

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

PROGNOZOWANIE
W ELEKTROENERGETYCE

PE 2023

CZĘSTOCHOWA 2023

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

MATERIAŁY KONFERENCYJNE/CONFERENCE PROCEEDINGS

Redakcja/Edited by Janusz SOWIŃSKI, Jacek ŁYP

**PROGNOZOWANIE
W
ELEKTROENERGETYCE**

PE 2023

Częstochowa, Poland 2023

Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej PTETiS
Oddział Częstochowa
i
Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska

Polish Society of Theoretical and Applied Electrical Engineering PTETiS
Czestochowa Branch
and
Faculty of Electrical Engineering, Czestochowa University of Technology



XV MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWA
PROGNOZOWANIE W ELEKTROENERGETYCE
15th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
FORECASTING IN ELECTRIC POWER ENGINEERING

17 kwietnia/April 17, 2023, Częstochowa, Poland



Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej
Częstochowa 2023

Organizing Committee Komitet Organizacyjny

Jacek Łyp – Chairman / Przewodniczący
Janusz Sowiński – Chairman of Program Committee / Przewodniczący Rady Programowej
Grzegorz Dudek – Vice-chairman of Program Committee / Wiceprzewodniczący Rady Programowej
Krzysztof Chwastek
Patryk Gałuszkiewicz
Mariusz Najgebauer
Paweł Pełka
Maciej Sołtysik

Program Committee Rada Programowa

Ryszard Bartnik	<i>The Opole University of Technology, Poland</i>
Krzysztof Chwastek	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Sławomir Cieślik	<i>Bydgoszcz University of Technology, Poland Association of Polish Electrical Engineers</i>
Grzegorz Dudek – vice-chairman	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Marek Gała	<i>Association of Polish Electrical Engineers</i>
Anna Gawlak	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Radomir Gono	<i>Technical University of Ostrava, Czech Republic</i>
Manuel Grana	<i>University of the Basque Country UPV/EHU San Sebastian, Spain</i>
Kazimierz Jagieła	<i>Association of Polish Electrical Engineers</i>
Anna Kamińska Chuchmala	<i>University of the Basque Country UPV/EHU San Sebastian, Spain</i>
Jacek Kamiński	<i>Mineral and Energy Economy Research Institute, Polish Academy of Sciences, Poland</i>
Henryk Kaproń	<i>Warsaw University of Technology, Poland (ret.)</i>
Grzegorz Kinelski	<i>WSB University, Poland Polish Association for Energy Economics</i>
Michał Kolcun	<i>Technical University of Kosice, Slovak Republic</i>
Iraida Kolcunova	<i>Technical University of Kosice, Slovak Republic</i>
Mirosław Kornatka	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Marek Lis	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Mariusz Najgebauer	<i>Polish Society of Theoretical and Applied Electrotechnics, Częstochowa Branch, Poland</i>
Mirosław Parol	<i>Warsaw University of Technology, Poland</i>
Józef Paska	<i>Warsaw University of Technology, Poland (ret.)</i>
Zbigniew Połtecki	<i>Lublin University of Technology, Poland</i>
Tomasz Popławski	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Geoffrey S. Rothwell	<i>OECD Nuclear Energy Agency, France Stanford University, USA (ret.)</i>
Maciej Sołtysik	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Janusz Sowiński – chairman	<i>Czestochowa University of Technology, Poland</i>
Wojciech Suwała	<i>AGH University of Science and Technology, Poland</i>

The Honorary Patronage of the Conference PE2023 Honorowy Patronat Konferencji PE2023

Power Engineering Committee of the Polish Academy of Sciences, Katowice Branch
The Energy Commission at the Katowice Branch of the Polish Academy of Sciences



Komisja Energetyki Polskiej Akademii Nauk
Oddział Katowice



CZĘSTOCHOWSKI ODDZIAŁ
STOWARZYSZENIA
ELEKTRYKÓW POLSKICH



Polish Association for Energy Economics

Program konferencji / Conference programme

1. Prognozowanie w elektroenergetyce / Forecasting in the power engineering

Selection of exogenous variables for short-term forecasting of daily loads in the power subsystem

