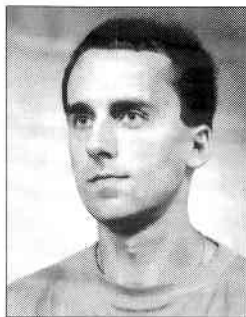


Grzegorz WICZYŃSKI
 INSTYTUT ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
 POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Metoda identyfikacji uciążliwego odbiornika energii elektrycznej z wykorzystaniem wahań napięcia



Dr inż. Grzegorz WICZYŃSKI – studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej ukończył w 1990 roku. Zatrudniony w Zakładzie Metrologii Elektrycznej Instytutu Elektroniki i Telekomunikacji na stanowisku adiunkta. Jego zainteresowania to miernictwo optoelektroniczne, badania w zakresie jakości energii elektrycznej, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wykorzystanie wahań napięcia, oraz zastosowanie systemów sensorycznych w układach sterowania.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę identyfikacji uciążliwego odbiornika (czyli generującego uciążliwe wahania napięcia) polegającą na wyznaczeniu punktu zasilania, a następnie wskazaniu odpowiedniego odbiornika zasilanego z tego punktu. Wartość amplitudy wahań napięcia δU w danym punkcie przy znajomości właściwości linii pozwala na oszacowanie parametrów odbiornika. Potwierdzeniem prawidłowości przeprowadzonej identyfikacji jest stwierdzenie koincydencji amplitud wahań i zmian stanu odbiornika (np. prądu, mocy czynnej, mocy biernej, fazy technologicznej itp.). Wykorzystanie wyłącznie wahań napięcia upraszcza praktyczną realizację zadania identyfikacji. Obecnie normatywnymi miarami uciążliwości wahań napięcia są wskaźniki długookresowego i krótkookresowego migotania światła [1]. Jednak miary te nie umożliwiają wykonania identyfikacji odbiornika uciążliwego zaproponowaną metodą. Załączono przykład przeprowadzonej identyfikacji w sieci nn.

Abstract

A method of noxious receiver identification, which is presented in this paper, bases on identification of supply site and choice of the proper receiver to be supplied from this site. A value of the voltage flicker's amplitude δU at the knowledge of circuit properties allows us to evaluate parameters of the receivers. Reliability of identification can be confirmed by either detection of coincidence of flickers amplitude or their changes in accordance with the state of the receiver (e.g. current, active power, reactive power, operating conditions). If to use only voltage flickers, practical realization of identification task will be simplified. One selected example of accomplished identification has been shown.

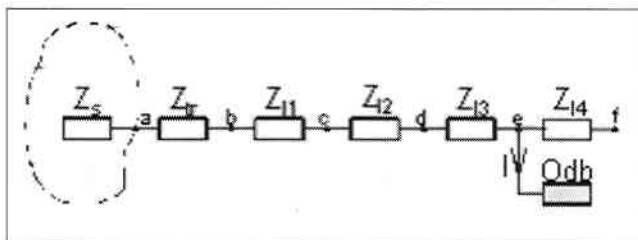
Wstęp

Jednym z parametrów opisujących jakość energii elektrycznej w sieciach nn i SN są szybkie zmiany napięcia [1]. Do oceny ich uciążliwości stosuje się różne wielkości. Normatywnymi miarami są wskaźniki długookresowego i krótkookresowego migotania światła [1]. Alternatywą (nienormatywną) jest miara o nazwie wahania napięcia [2]. Pozwala ona na ocenę uciążliwości migotania światła, umożliwia opisanie propagacji wahań w sieci energetycznej oraz identyfikację uciążliwego odbiornika energii elektrycznej. Identyfikacja wykorzystująca wyłącznie wahania napięcia polega na wskazaniu punktu sieci energetycznej, w którym występuje lokalne maksimum amplitud wahań oraz na oszacowaniu parametrów odbiornika. Z punktu, w którym występuje lokalne ekstremum amplitud wahań, zasilany jest odbiornik, który w zależności od swojej charakterystyki i parametrów obwodu zasilania może być uciążliwy (czyli być źródłem uciążliwych wahań napięcia). Uciążliwość odbiornika zależy od jego mocy i charakteru, częstości załączeń oraz impedancji i topologii sieci zasilającej. Uciążliwość wahań napięcia zależy od ich amplitudy i częstości. Częstość wahań zdeterminowana jest wyłącznie charakterystyką odbiornika (i tym samym w każdym punkcie sieci jest taka sama). Wartość amplitudy wahań zależy od charakterystyki odbiornika i właściwości obwodu zasilania [3, 4].

