

## MONITORING W INTELIGENTNYCH SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH (*SMART GRID*)

### MONITORING IN INTELLIGENT ELECTRICAL POWER NETWORKS (*SMART GRID*)

**Romuald Maśnicki\*, Marcin Lisowski**

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny,  
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, e-mail: romas@am.gdynia.pl

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** Dzięki postępowi w różnych dziedzinach elektrotechniki tradycyjne elektroenergetyczne sieci przesyłowe i dystrybucyjne przekształcane są w inteligentne sieci elektroenergetyczne. Integralną częścią sieci o takiej konfiguracji jest medium komunikacyjne, stanowiące warstwę fizyczną sieci komunikacyjnej, umożliwiającej wymianę różnorodnych danych w ramach sieci. Liczne aplikacje zaprojektowane dla sieci inteligentnych, np. umożliwiające zdalne odczyty liczników energii, w większości wymagają niewielkiej szybkości transmisji danych, dla której wystarczające warunki stwarzają techniki komunikacji wąskopasmowej. W artykule omówiono podstawowe założenia inteligentnych sieci energetycznych oraz wskazano wybrane standardy komunikacji implementowane w tych sieciach. Nakreślono istotny problem związany z ich użytkowaniem: przesłuchy pomiędzy segmentami sieci. Przedstawiono koncepcję rozwiązania tego problemu i przywołano wstępne wyniki badań symulacyjnych.

**Słowa kluczowe:** sieci inteligentne, komunikacja po liniach zasilających, przesłuchy, symulacje.

**Abstract:** With advances in various fields of electrical engineering, traditional power transmission and distribution grids are transformed into intelligent power grids. An integral part of a network with this configuration is the communication medium, which is the physical layer of the communication network, allowing for the exchange of diverse data within the network. Numerous applications designed for intelligent networks, such as enabling remote reads of power meters, mostly require a low data rate, for which sufficient conditions create narrowband communications. The article discusses the basic assumptions of intelligent power grids and indicates selected communication standards implemented in these networks. A significant issue related to their use was identified: crosstalk among network segments. The concept of solving this problem was presented and preliminary results of simulation tests were recalled.

**Keywords:** smart grids, power line communication, crosstalk, simulations.

## 1. WSTĘP

W ostatnich latach wiele uwagi poświęcono projektowi inteligentnych sieci elektroenergetycznych (*Smart Grid* – SG). Nowa generacja sieci okazuje się jednym z najbardziej obiecujących rozwiązań dla elastycznego, bezpiecznego i wydajnego wytwarzania, przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej. SG są to sieci elektroenergetyczne, zapewniające ekonomiczne i bezpieczne zaopatrzenie w energię elektryczną, jak również umożliwiające komunikację z wykorzystaniem mediów sieciowych, wprowadzające inteligentną integrację operacji prowadzonych przez wszystkich jej użytkowników, w tym generatorów prądowórczych, konsumentów i dystrybutorów energii elektrycznej. Warunkiem wstępnym tworzenia sieci SG jest wdrożenie zaawansowanej infrastruktury pomiarowej (*Advanced Metering Infrastructure* – AMI).

Główne założenia projektu SG obejmują [Khan i in. 2012]:

- zmniejszenie zanieczyszczeń związanych ze spalaniem produktów węglowych;
- zapewnienie dwustronnej komunikacji w czasie rzeczywistym;
- umożliwienie rozproszonego wytwarzania energii;
- realizację funkcji zdalnej kontroli i monitorowania;
- zdolność przywracania funkcjonowania sieci po awarii w systemie elektroenergetycznym.

Sieci SG posiadają kilka cech odróżniających je od tradycyjnych sieci. Porównanie ich właściwości zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Porównanie właściwości tradycyjnych sieci elektroenergetycznych z sieciami SG

*Table 1. Comparison of the properties of traditional power grids with SG networks*

Elementy porównawcze	Tradycyjne sieci	Smart Grid
Liczniki energii	elektromechaniczne	cyfrowe
Dystrybucja i zarządzanie energią	jednokierunkowa	dwukierunkowa
Zarządzanie siecią	wytwórcy i dystrybutorzy energii	zdecentralizowane, użytkownicy
Integracja energii	zwykle brak	dostępna
Przywracanie funkcji po awarii	ręczne	automatyczne
Sterowanie operacjami i procesami	ograniczone	pełne
Wpływ na środowisko	zanieczyszczanie	przyjazny

