w czasie całego tygodnia. Rejestracji podlegały wszystkie wyniki zrealizowanych w serii pomiarów, tzn. 60480, w plikach dyskowych obejmujących kolejne dane za każdą godzinę pomiarów. Ze zgromadzonych danych wykonano 21 wykresów obejmujących po 8 godzin rejestracji oraz dodatkowo z każdych 600 pomiarów wyliczono średnią wartość skuteczną w ciągu 10 minut [4]. Zmierzone wartości porównano z dopuszczalnymi progami zmienności napięcia wynikającymi z przepisów [2, 3, 4].

W celu identyfikacji i rejestracji szybszych zmian napięcia zrealizowano kolejną serię pomiarów za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego. Pomiary wartości chwilowej napięcia realizowano z szybkością 15000 pomiar/s, tzn. 300 pomiarów w ciągu jednego okresu sieci. Każdorazowo rejestrowano w pamięci rekordy obejmujące 30000 wyników pomiarów za 2 sekundy i zapisywano do pliku dyskowego tylko te dane, w których wykryto zaburzenie. Zrezygnowano z rejestracji wszystkich wyników ze względu na zbyt dużą łączną objętość plików z danymi pomiarowymi.

W celu identyfikacji zaburzeń o czasach trwania pojedynczych okresów sieci z każdych 300 wyników pomiarów wartości chwilowej $u(t)$ wyliczono wartość średnią półokresową U_{sr} według zależności (1):

$$U_{sr}(n) = \frac{1}{300} \sum_{i=1}^{300} |u(n+i-1)| \quad (1)$$

Parametry napięcia w sieci określa się w przepisach co prawda dla wartości skutecznej, zastosowano jednak algorytm wyznaczania wartości średniej (1) ze względu na jego prostszą postać i szybsze obliczenia. Przy wykrywaniu krótkotrwałych zaburzeń nie ma to dużego znaczenia, gdyż ewentualne odkształcenia napięcia i zmiana współczynnika kształtu będą również identyfikowane jako zaburzenie. Dla identyfikacji szybkich zmian napięcia zastosowano próg $\pm 5\%$ [4].

W celu identyfikacji zaburzeń o czasie trwania krótszym od okresu sieci, z tych samych danych wyznaczano również szybkość zmian wartości chwilowej na-

pięcia, obliczając z każdych kolejnych 6 wyników $u(i)$ wartość zmiany napięcia dU według zależności (2):

$$\begin{aligned} dU(n) &= \\ &= \frac{1}{3} (u(n+2) + u(n+1) + u(n) + \\ &\quad - (u(n-1) + u(n-2) + u(n-3))) \quad (2) \end{aligned}$$