Propagacja wahań napięcia linii zasilającej uciążliwy odbiornik

Wahaniami napięcia nazywa się szybkie zmiany wartości skutecznej napięcia. Jako wartość graniczną szybkości zmian napięcia przyjmuje się zazwyczaj $1\%U_n/1$ s. Oznacza to, że zmiany napięcia wolniejsze od szybkości granicznej nie są wahaniami napięcia. Do opisu wahań stosowane są następujące wielkości: amplituda wahań δU odniesiona do napięcia znamionowego (wyrażona w procentach) oraz częstość wahań $f_{1,0-0,8}$ i $f_{0,8-0,6}$ (1/min).

Propagacja wahań napięcia w sieci energetycznej zdeterminowana jest jej właściwościami: impedancjami składników sieci oraz topologią. Amplituda wahań zależy m.in. od położenia punktu pomiarowego w sieci. Częstość wahań zależy wyłącznie od częstości zmian stanu odbiornika. Dlatego opis propagacji wahań polega na opisie wartości amplitudy wahań δU w poszczególnych punktach sieci. Najprostszym przykładem propagacji wahań jest sytuacja, w której występuje tylko jeden, trójfazowy i symetryczny rezystancyjno-indukcyjnościowy odbiornik będący źródłem wahań. Dla takiego odbiornika wahania w poszczególnych fazach są identyczne. Na rys. 1 przedstawiono schemat będący przybliżonym odwzorowaniem rzeczywistej sieci nn. Linie pomiędzy punktami $c-b$, $d-c$, $e-d$ zazwyczaj charakteryzują się coraz mniejszym przekrojem.



Rys. 1. Schemat badanej sieci nn

Na potrzeby analizy założono, że odbiornik *Odb* zasilany jest z systemu poprzez szeregowo połączone impedancje Z_s , Z_{tr} , Z_{11} , Z_{12} , Z_{13} . Przez impedancję Z_{14} prąd nie płynie. W przypadku zmiany wartości prądu I (modułu i lub kąta) zmieniają się wartości skuteczne napięć w poszczególnych węzłach (założono, że przebiegi prądów i napięć są harmoniczne). Dla zamieszczonej analizy występuje analogia do obliczeń statycznych spadków napięć.

Względną zmianę wartości skutecznej napięcia δU_x w punkcie x przybliżono zależnością

$$\delta U_x \cong \frac{R_x (I_2 \cdot \cos \varphi_2 - I_1 \cdot \sin \varphi_1)}{U_n} 100\% + \frac{X_x (I_2 \cdot \sin \varphi_2 - I_1 \cdot \sin \varphi_1)}{U_n} 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- I_1 – wartość prądu I przed zmianą,
- φ_1 – kąt fazowy pomiędzy I i U przed zmianą,
- I_2 – wartość prądu I po zmianie,
- φ_2 – kąt fazowy pomiędzy I i U po zmianie,
- R_x, X_x – składowe impedancje obwodu zasilania do punktu x ,
- U_n – wartość znamionowa napięcia.