W tradycyjnych sieciach dystrybucja i zarządzanie energią dostarczaną dla klientów były realizowane wyłącznie przez dostawcę energii (system jednokierunkowy). W sieciach SG stosuje się dwukierunkowe systemy dystrybucji i zarządzania energią, które umożliwiają znacznie wydajniejszą produkcję i wykorzystanie energii elektrycznej. Tradycyjne sieci były scentralizowanymi sieciami kontrolowanymi przez producentów. Sieci SG są zdecentralizowanymi, interaktywnymi sieciami, wspieranymi przez precyzyjne monitorowanie, gdzie konsu-

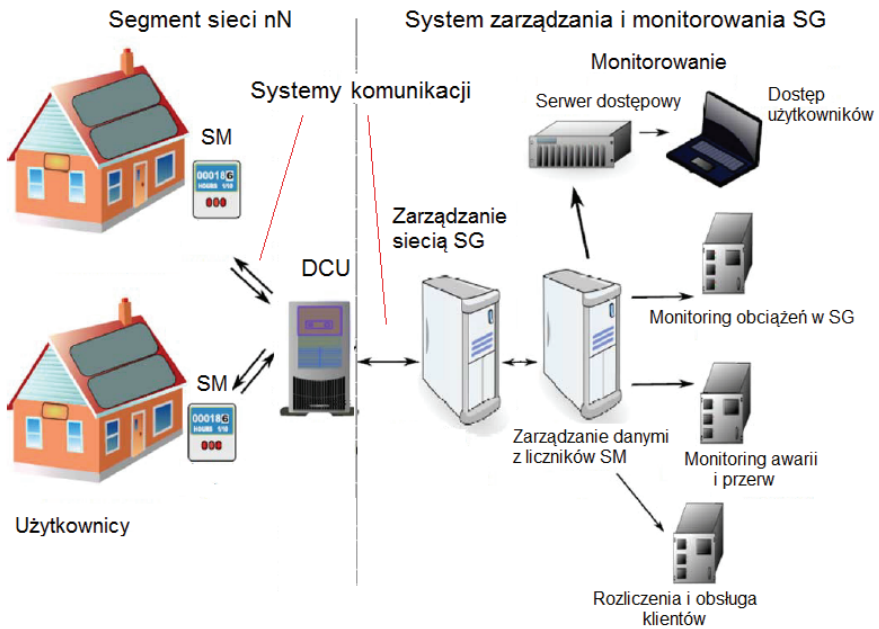
menci mogą nadwyżkę lokalnie wytwarzanej energii elektrycznej przekazywać do sieci dystrybucyjnej. Zamiast stosowania wyłącznie dużych generatorów, jak w tradycyjnych sieciach, energia elektryczna w SG jest również wytwarzana przy wykorzystaniu wielu małych źródeł energii, takich jak elektrownie wiatrowe, małe elektrownie wodne, moduły fotowoltaiczne, itp., oferując konsumentom energii możliwość przekształcenia się w prosumentów. Tradycyjne sieci dystrybuują energię wytworzoną na drodze spalania węgla, gazu i oleju. Ze spalaniem paliw kopalnych wiąże się uwalnianie do atmosfery ogromnych ilości dwutlenku węgla, co przyczynia się do pojawienia się efektu cieplarnianego, powodując zagrożenie globalnym ociepleniem. Sieci SG wprowadzają możliwość stosowania na szeroką skalę przyjaznych dla środowiska sposobów i technologii wytwarzania energii z odnawialnych i zrównoważonych źródeł energii.

Integracja w SG energii wytwarzanej z wykorzystaniem różnych źródeł stwarza nowe wyzwania dla systemu elektroenergetycznego, m.in. w zakresie sprawnego zarządzania energią oraz jakości energii elektrycznej. Źródła energii rozproszonej (*Distributed Energy Resources* – DER) stanowią w SG istotny element systemu elektroenergetycznego.