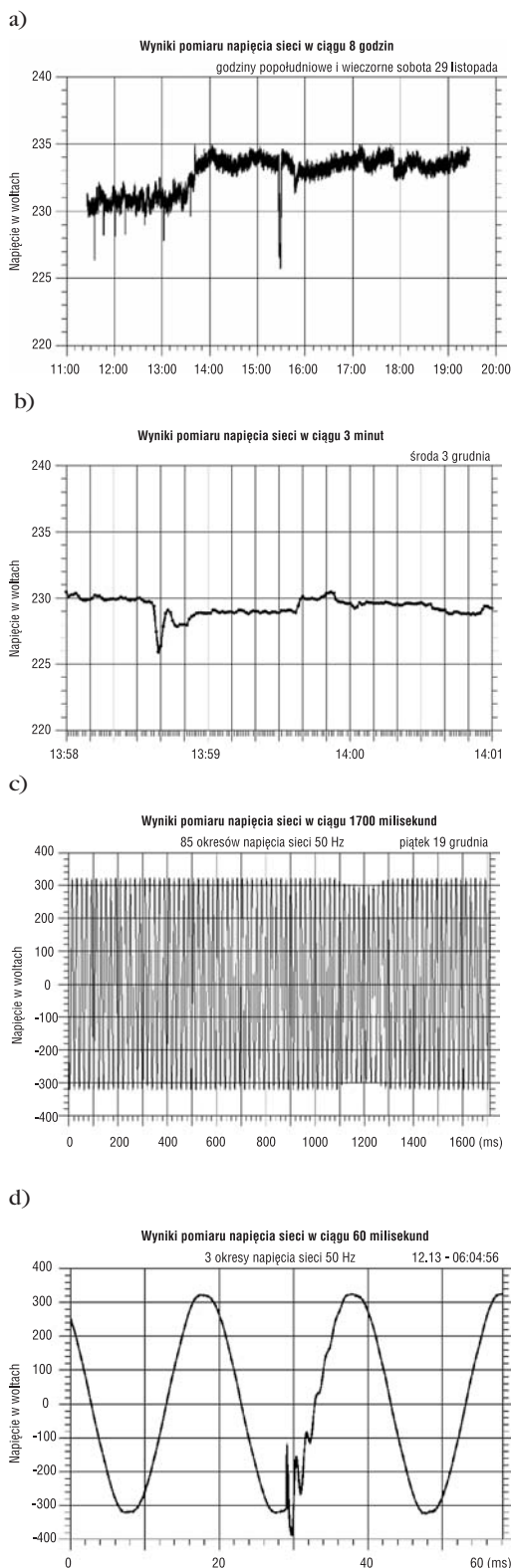
Liczbę próbek wykorzystywanych w zależności (2) oraz wartość graniczną $dU = 300$ V identyfikującą wystąpienie zaburzenia dobrano eksperymentalnie podczas wykonywania pomiarów napięcia w sieci. Przy realizowaniu 300 pomiarów w okresie 20 ms wyliczona z zależności (2) wartość $dU = 300$ V odpowiada szybkości zmian napięcia 1500 V/ms, przy czym dla napięcia znamionowego 230 V maksymalna szybkość zmian wartości chwilowej dla sinusoidy wynosi około 100 V/ms.

6. Przykładowe wyniki

W serii pomiarów napięcia skutecznego zrealizowanej w ciągu tygodnia multimetrem z szybkością 1 pomiar/s nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych przepisami wartości [2, 3, 4]. Po dodatkowym zawężeniu przedziału wykrywanych zmian napięcia zidentyfikowano występowanie niewielkich zaburzeń w granicach dopuszczalnych przepisami. Na rys. 4a przedstawiono obniżenie napięcia trwające ponad 3 minuty o amplitudzie 8 V, co stanowi 3,4 % wartości znamionowej. Na rys. 4b przedstawiono zarejestrowane również w tych samych warunkach krótkotrwałe (5 s) zaburzenie o amplitudzie 4 V (1,7 %), po którym wystąpił spadek napięcia o wartości 1 V i czasie trwania 1 minuta. Jest to typowy przebieg występujący przy załączaniu silnika elektrycznego, którego parametry nie przekraczają wartości dopuszczonych normą [8]. W tym samym czasie jednego tygodnia zasilacz UPS zarejestrował 1548 przełączeń na pracę baterijną w wyniku wystąpienia stanu awaryjnego sieci, co oznaczało występowanie w sieci licznych zaburzeń krótszych od wykrywanych multimetrem cyfrowym.

Kolejne zaburzenia zarejestrowano podczas pomiarów za pomocą karty przetwornika A/C z szybkością 15000 pomiar/s. Na rys. 4c jest widoczna zmiana obwiedni napięcia w sieci o czasie trwania 10 okresów i wartości 25 V, co stanowi 8 % amplitudy napięcia znamionowego. Zaburzenie zostało zidentyfikowane na podstawie zmiany wartości średniej liczonej w kolejnych okresach napięcia według (1). Na rys. 4d przedstawiono krótkotrwałe oscylacyjne zaburzenie impulsowe o częstotliwości 700 Hz, czasie trwania 5 ms i amplitudzie 200 V. To zaburzenie zidentyfikowano za pomocą algorytmu kontrolującego wartość pochodnej napięcia liczonej według (2).