Przyjmując, że $I_1 = 0$, zmiana wartości prądu I polega na zmianie od $I = 0$ do $I = \Delta I$ przy określonym kącie $\varphi = \varphi_2$ (lub odwrotnie). Zatem zmiana wartości skutecznej napięcia δU_x w punkcie x przybliżona jest zależnością

$$\delta U_x \cong \frac{\Delta I (R_x \cdot \cos \varphi + X_x \cdot \sin \varphi)}{U_n} \cdot 100\% \quad (2)$$

Jeżeli przyjąć, że

$$R_x = l R'_{y-x} + R_y \quad (3)$$

oraz

$$X_x = l X'_{y-x} + X_y \quad (4)$$

gdzie:

R'_{y-x}, X'_{y-x} – jednostkowe składowe impedancji obwodu zasilania linii (pomiędzy x i y) o długości l ,

R_y, X_y – wartości początkowe składowych impedancji (w punkcie y),

zależność (2) można przekształcić do postaci

$$\delta U_x \cong l \delta U'_{y-x} + \delta U_y \quad (5)$$

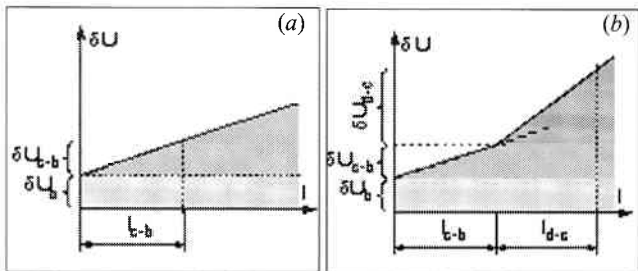
gdzie:

$$\delta U'_{y-x} = \frac{\Delta I (R'_{y-x} \cdot \cos \varphi + X'_{y-x} \cdot \sin \varphi)}{U_n} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$\delta U_y = \frac{\Delta I (R_y \cdot \cos \varphi + X_y \cdot \sin \varphi)}{U_n} \cdot 100\% \quad (7)$$

Z równania (6) wynika, że składnik $\delta U'_{y-x}$ to względna zmiana wartości skutecznej napięcia na jednostkowej impedancji linii pomiędzy punktami x i y . Składnik δU_y określony równaniem (7) to względna zmiana wartości skutecznej napięcia wywołana impedancją linii do punktu y .

Równanie (5), ze względu na długość linii l , jest funkcją liniową opisującą zmianę wartości skutecznej napięcia wywołaną załączeniem/wyłączeniem prądu I w zależności od długości l tej linii. Najprostszym przykładem zastosowania tego równania może być przypadek wahań w linii pomiędzy punktami b i c (rys. 2a). Składnik δU_y opisuje zmiany w punkcie b (czyli na szynach nn transformatora SN/nn, uwzględniając impedancję transformatora i systemu od strony SN). Składnik $l \times \delta U'_{y-x}$ określa zmiany napięcia wywołane impedancją linii pomiędzy punktami b i c .

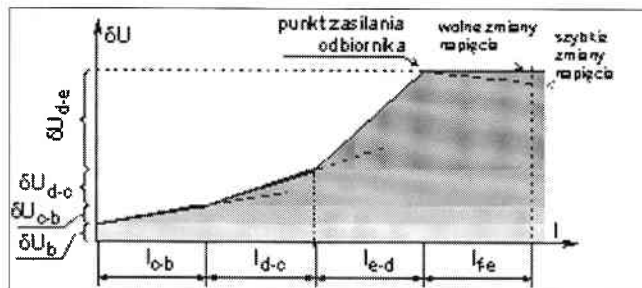


Rys. 2. Amplituda zmian napięcia δU w linii:
a) pomiędzy punktami b i c ,
b) pomiędzy punktami b i d

Dla niejednorodnej linii zasilającej zmienia się nachylenie wykresu dla poszczególnych jej odcinków. Większość rzeczywistych sieci tworzonych jest w ten sposób, że kolejne odcinki wykonane są z kabli/linii napowietrznych o coraz mniejszym przekroju. W takim przypadku wzrasta nachylenie kolejnych fragmentów wykresu (o ile nie występują pojemnościowe składniki reaktancji). Przykładem może być układ pomiędzy punktami a i d (rys. 2b).