W infrastrukturze pomiarowej AMI sieci SG, w odniesieniu do pojedynczego segmentu sieci niskiego napięcia (nN, *Low Voltage* – LV), złożonego z odbiorców energii zasilanych ze wspólnego transformatora SN/nN, wyróżnić można kilka oddzielnych części (rys. 1):

- liczniki inteligentne (*Smart Meter* – SM);
- koncentrator danych (*Data Concentrator Unit* – DCU), pochodzących z liczników SM w segmencie sieci nN;
- system zarządzania i monitorowania SG;
- infrastruktura komunikacyjna pomiędzy SM i DCU oraz między DCU i systemem zarządzania i monitorowania SG.

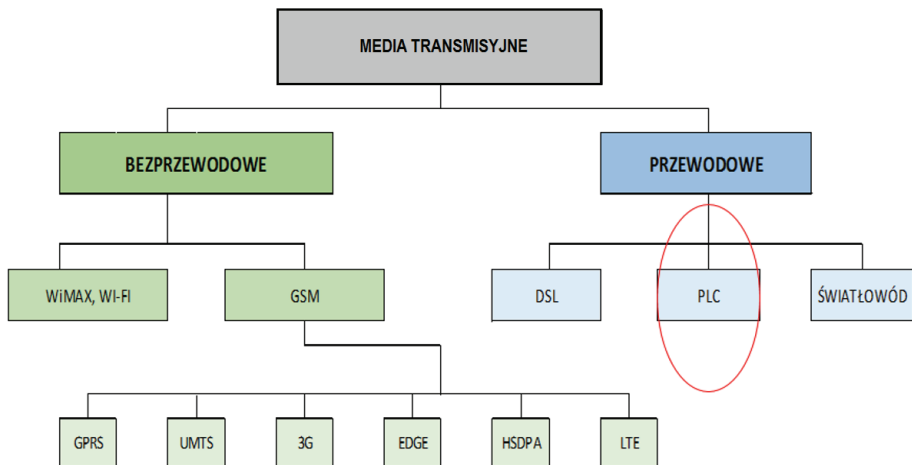
Nieodłączną częścią SG są technologie informacyjne i komunikacyjne [Gungor i in. 2011; 2013; Yan i in. 2013]. Funkcjonowanie sieci SG opiera się na czujnikach, przetwornikach i aktuatorach rozmieszczonych w całym systemie w celu zapewnienia precyzyjnego monitorowania i równoważenia obciążenia. Typowe inteligentne liczniki SM, instalowane u abonentów w sieci SG, są licznikami energii zintegrowanymi z terminalami komunikacyjnymi. Wymiana danych w łączach komunikacyjnych w sieciach SG oparta jest zarówno na hybrydowych technologiach komunikacyjnych, w tym przewodowych, takich jak światłowody, systemy wykorzystujące linie energetyczne, odrębne kable miedziane, jak i na technologiach bezprzewodowych, np. transmisja danych w sieciach komórkowych, takich jak GSM/GPRS/WiMax /WLAN oraz radio kognitywne.



**Rys. 1.** Elementy infrastruktury AMI

**Fig. 1.** Elements of AMI infrastructure

Na rysunku 2 zestawiono różne standardy komunikacyjne, wykorzystywane do przesyłania informacji w sieciach SG.



**Rys. 2.** Media transmisyjne w sieciach Smart Grid

**Fig. 2.** Transmission media in Smart Grid networks

Komunikacja sieciowa, oparta na przesyłaniu informacji z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury linii elektroenergetycznych (*Power Line Communication* – PLC) jest wykorzystana jako główna część hybrydowej sieci komunikacyjnej, która zapewnia funkcjonowanie różnych aplikacji opracowanych dla sieci SG [Luka i in. 2015].

W dalszej części artykułu zawarto rozważania odnoszące się do wybranych aspektów monitorowania sieci nN przy wykorzystaniu infrastruktury komunikacyjnej opartej na technologii PLC.

## 2. KOMUNIKACJA Z WYKORZYSTANIEM LINII ENERGETYCZNYCH

Linie energetyczne są zasadniczo przeznaczone do przesyłania energii z wykorzystaniem prądu przemiennego o częstotliwości 50–60 Hz (maksymalnie 400 Hz). Komunikacja w sieciach elektroenergetycznych jest technologią "*No New Wire*", która umożliwia przesyłanie informacji z wykorzystaniem istniejącej już, powszechnej infrastruktury linii energetycznych.