Janusz Sowiński

Prognozowanie produkcji energii słonecznej z wykorzystaniem platformy NEXO i VRM Portal

Sebastian Dudzik, Bartosz Kowalczyk

Electricity demand forecasting using modern recurrent neural networks: New mechanisms and possibilities

Sławek Smyl, Grzegorz Dudek, Paweł Pełka

Analiza predykcyjna danych pomiarowych wykorzystywanych w systemach nadzorujących pracę urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych

Artur Wachtarczyk, Janusz Sowiński

Prognozowanie bilansowych strat energii elektrycznej

Anna Gawlak

2. OZE i strukturalne zmiany w elektroenergetyce / RES and structural changes in the power engineering

Concept of the International Research Project for Digital Energy Path for Planning and Operation of sustainable grid, products, and society

Łukasz Rokicki, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski, Marcin Kopyt, Jakub Domaszewski, Bartłomiej Arendarski, Przemysław Komarnicki

Wybrane modele funkcjonowania społeczności energetycznych

Maciej Sołtysik

Magazynowanie energii w magazynach elektrochemicznych z wykorzystaniem akumulatorów LiFePO₄ i LTO

Patryk Gałuszkiewicz, Zbigniew Gałuszkiewicz

Magazynowanie energii w systemach mikroinstalacji z wykorzystaniem pomp ciepła i magazynów energii elektrycznej oraz ciepła

Patryk Gałuszkiewicz, Zbigniew Gałuszkiewicz

3. Nowoczesne i przyszłościowe technologie w sektorze energetycznym / Modern and future technologies in the energy sector

Modelling hysteresis loops of non-oriented electrical steel

Krzysztof Chwastek, Branko Koprivica, Marko Rosić, Roman Gozdur, Piotr Gębara

Komputerowe technologie trójwymiarowe w elektroenergetyce

Mateusz Rak, Mariusz Najgebauer, Jarosław Jędryka

Nagrzewanie indukcyjne jako proces przemiany strat wiroprądowych w energię cieplną w ruchu liniowym

Marek Lis, Michał Kobierski, Marek Chmiel

Ocena stopnia odkształcenia sygnałów w obwodzie z łukiem elektrycznym o zaburzanych parametrach

Marek Gała, Antoni Sawicki, Lubomir Marciniak

4. Eksploatacja systemu elektroenergetycznego i urządzenia elektryczne / Operation of the power system and electrical equipment

Audits of road lighting installations – case study

Tomasz Popławski, Marek Kurkowski

Współpraca energoelektronicznego kompensatora MMC z piecem łukowym AC

Marek Gała, Kazimierz Jagieła

Kompensacja mocy biernej w wybranym zakładzie przemysłowym – stadium przypadku

Mirosław Kornatka

Analiza parametrów eksploatacyjnych opraw oświetleniowych LED ze źródłami bezsoczewkowymi – plastic free

Marek Kurkowski, Tomasz Popławski, Tomasz Matkowski

Przedmowa / Preface

XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa *Prognozowanie w Elektroenergetyce* odbyła się 17 kwietnia 2023 r. na Politechnice Częstochowskiej w trybie hybrydowym.

Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej PTETiS oraz Instytut Elektroenergetyki, a obecnie Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej w ciągu ostatnich trzydziestu trzech lat organizowały w ścisłej współpracy z wybitnymi organizacjami naukowo-technicznymi cykliczną konferencję naukową, której tematyka obejmuje aktualne zagadnienia z szeroko pojętej elektroenergetyki. Podczas konferencji omawiane są zagadnienia i dylematy dotyczące nie tylko polskiej elektroenergetyki, ale także innych krajów UE.