Identyfikacja uciążliwego odbiornika energii elektrycznej

Wartość zmian napięcia narasta od źródła energii (punkt a) do punktu zasilania odbiornika (punkt e). Ze względu na założony brak zmian prądu w linii pomiędzy punktami e i f , zmiany napięcia w punkcie f równe są zmianom w punkcie e . Ponieważ linia pomiędzy e i f jest filtrem dolnoprzepustowym, w przypadku szybkich zmian występuje ich tłumienie. Na podstawie wartości amplitud wahań δU (lub ich estymatora) w odpowiednich punktach sieci tworzy się wykres dla danej linii. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wykres zmian amplitudy wahań δU w linii zasilającej odbiornik.

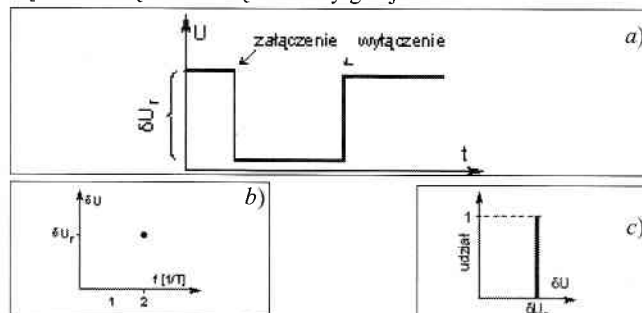


Rys. 3. Amplituda zmian napięcia δU w linii pomiędzy punktami b i f wywołanych zmianami prądu I

Miejsce, w którym wartość amplitudy wahań δU przestaje wzrastać, jest punktem zasilania odbiornika. Określenie tego punktu pozwala na wskazanie uciążliwego odbiornika (lub ich grupy). Zaproponowana metoda identyfikacji uciążliwego odbiornika polega na określeniu punktu zasilania, a następnie wskazaniu odpowiedniego odbiornika zasilanego z tego punktu. Wartość amplitudy wahań napięcia δU w danym punkcie przy znajomości właściwości linii pozwala na oszacowanie parametrów odbiornika. Ostatecznym potwierdzeniem prawidłowości przeprowadzonej identyfikacji jest stwierdzenie koincydencji amplitud wahań lub ich zmian ze zmianami stanu odbiornika (np. prądu, mocy czynnej, mocy biernej, fazy technologicznej itp.). Należy zauważyć, że normatywne miary uciążliwości wahań napięcia, wskaźniki długookresowego i krótkookresowego migotania światła nie umożliwiają przeprowadzenia zaproponowanej identyfikacji odbiornika uciążliwego.

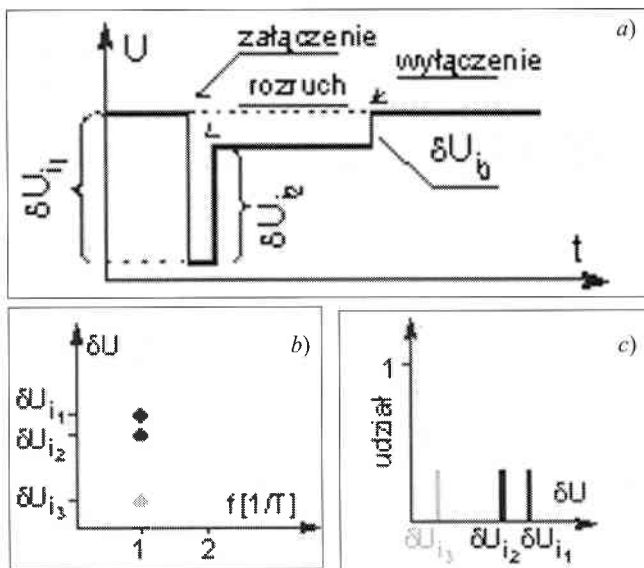
Wahania napięcia wywołane załączeniem i wyłączeniem odbiornika uciążliwego

Załączenie i wyłączenie odbiornika powoduje zmianę wartości skutecznej napięcia w linii od źródła do punktu zasilania odbiornika oraz w pozostałej części sieci energetycznej. Upraszczając można wyróżnić dwa podstawowe przebiegi czasowe wartości skutecznej, opisujące załączenie i wyłączenie odbiorników: bez fazy rozruchu i z fazą rozruchu. Przebieg przedstawiony na rys. 4 opisuje załączenie bez fazy rozruchu. Dla takiego procesu załączenia i wyłączenia występują dwie zmiany wartości napięcia o takiej samej amplitudzie. Przykładem odbiorników charakteryzujących się takim załączeniem są elementy grzejne.