Pierwsze aplikacje komunikacyjne PLC z wykorzystaniem linii elektroenergetycznych opracowano już w końcu XIX wieku [Schwartz 2007]. W ostatnich latach udoskonalono techniki modulacji oraz wdrożono zaawansowane przetwarzanie sygnałów cyfrowych i techniki wykrywania i korekcji błędów. Pozwoliło to na uzyskanie w technologii PLC wysokich szybkości transmisji danych. Terminale PLC są obecnie wykorzystywane do realizacji usług AMI w sieci SG, dostępu do Internetu i komunikacji w ramach wewnętrznej sieci lokalnej (*Local Area Network* – LAN).

Wykorzystanie przewodów zasilających niskiego napięcia (nN) jako medium komunikacyjnego jest ograniczone przez kilka czynników degradujących, takich jak tłumienie, nieprzewidywalne szумы, wybiórcze częstotliwości i niedopasowanie impedancji. Można jednak poprawić wartość stopy błędów bitowych (*Bit Error Rate* – BER), stosując systemy szerokopasmowe, oparte na technikach modulacji, takich jak technika zwielokrotnienia w dziedzinie częstotliwości (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM), polegająca na jednoczesnej transmisji wielu strumieni danych na ortogonalnych częstotliwościach nośnych i jej odmianie, zwanej dyskretną modulacją wielotonową (*Discrete Multitone* – DMT) [Khan i in. 2012]. Są one wykorzystywane głównie w sieciach LAN. Z myślą o komunikacji w ramach AMI opracowano standard SG: IEEE 1901.2, który wykorzystuje linie zasilające nN, do transmisji o niskiej częstotliwości (poniżej 500 kHz), wąskopasmowej (*Narrow Band – Low Frequency*, NB – LF). Standard obejmuje dwie propozycje odnoszące się do funkcji warstwy fizycznej (*Physical Layer*) i podwarstwy kontroli dostępu do medium (*Medium Access Control Layer* – MAC) dla dwóch typów sieci PLC: G3 i PRIME [Hoch 2011].

### 3. PRZYKŁADOWE APLIKACJE WYKORZYSTUJĄCE PLC

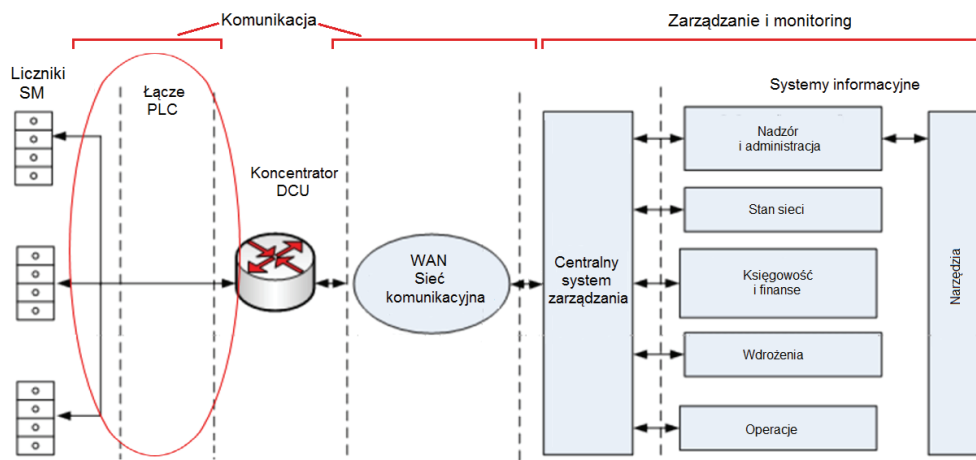
Rozwój technologii cyfrowego przetwarzania sygnałów (CPS) wprowadził wiele nowych możliwości w dziedzinie monitorowania wielkości, opisujących parametry energii w sieciach elektroenergetycznych. Opracowano liczne konstrukcje elektronicznych liczników energii (liczniki statyczne). Obecnie zastąpiły one nieomal całkowicie stosowane przedtem liczniki elektromechaniczne (głównie indukcyjne). Obok podstawowej funkcji – pomiaru zużywanej energii – liczniki statyczne umożliwiają pomiary i rejestrację wielu parametrów, charakteryzujących energię elektryczną, niedostępnych za pośrednictwem liczników elektromechanicznych.