W ramach obrad XV Międzynarodowej Konferencji Naukowej *Prognozowanie w Elektroenergetyce PE 2023* Komitet Naukowy postanowił zorganizować sesje plenarne, na których wygłoszono referaty, obejmujące następujące zagadnienia:

- Prognozowanie w elektroenergetyce
- Planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego
- Wybrane problemy elektroenergetyki (eksploatacja, pomiary i sterowanie, zarządzanie w energetyce)
- Wpływ struktury własnościowej na funkcjonowanie i rozwój krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE)
- Stany ustalone i przejściowe reżimy pracy krajowych SEE. Stabilność i jej poprawa. Jakość energii elektrycznej
- Działania techniczne i organizacyjne mające na celu poprawę pracy systemu elektroenergetycznego
- Źródła generacji rozproszonej i odnawialnej oraz ich wpływ na SEE, niezawodność dostaw i jakość energii elektrycznej
- Magazyny energii, kwestie techniczne, ekonomiczne, prawne, wpływ na SEE
- Zagadnienia projektowania, działania i sterowania maszyn i napędów elektrycznych

W trakcie obrad dyskutowano o problemach prognozowania w warunkach kryzysowych, wskazywano na rolę przedsiębiorstw dystrybucyjnych, elektrowni i innych przedsiębiorstw w przemianach gospodarczych oraz podnoszono kwestie bezpieczeństwa energetycznego. Szczególną uwagę zwrócono na problemy wpływu energetyki na środowisko i środki zaradcze w tym zakresie.

W tegorocznych sesjach wzięło udział trzydziestu czterech uczestników jako autorzy i współautorzy referatów. Podczas sesji plenarnych w 4 sekcjach wygłoszono 17 referatów.

W *Materiałach konferencyjnych* prezentowane są obszernie streszczenia zgłoszonych na konferencję artykułów. Mamy nadzieję, że Czytelnicy uznają publikację za interesującą i wartościową.

Członkowie Komitetu Organizacyjnego PE 2023

Uroczysty adres / Opening address

Szanowny Panie Dziekanie Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej, Szanowni Dostojni Goście, Uczestnicy Konferencji, Szanowni Państwo,

W imieniu Komitetu Organizacyjnego i Rady Programowej pragnę serdecznie powitać Państwa na jubileuszowej XV Międzynarodowej Konferencji Naukowej *Prognozowanie w Elektroenergetyce PE 2023*.

Konferencja Naukowa *Prognozowanie w Elektroenergetyce* jest organizowana już od trzydziestu czterech lat przez Instytut Elektroenergetyki, a od 2008 roku przez Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej. Współorganizatorem konferencji, również od 2008 roku, jest Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej PTETiS Oddział Częstochowa.

Inicjatorką organizacji sympozjów związanych z prognozowaniem w energetyce była Pani Profesor Irena Dobrzańska, piastująca funkcję dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej oraz dyrektora Instytutu Elektroenergetyki, a impulsem do ich zorganizowania był kryzys energetyczny w Polsce i na świecie w 1980 roku. *I Ogólnopolskie Sympozjum Prognozowanie w Energetyce* zorganizowano w Częstochowie w kwietniu 1989 roku. W 1996 roku ogólnopolskie sympozja *Prognozowanie w Elektroenergetyce* pod patronatem Komisji Energetyki Oddziału Śląskiego PAN przekształciły się w konferencje ogólnopolskie odbywające się w cyklu dwuletnim. Od 2008 roku konferencja ma status międzynarodowej. Obecnie również w skład Rady Programowej PE 2023 wchodzi naukowcy z Czech, Francji, Polski, Słowacji, Słowenii i Hiszpanii.

W obecnej edycji Patronat Honorowy nad konferencją objął Komitet Energetyki Polskiej Akademii Nauk PAN Oddział w Katowicach, Stowarzyszenie na rzecz Gospodarki Energetycznej Polski SGEP oraz Stowarzyszenie Elektryków Polskich SEP Oddział w Częstochowie.