Rys. 4. Cykl załączenie/wyłączenie odbiornika bez fazy rozruchu:
a) przebieg czasowy wartości skutecznej napięcia,
b) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa wahań napięcia,
c) histogram wahań napięcia

Na rys. 5 przedstawiono załączanie z fazą rozruchu. Cykl załączania i wyłączenia zawiera trzy zmiany wartości napięcia o różnych amplitudach. Dobrym przykładem takiego cyklu jest załączanie silnika indukcyjnego o stałym obciążeniu.



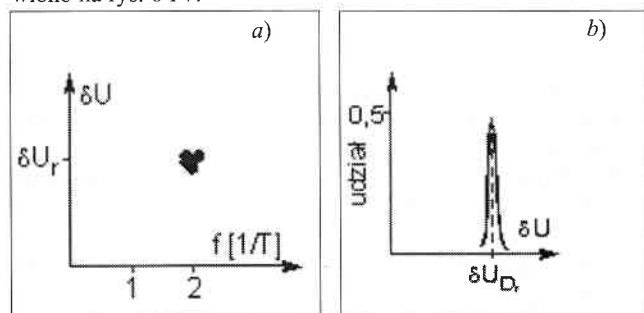
Rys. 5. Cykl załączenia/wyłączenia odbiornika z fazą rozruchu:

- a) przebieg czasowy wartości skutecznej napięcia,
b) charakterystyka amplitudowo-częstościowa wahań napięcia,
c) histogram wahań napięcia

Dla procesu załączania/wyłączenia bez fazy rozruchu uzyskuje się jednopunktową charakterystykę amplitudowo-częstościową i jednowartościowy histogram. Dla procesu załączania/wyłączenia z fazą rozruchu charakterystyka amplitudowo-częstościowa jest trójpunktowa (pomijając proces dyskryminacji amplitudy wahań) oraz histogram jest trójwartościowy (z tym, że zazwyczaj wartości δU_{i1} i δU_{i2} są zbliżone).

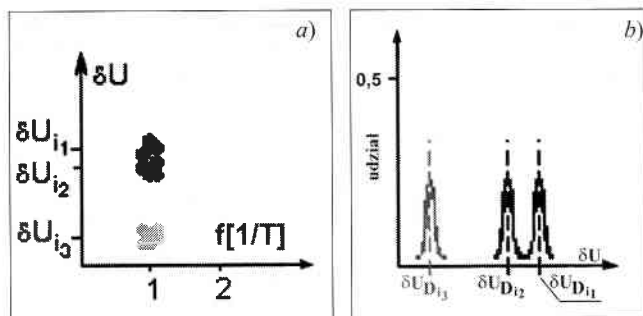
W rzeczywistych pomiarach amplitud wahań należy uwzględnić oddziaływanie innych odbiorników, błędy wnoszone przez układ pomiarowy, zależność prądu rozruchu od fazy załączenia oraz zmienność obciążenia. W przypadku analizy wielu procesów załączania/wyłączenia powoduje to rozmycie charakterystyk amplitudowo-częstościowych oraz histogramów amplitud wahań (zamiast jednego uzyskuje się kilka punktów skupionych wokół wartości odpowiadającej idealnemu procesowi dyskryminacji wahań).