Inteligentny licznik SM stanowi dwukierunkowe urządzenie komunikacyjne, które mierzy zużycie energii elektrycznej (SM również są stosowane do pomiaru zużycia gazu, wody lub ciepła) i dostarcza te informacje do lokalnego urządzenia gromadzącego dane z wielu SM, koncentratora danych DCU. Obok pomiarów zużycia energii również inne informacje pomiarowe, w tym dotyczące gwałtownych zmian obciążenia, mogą być przesyłane za pośrednictwem PLC. Wykorzystanie SM umożliwia udostępnienie użytkownikom sieci SG nowych usług i poprawia kontrolę operacyjną sieci elektroenergetycznej.

Licznik SM komunikuje się z DCU za pomocą modemu. Pomiary w takim systemie są często określane jako automatyczny odczyt liczników (*Automatic Meter Reading* – AMR), który jest odczytem zdalnym lub, w przypadku komunikacji dwustronnej w czasie rzeczywistym, jako zaawansowana infrastruktura pomiarowa AMI. Inteligentny system pomiarowy składa się z czterech części: liczników, terminali, koncentratorów i centralnego systemu.

Rysunek 3 przedstawia konfigurację inteligentnego systemu zarządzania pomiarami w sieci SG [Luka i in. 2015]. Licznik SM jest zazwyczaj zintegrowany z terminalem PLC, dzięki któremu odbywa się komunikacja i dostarczanie danych do koncentratora lub bezpośrednio do systemu centralnego. Koncentrator steruje komunikacją pomiędzy wszystkimi licznikami a centralnym systemem komunikacyjnym w określonym obszarze. Centralny system gromadzi dane z liczników, przeprowadza kontrolę błędów oraz wykonuje analizę danych.

Możliwość zdalnego odczytu SM dostępna jest także dla licznej grupy klientów indywidualnych, w stosunku do których eliminuje się uciążliwości związane z koniecznością cyklicznego odczytu wskazań liczników przez pracowników (inkasentów) operatora sieci elektroenergetycznej w miejscach ich instalacji. Licznik energii elektrycznej SM to urządzenie, które daje abonentom możliwości świadomego użytkowania energii elektrycznej, oraz umożliwia otrzymywanie informacji o aktualnym poziomie poboru energii elektrycznej, co pozwala na lepsze zarządzanie jej użytkowaniem. Dodatkowo SM automatycznie przesyła do operatora informację o awarii sieci zasilającej odbiorcę.



**Rys. 3.** Automacyjny system zarządzania pomiarami w sieci SG [Luka i in. 2015]

**Fig. 3.** Automatic measurement management system in the SG network [Luka et al. 2015]

W 2014 roku grupa ENERGA uruchomiła aplikacje i portal „Mój licznik”, umożliwiające monitorowanie zużycia energii przez odbiorców, którzy mają zainstalowane liczniki SM (rys. 4) [Energa 2017].



**Rys. 4.** Portal klienta AMI

**Fig. 4.** AMI client portal

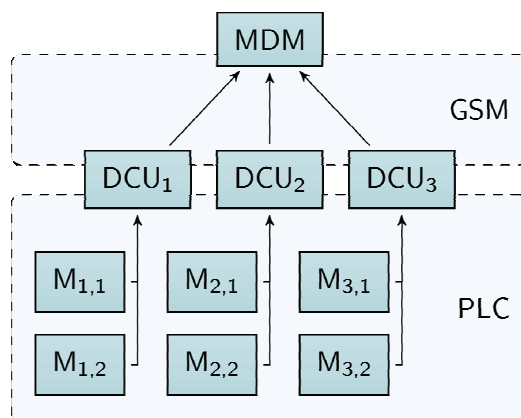
Abonent, korzystając z portalu, może na bieżąco śledzić poziom użytkowanej (pobieranej z sieci) przez siebie energii oraz świadomie kontrolować jej zużycie. Dla określenia zachowań abonentów przeprowadzono badania testowe, w których trakcie odbiorcy zgodzili się kontrolować energię elektryczną, pobieraną z sieci poprzez ograniczenie korzystania z wybranych przez siebie urządzeń domowych

podczas wieczornego szczytu poboru energii elektrycznej. W przypadku badanej grupy testowej, korzystającej z portalu „Mój licznik”, okazało się, że w dniu testu, między 19:00 a 21:00, w okresie, kiedy zapotrzebowanie na energię elektryczną jest największe, jej zużycie w grupie testowej spadło pomiędzy 10 a 32%.