Podczas sesji plenarnych odbędą się wystąpienia zaproszonych prelegentów poruszające problematykę współczesnych wyzwań stojących przed energetyką, głównie związanych z jej rozwojem, m.in. energetyką jądrową i OZE, magazynowaniem energii, redukcją emisji zanieczyszczeń i dekarbonizacją energetyki, ochroną środowiska. Szczególne miejsce poświęcimy sztandarowej tematyce konferencji związanej z prognozowaniem w elektroenergetyce.

Od pewnego czasu tematyka konferencji jest stopniowo rozszerzana poza tytułowe prognozowanie w elektroenergetyce. Obecnie tematyka konferencji obejmuje: prognozowanie w energetyce, modelowanie, optymalizację i planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego, bezpieczeństwo elektroenergetyczne, sterowanie pracą systemu, systemy automatyki, sterowania, pomiarów i monitoringu, rozwój źródeł generacji rozproszonej i odnawialnej, energetykę jądrową oraz funkcjonowanie rynku energii.

Konferencja PE 2023 nie mogłaby się odbyć bez wsparcia i pomocy wielu zaangażowanych osób z wiodących w kraju i zagranicy uczelni oraz organizacji branżowych i stowarzyszeń. Przy tej okazji serdecznie dziękuję wszystkim członkom Rady Programowej i Komitetu Organizacyjnego. Chciałbym również podziękować Autorom, Recenzentom, wszystkim Prelegentom i Przewodniczącym sesji za wsparcie i udział w PE 2023.

Miło mi poinformować, że kolejna szesnasta edycja konferencji odbędzie się już za dwa lata w 2025 roku.

*Przewodniczący Rady Programowej PE 2023
dr hab. inż. Janusz Sowiński, prof. PCz*

Jubileusz 45-lecia pracy naukowej Janusza Sowińskiego, przewodniczącego PE 2023

Jubilee of the 45th anniversary of the scientific work of Janusz Sowiński, chairman of PE 2023

Podczas XV Międzynarodowej Konferencji Naukowej *Prognozowanie w Elektroenergetyce* przewodniczący Rady Programowej dr hab. inż. Janusz Sowiński, prof. Politechniki Częstochowskiej obchodził jubileusz 45-lecia pracy naukowej.

Janusz Sowiński urodził się w Częstochowie, gdzie również się kształcił i studiował. Po ukończeniu I LO im. J. Słowackiego w Częstochowie w 1974 roku rozpoczął studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej na specjalności elektroenergetyka. Po ukończeniu studiów 1 sierpnia 1978 r. podjął pracę jako pracownik naukowo-techniczny w Zakładzie Gospodarki Elektroenergetycznej PCz pod kierunkiem Pani Profesor Ireny Dobrzańskiej. Janusz Sowiński pracuje nieprzerwanie do chwili obecnej jako nauczyciel akademicki na Politechnice Częstochowskiej.

W pracy naukowej dominującą tematyką zainteresowania zawodowego Jubilata jest planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał 27 czerwca 1989 r. po obronie rozprawy doktorskiej pt. *Model predykcji wektora zapotrzebowania na energię bezpośrednią w systemie krajowym*, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Gliwice 1989, promotor Profesor Irena Dobrzańska. W latach 1992-1993 studiował w Polish-American Workshop on Efficient Use of Energy prowadzonej przez The National Academy of Sciences of the USA i Polską Akademię Nauk.

Impulsem do podjęcia badań z zakresu modelowania energetycznego i środowiskowego był staż naukowy na University of Wisconsin, Madison, USA w 1990 roku w ramach stypendium IREX (International Research and Exchanges Board) oraz współpraca z profesorem Rodneyem E. Stevensonem i drem Wesleyem K. Foellem. Kontynuował współpracę po uzyskaniu Stypendium Kościuszkowskiego, które zapewniło środki na roczny staż na University of Wisconsin, Madison w latach 1992-1993.