Z powodu rozmycia obrazów wahań wygodnym w zastosowaniu estymatorem zmian napięcia są dominujące wartości amplitud wahań δU_D określone na podstawie wyznaczonych histogramów. Dominujące wartości amplitud δU_D przydatne są w opisie propagacji wahań oraz umożliwiają oszacowanie parametrów odbiornika. W przypadku odbiornika trójfazowego symetrycznego obrazy wahań w poszczególnych fazach są zbliżone. Przykładowe obrazy z uwzględnieniem oddziaływania innych odbiorników przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Cykl załączenia/wyłączenia odbiornika bez fazy rozruchu z uwzględnieniem oddziaływania innych odbiorników:

- a) charakterystyka amplitudowo-częstościowa wahań napięcia,
b) histogram wahań napięcia



Rys. 7. Cykl załączenia/wyłączenia odbiornika z fazą rozruchu z uwzględnieniem oddziaływania innych odbiorników:

- a) charakterystyka amplitudowo-częstościowa wahań napięcia,
b) histogram wahań

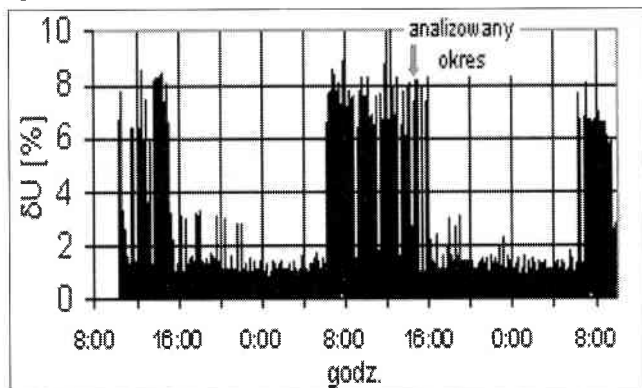
Na rys. 5 i 7 kolorem szarym przedstawiono wahań, które ze względu na przyjęty sposób dyskryminacji zostaną pominięte.

Przykład identyfikacji rzeczywistego odbiornika uciążliwego

Identyfikację rzeczywistego odbiornika przeprowadzono w linii zasilającej o topologii zgodnej z rys. 1. Podstawowe parametry składników linii: moc zwarciova systemu $S_k'' = 100$ MVA, transformator SN/nn – 400 kVA, linia pomiędzy punktami c - b – kabel 4×240 mm²/Al, długość $l_{c-b} = 280$ m, linia pomiędzy punktami f - c – linia napowietrzna 4×50 mm², długości odcinków: $l_{d-c} = 302$ m, $l_{e-d} = 72$ m, $l_{f-e} = 330$ m.

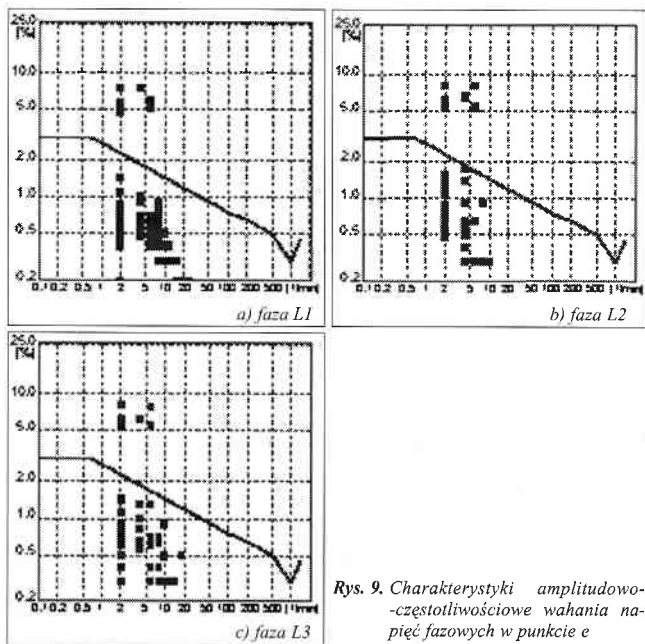
Utrudnieniem w przeprowadzeniu identyfikacji były: rozległość badanego obwodu, występowanie znaczącego „tła” wahań napięcia charakterystycznego dla takich obwodów oraz wiele potencjalnych uciążliwych odbiorników (ze względu na liczne prowizorki budowlane i małe warsztaty rzemieślnicze – ulica w dzielnicy podmiejskiej). Ułatwieniem procesu identyfikacji była powtarzalność występowania wahań.