#### 4. OPMIAROWANIE SIECI NN

Inteligentne liczniki energii elektrycznej SM, wyposażone w modemy PLC, mogą komunikować się z koncentratorami danych za pośrednictwem energetycznych linii przesyłowych, redukując tym samym koszt modernizacji infrastruktury pomiarowej.

Na rysunku 5 przedstawiono schematyczne połączenie elementów inteligentnego opomiarowania. Inteligentne liczniki  $M_{i,j}$  są połączone z koncentratorami danych  $DCU_i$  za pośrednictwem energetycznych linii przesyłowych. Informacje o zużyciu energii elektrycznej są przekazywane z liczników do odpowiednich koncentratorów DCU z wykorzystaniem standardu PLC. Dane z koncentratorów trafiają do centralnego magazynu danych (*Meter Data Management system – MDM*) poprzez łącza bezprzewodowe, wykorzystując sieci telekomunikacyjne (GSM). Układ opomiarowania PLC umożliwia dwustronną komunikację między MDM a licznikami w czasie bliskim do rzeczywistego. Informacje z SM są w Polsce dostępne co piętnaście minut [*Analiza skutków społeczno-gospodarczych implementacji inteligentnego opomiarowania 2017; Inteligentne opomiarowanie a prywatność odbiorców 2017*], oraz są przekazywane do magazynu danych bez udziału inkasenta, dzięki czemu pobór wskazań jest tańszy i w mniejszym stopniu obciążony błędami ludzkimi.



**Rys. 5.** Opomiarowanie sieci nN z wykorzystaniem komunikacji PLC

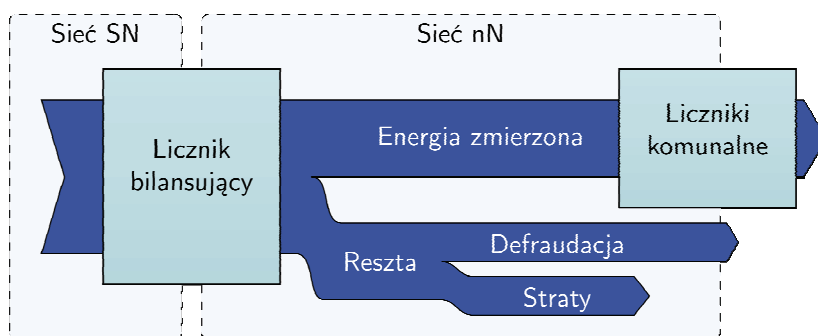
**Fig. 5.** Measurement of the LV network using PLC communication



## 5. PROBLEM PRZESŁUCHÓW PLC

Transformator SN/nN powinien działać jako filtr dla sygnału PLC w segmencie sieci niskiego napięcia. W takiej sytuacji koncentratory danych (instalowane po jednym w każdym segmencie sieci nN) są często projektowane w taki sposób, by wykrywały sygnał od dostępnych liczników i traktowały zbiór „widocznych” SM jako tożsamy ze zbiorem wszystkich odbiorców energii z danego segmentu sieci niskiego napięcia. Dodatkowo w każdym segmencie nN instaluje się licznik bilansujący, który mierzy całość przepływu energii elektrycznej między segmentem a siecią średniego napięcia.

Na rysunku 6 zobaczyć można schemat bilansu energii elektrycznej dla pojedynczego segmentu sieci nN. Licznik bilansujący wskazuje całość energii pobieranej z sieci SN; mierzy on całkowitą energię elektryczną pobieraną w danym okresie przez segment nN. Suma energii zmierzonej przez liczniki komunalne w tym samym okresie tożsamy jest z energią pobraną przez odbiorców. Różnica pomiędzy energią całkowitą a zmierzoną, czyli reszta energetyczna, jest następstwem strat dystrybucyjnych (np. w przewodach) oraz działalności odbiorców nieopomiarowanych (defraudacji). W takim układzie można w prosty sposób policzyć resztę energetyczną. Analiza reszt energetycznych segmentów nN może być zatem wykorzystana do zwiększenia obserwowalności sieci niskiego napięcia oraz pomóc w podejmowaniu decyzji o serwisowaniu elementów sieci lub poszukiwaniu złodziei energii.