W latach 1994-1995 jako kierownik realizował projekt badawczy finansowany przez KBN pt. *Optymalizacja ekologiczna strategii rozwoju systemu elektroenergetycznego*. W ramach projektu opracował modele energetyczne i środowiskowe umożliwiające ekologiczną optymalizację strategii rozwoju systemu elektroenergetycznego.

Udział w *Polish-American Workshop on Efficient Use of Energy* zaowocował współpracą z Donem B. Shireyem z Florida Solar Energy Center (FSEC) oraz Geoffreyem S. Rothwellem z Stanford University w USA. Efektem współpracy jest seria publikacji z zakresu programów racjonalizacji zużycia energii elektrycznej, w tym programów zarządzania popytem na energię elektryczną.

W latach 1997-2000 w wyniku współpracy ze Stanford University (stronę amerykańską reprezentował dr Geoffrey S. Rothwell) podjął badania związane z inwestowaniem w sektorze energetycznym w warunkach ryzyka. W 1998 r. jako koordynator w ramach *Umowy międzyrządowej o współpracy naukowej i naukowo-technicznej z USA* realizował wspólny projekt z Center for Economic Policy Research, Department of Economics, Stanford University pt. *Analyse of the methods of market penetration and customer participation in utility energy efficiency DSM programs*.

W latach 2007-2009 realizował habilitacyjny projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. *Ocena konkurencyjności inwestycji w źródła wytwarzania energii elektrycznej w warunkach niepewności rynkowej*. Efektem projektu jest monografia habilitacyjna nt. *Inwestowanie w źródła wytwarzania energii elektrycznej w warunkach rynkowych*, WPCz, Częstochowa 2008, której redaktorem naukowym była Profesor Irena Dobrzańska. W 2010 roku uzyskał stopień doktora habilitowanego na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.

Janusz Sowiński jest autorem 1 monografii, współautorem 10 monografii oraz ponad 140 publikacji w czasopiśmie i konferencjach międzynarodowych i krajowych.

Prowadzi zajęcia z gospodarki elektroenergetycznej, wpływu energetyki na środowisko, optymalizacji w energetyce, elektrowni, urządzeń elektrycznych i ochrony przeciwporażeniowej. Był wykładowcą wizytującym (Program LLP Erasmus, 2002-2019) na Politechnice w Koszycach, Słowacja. W latach 2000-2006 podjął dodatkowe zatrudnienie w Wyższej Szkole Hotelarstwa i Turystyki w Częstochowie. Prowadził również wykłady na kierunku energetyka w latach 2013-2017 na Wydziale Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki na Uniwersytecie Techniczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy.

Pełnił szereg funkcji na Wydziale Elektrycznym PCz, m.in. kierownika Zakładu Urządzeń Elektrycznych i Gospodarki Elektroenergetycznej, z-cy dyrektora i dyrektora Instytutu Elektroenergetyki, prodziekana ds. studiów niestacjonarnych, a ostatnio kierownika ds. rozwoju Wydziału Elektrycznego PCz.

Odznaczony Srebrnym Krzyżem Zasługi (2004), Medalem Komisji Edukacji Narodowej (2006) i Medalem Złotym za Długoletnią Służbę (2019).

Był sekretarzem (1998-2004) i przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego (2006, 2008), a od 2010 do 2023 r. przewodniczącym Rady Programowej i organizatorem cyklicznej (ostatnio XV edycja) Międzynarodowej Konferencji Naukowej *Prognozowanie w Elektroenergetyce*.