Wielopunktowe pomiary przeprowadzono w kilku seriach. Do prezentacji wybrano wyniki pomiarów zarejestrowane z zachowaniem koincydencji w pięciu punktach. Zadano okres dyskryminacji wahań 30 sekund. Na podstawie wstępnej analizy dominujących wartości amplitud δU_D wytypowano punkt e , w którym ich wartość osiąga maksimum. Zaobserwowano dobową zmienność amplitud wahań δU (rys. 8). W celu ograniczenia oddziaływania ewentualnych innych odbiorników wyniki analiz zamieszczono dla trzydziestominutowego okresu o podwyższonej i powtarzalnej wartości amplitud wahań δU .



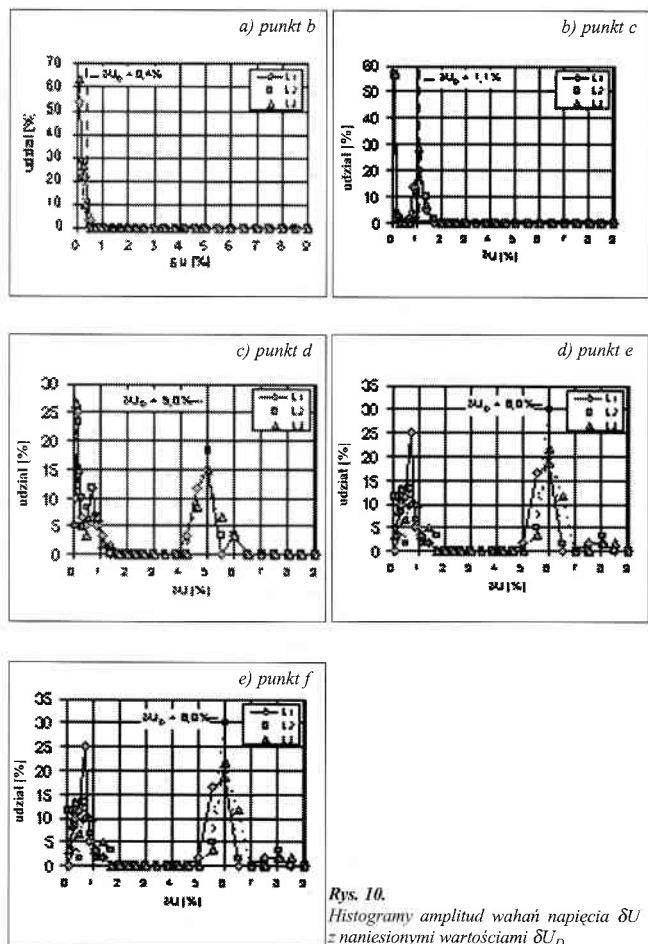
Rys. 8. Przebieg czasowy amplitud wahań napięcia δU w wytypowanym punkcie e

Dla danego okresu obserwacji stwierdzono znaczną uciążliwość wahań w trzech fazach (rys. 8). Podobieństwo charakterystyk z rys. 9 świadczy o symetrii odbiornika. Występowanie wahań o takim rozłożeniu na charakterystyce amplitudowo-częstościowej sugeruje oddziaływanie odbiornika pojedynczego lub grupowego (o zbliżonych parametrach).

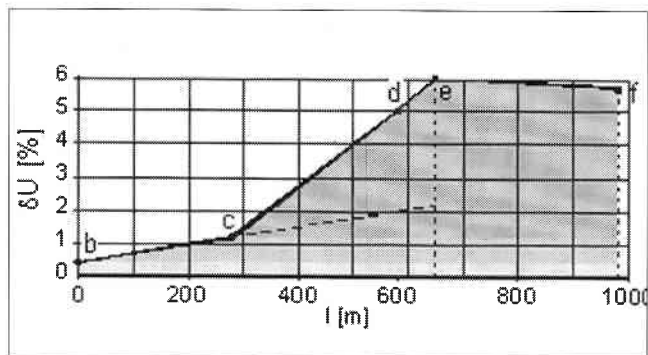


Rys. 9. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe wahań napięcia fazowych w punkcie e