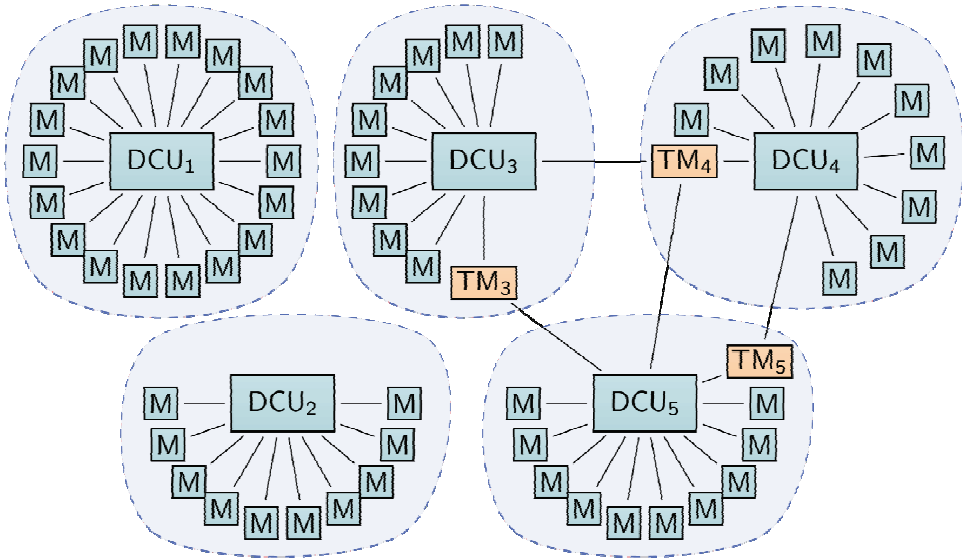


**Rys. 6.** Bilans energii elektrycznej dla pojedynczego segmentu sieci nN

**Fig. 6.** Balance of electrical energy for a single segment of the LV network

Niestety, zdarza się, że sygnał PLC przenika między sąsiednimi segmentami sieci nN. W takim przypadku niemożliwe jest wykorzystanie schematu z rysunku 6 do obliczenia reszty energetycznej, gdyż koncentrator danych nie jest w stanie stwierdzić, które liczniki faktycznie należą do tego samego segmentu, a które są „przechodnie” (*Transient Meter – TM*), czyli „widoczne” w więcej niż jednym segmencie.

Zjawisko przesłuchów zostało zilustrowane na rysunku 7. Dwa segmenty sieci nN z zainstalowanymi koncentratorami DCU<sub>1</sub> i DCU<sub>2</sub> są wolne od przesłuchów – każdy licznik jest „widoczny” dla dokładnie jednego koncentratora, natomiast w pozostałych trzech segmentach z zainstalowanymi koncentratorami DCU<sub>3</sub>, DCU<sub>4</sub> i DCU<sub>5</sub> występuje zjawisko przesłuchów – każdy z liczników TM<sub>i</sub> jest odczytywany przez więcej niż jeden koncentrator danych i są one licznikami przechodnimi.



**Rys. 7.** Zjawisko przesłuchów pomiędzy segmentami sieci nN

**Fig. 7.** The phenomenon of crosstalk between segments of the LV network

## 6. PROPOZYCJE ROZWIĄZANIA PROBLEMU

Można zaproponować dwa sposoby rozwiązania problemu przesłuchów. Najbardziej oczywistym sposobem ustalenia faktycznej przynależności liczników do koncentratorów jest fizyczne określenie ich podłączenia przez techników na miejscu, metoda ta wprowadza jednak problemy:

- wysokie koszty związane z delegowaniem specjalistów;
- konieczność ustawicznej weryfikacji połączeń odbiorców (konfiguracja sieci nN jest często zmieniana w wyniku np. napraw; licznik może być widoczny jednego dnia przez dwa koncentratory nie w wyniku przesłuchu, lecz w efekcie przełączenia gałęzi między segmentami);
- konieczność utrzymywania bardziej skomplikowanych struktur danych i systemów raportowania w centralnym magazynie danych.