Liczba zaburzeń zarejestrowanych w drugiej serii za pomocą karty przetwornika A/C okazała się zbliżona do liczby wykazanej przez zasilacz UPS. W celu ustalenia rodzaju zaburzeń oddziałujących na zasilacz UPS wykonano histogramy zidentyfikowanych algorytmem (1),



Rys. 4. Zaburzenia zarejestrowane w rzeczywistej sieci energetycznej: a) długotrwałe (3 min) obniżenie napięcia, b) krótkotrwałe (5 s) zapad napięcia, c) chwilowy (10 okresów) zapad napięcia, d) krótkotrwałe (5 ms) impulsowe zaburzenie oscylacyjne

Fig. 4. Disturbances registered in real power network: a) long-term (3 minutes) undervoltage, b) temporary sag (5 s), c) instantaneous sag (10 cycles), d) short duration (5 ms) oscillatory transient

algorytmem (2) oraz wykazanych przez zasilacz UPS, dla kolejnych godzinnych przedziałów czasu. Postać uzyskanych histogramów oraz wyznaczone dodatkowo współczynniki korelacji wskazały na oscylacyjne zaburzenia impulsowe przedstawione na rys. 4d.

7. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie nie jest alternatywne i konkurencyjne dla licznie oferowanych na rynku firmowych analizatorów i rejestratorów parametrów jakościowych energii elektrycznej w sieciach rozdzielczych nn. Przyrządy takie mają na celu przede wszystkim ciągłe nadzorowanie i rejestrowanie parametrów jakościowych energii elektrycznej w punkcie jej dostawy, pod kątem prawidłowej realizacji umowy pomiędzy jej dystrybutorem i odbiorcą. Zaproponowany układ i algorytmy pomiarowe mogą znaleźć zastosowanie w sytuacjach, gdy w sieci energetycznej pojawiają się sporadyczne zaburzenia o nietypowym, nieznanym i trudnym do przewidzenia charakterze, przy czym ich występowanie często nie jest spowodowane złą jakością dostarczanej energii elektrycznej, lecz są efektem wykorzystywania przez użytkownika we własnej sieci odbiorników lub aparatury łączeniowej niespełniających odpowiednich wymagań. W takich przypadkach samodzielnie opracowane i odpowiednio na bieżąco modyfikowane algorytmy detekcji i rejestracji zaburzeń mogą pomóc w ustaleniu i usunięciu ich źródła. Przedstawione w referacie przykłady obrazują możliwości wykrywania i rejestracji zarówno zaburzeń wolnozmiennych, przejawiających się jako wahania wartości skutecznej napięcia (modulacja obwiedni), jak również szybkozmiennych, okresowych i nieokresowych zaburzeń kształtu krzywej napięcia o czasach trwania krótszych od okresu częstotliwości podstawowej sieci energetycznej.

8. Literatura

1. *Prawo energetyczne*. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. z późniejszymi zmianami (DzU 1997, nr 54, poz. 348).
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców (DzU 2000, nr 85, poz. 957).
3. PN-IEC 60038:1999 *Napięcia znormalizowane IEC*.
4. PN-EN 50160:2002 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
5. PN-EN 61000-2-2:2003 (U) *Kompatybilność elektromagnetyczna. Środowisko. Poziomy kompatybilności dla zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości i sygnalizacji w publicznych systemach zasilania niskiego napięcia*.
6. PN-EN 61000-2-4:2003 (U) *Kompatybilność elektromagnetyczna. Środowisko. Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych*.
7. PN-EN 61000-3-2:2004 *Kompatybilność elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika $\leq 16 A$)*.
8. PN-EN 61000-3-3:1997 *Kompatybilność elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy. Ograniczanie wahań napięcia i migotania światła powodowanych przez odbiorniki o prądzie znamionowym $\leq 16 A$ w sieciach zasilających niskiego napięcia*. ■