W celu weryfikacji wyników wstępnej analizy wyznaczono dominujące wartości amplitud wahań δU_D . Na rys. 10 przedstawiono histogramy amplitud wahań δU z naniesionymi wartościami δU_D . Na potrzeby dalszych obliczeń dla każdego z czterech punktów pomiarowych wyznaczono wartość środkową δU_D (spośród trzech wartości δU_D dla poszczególnych faz). Dla punktu b dokonano oszacowania wartości δU_D – obliczona wartość $\delta U_D = 0,4\%$ znajduje się w przedziale wartości tła.



Rys. 10. Histogramy amplitud wahań napięcia δU z naniesionymi wartościami δU_D



Rys. 11. Amplituda wahań napięcia δU w badanej linii nn

Uzyskane dominujące wartości amplitud wahań napięcia δU_D umożliwiły stworzenie wykresu obrazującego zależność amplitudy wahań δU od odległości od punktu b (czyli od zacisków nn transformatora) zamieszczony na rys. 11.

Uzyskane wartości δU_D (rys. 10) i przebieg amplitudy wahań δU w linii (rys. 11) potwierdziły, że z punktu e zasilany jest uciążliwy odbiornik. Na podstawie wyznaczonej dominującej wartości amplitudy wahań $\delta U_D = 6\%$ w punkcie zasilania odbiornika i znamionowych parametrów obwodu oszacowano zmienność wartości prądu wywołującego wahania napięcia $\Delta I \approx 45$ A. W trakcie oględzin odbiorników zasilanych z punktu e wskazano silnik asynchroniczny o mocy znamionowej $P_n = 4$ kW, napędzający tokarkę (ze względu na brak sprzęgła i wymagania procesu technologicznego rozruch silnika przebiegał pod obciążeniem). Pomiary zakończono po stwierdzeniu koincydencji wahań i stanu silnika.

Wykres z rys. 11 pozwala ocenić wpływ zmiany przekroju linii zasilającej na wartość δU . Przykładowo, gdyby linia pomiędzy punktami b i e była jednorodna i wykonana tak jak pomiędzy punktami b i c, to obniżono by do wartości $\delta U = 2,2\%$.

Podsumowanie

Miara wahań napięcia pozwala ocenić uciążliwość szybkich zmian napięcia i opisać ich propagację w sieci energetycznej oraz ułatwia identyfikację uciążliwego odbiornika energii elektrycznej. Zaproponowana metoda identyfikacji uciążliwego odbiornika energii elektrycznej, polegająca na znalezieniu punktu, w którym występują wahań o maksymalnej amplitudzie δU nie wymaga znajomości wartości prądów. Ułatwia to praktyczną realizację zadania identyfikacji. Szczególnie jest to istotne w przypadku badań w rozległych liniach napowietrznych. Wskazanie punktu zasilania uciążliwego odbiornika umożliwia zastosowanie innych metod identyfikacji, wykorzystujących koincydencję zmian napięć i prądów. Na podstawie wykresu zmian amplitudy wahań δU w linii zasilającej możliwe jest określenie parametrów obwodu zasilania dla założonej uciążliwości oddziaływania danego odbiornika. Jest to przydatne w przypadku konieczności ograniczenia uciążliwości wahań napięcia do akceptowalnego poziomu.

Literatura

- [1] EN-PN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych. Ustanowiona X 1998.
- [2] Z. KOWALSKI: Wahań napięcia w układach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1985.
- [3] G. WICZYŃSKI: Wpływ pracy uciążliwych odbiorników na wahań napięcia w sieci energetycznej. IV Szkoła – Konferencja Elektrotechnika – Prądy Niesinusoidalne. Lubiatów-Zielona Góra 1998, s. 485–494.
- [4] G. WICZYŃSKI: Wahań napięcia w linii energetycznej niskiego napięcia. V Szkoła – Konferencja Elektrotechnika – Prądy Niesinusoidalne. Lubiatów-Zielona Góra 2000, s. 299–306.