Alternatywą dla fizycznego ustalania połączeń może być implementacja specjalnego oprogramowania w systemie centralnym. Wstępne badania [Lisowski, Maśnicki i Mindykowski 2016] wskazują, że probabilistyczne zamodelowanie sieci niskiego napięcia jako układu zmiennych losowych oraz wykorzystanie metod uczenia maszynowego może pozwolić na przypisanie liczników przejściowych do właściwych segmentów wyłącznie na podstawie analizy przebiegów czasowych wskazań licznika bilansującego i liczników komunalnych w przylegających segmentach sieci nN.

## 7. PODSUMOWANIE

Implementacja projektu sieci SG umożliwi efektywne monitorowanie i gospodarowanie energią elektryczną. Daje szansę na rozwój energetyki rozproszonej i ograniczenie stopnia zanieczyszczenia środowiska przez wytwórców energii. Konsumenci mogą świadomie kontrolować poziom użytkowanej energii elektrycznej, a także mogą stać się prosumentami. Wymaga to jednak racjonalnej polityki prowadzonej przez decydentów.

Zdalna, automatyczna akwizycja danych w systemie AMI znacznie obniża koszty oraz zwiększa częstotliwość i wiarygodność odczytów liczników komunalnych. Pozyskane w ten sposób dane mogą być teoretycznie wykorzystane m.in. do bilansowania energetycznego sieci nN, estymacji strat dystrybucyjnych oraz wykrywania defraudacji, jednakże z takim zwiększeniem obserwowalności wiążą się dodatkowe problemy. Metody uczenia maszynowego wydają się dostarczać narzędzi do analizowania danych pochodzących z sieci nN i jednocześnie zmniejszenia skutków niektórych problemów, m.in. problemu przesłuchów w komunikacji PLC między segmentami sieci.

## LITERATURA

- Analiza skutków społeczno-gospodarczych implementacji inteligentnego opomiarowania*, [www.me.gov.pl/files/upload/18385/Analiza\\_skutkow\\_spoleczno-gospodarczych.pdf](http://www.me.gov.pl/files/upload/18385/Analiza_skutkow_spoleczno-gospodarczych.pdf) [dostęp: 29.06.2017].
- Energa, 2017, *Mój licznik*, <http://www.energa-operator.pl/wymianalicznika.xml> [dostęp: 27.06.2017].
- Gungor, V.C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G.P., 2011, *Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 4, s. 529–539.
- Gungor, V.C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G.P., 2013, *A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, s. 28–42.
- Hoch, M., 2011, *Comparison of PLC G3 and PRIME*, IEEE International Symposium on Power Line Communication and Its Applications, Udine, <http://isplc2011.ieee-isplc.org/>.

- Inteligentne opomiarowanie a prywatność odbiorców*, <https://www.ure.gov.pl/pl/urzed/informacje-ogolne/aktualnosci/5464,Stosowanie-inteligentnegoopomiarowania-w-parze-z-ochrona-prywatnosci-odbiorcow-html> [dostęp: 29.06.2017].
- Khan, F., Baig, S., Noreen, U., Yousaf, A., 2012, *An Overview of OFDM Based Narrowband Power Line Communication Standards for Smart Grid Applications*, World Applied Sciences Journal, no. 20(9), s. 1236–1242.
- Lisowski, M., Mańnicki, R., Mindykowski, J., 2016, *Discrete-Event Simulation Framework for Developing Methods for Low Voltage Network Observability Enhancement*, EBCCSP 2016.
- Luka, M.K., Pallam, S.W, Thuku I.T., Etuk, U.U., 2015, *Narrowband Power Line Communication for Smart Grid*, International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 6, no. 7.
- Schwartz, M., 2007, *Carrier-Wave Telephony over Power Lines – Early History*, IEEE Conference on the History of Electric Power, Newark, New York.
- Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., Tipper, D., 2013, *A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 1, s. 5–20.