Streszczenia / Abstracts

Spis treści / Contents

Selection of exogenous variables for short-term forecasting of daily loads in the power subsystem, <i>J. Sowiński</i>	12
Prognozowanie produkcji energii słonecznej z wykorzystaniem platformy NEXO i VRM Portal <i>S. Dudzik, B. Kowalczyk</i>	14
Electricity demand forecasting using modern recurrent neural networks: New mechanisms and possibilities, <i>S. Smyl, G. Dudek, P. Pełka</i>	16
Analiza predykcyjna danych pomiarowych wykorzystywanych w systemach nadzorujących pracę urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych, <i>A. Wachtarczyk, J. Sowiński</i>	18
Prognozowanie bilansowych strat energii elektrycznej, <i>A. Gawlak</i>	20
Concept of the International Research Project for Digital Energy Path for Planning and Operation of sustainable grid, products, and society, <i>Ł. Rokicki, M. Parol, P. Piotrowski, M. Kopyt, J. Domaszewski, B. Arendarski, P. Komarnicki</i>	22
Wybrane modele funkcjonowania społeczności energetycznych, <i>M. Sołtysik</i>	24
Magazynowanie energii w magazynach elektrochemicznych z wykorzystaniem akumulatorów LiFePO ₄ i LTO, <i>P. Gałuszkiewicz, Z. Gałuszkiewicz</i>	26
Magazynowanie energii w systemach mikroinstalacji z wykorzystaniem pomp ciepła i magazynów energii elektrycznej oraz ciepła, <i>P. Gałuszkiewicz, Z. Gałuszkiewicz</i>	28
Modelling hysteresis loops of non-oriented electrical steel, <i>K. Chwastek, B. Koprivica, M. Rosić, R. Gozdur, P. Gębara</i>	30
Komputerowe technologie trójwymiarowe w elektroenergetyce, <i>M. Rak, M. Najgebauer, J. Jędryka</i>	32
Nagrzewanie indukcyjne jako proces przemiany strat wirowych w energię cieplną w ruchu liniowym, <i>M. Lis, M. Kobierski, M. Chmiel</i>	34
Ocena stopnia odkształcenia sygnałów w obwodzie z łukiem elektrycznym o zaburzonych parametrach, <i>M. Gała, A. Sawicki, L. Marciniak</i>	36
Audits of road lighting installations – case study, <i>T. Popławski, M. Kurkowski</i>	38
Współpraca energoelektronicznego kompensatora MMC z piecem łukowym AC, <i>M. Gała, K. Jagieła</i>	40
Kompensacja mocy biernej w wybranym zakładzie przemysłowym – stadium przypadku, <i>M. Kornatka</i>	42
Analiza parametrów eksploatacyjnych opraw oświetleniowych LED ze źródłami bezsoczewkowymi – plastic free, <i>M. Kurkowski, T. Popławski, T. Matkowski</i>	44

Selection of exogenous variables for short-term forecasting of daily loads in the power subsystem

Abstract. The selection of a set of explanatory variables in short-term load forecasting STLF models is an important issue from the point of view of assessing the adequacy of the forecasting model. The article presents a review of exogenous variable selection methods that will be used to test the importance of taking into account the external temperature in the construction of the STLF model of the energy subsystem, and the advantages of the Hellwig method in this respect will be demonstrated.

Streszczenie. Wybór zestawu zmiennych objaśniających w krótkoterminowych modelach prognozowania obciążeń STLF jest zagadnieniem istotnym z punktu widzenia oceny adekwatności modelu prognostycznego. W artykule przedstawiono przegląd metod selekcji zmiennych egzogenicznych, które zostaną wykorzystane do przetestowania istotności uwzględnienia temperatury zewnętrznej w budowie modelu STLF podsystemu energetycznych oraz zostaną wykazane zalety metody Hellwiga w tym względzie. (Wybór zmiennych objaśniających w krótkoterminowym prognozowaniu dobowych obciążeń w podsystemie elektroenergetycznym).

Introduction

The construction of a STLF model requires the determination of explanatory (exogenous) variables [1, 2]. The basic selection criterion should be the substantive knowledge of the studied phenomenon. When selecting a potential set of explanatory variables, one should choose such variables that may have a significant impact on the development of the studied phenomenon, represented by the explanatory (endogenous) variable.

When selecting a subset of exogenous variables, the following statistical criteria should be considered:

- Exogenous variables in the model should be characterized by high variability.
- The dependent variable should be strongly correlated with the explanatory variables.
- The explanatory variables of the econometric model should not be significantly correlated with each other.
- It is necessary to strive for the maximum degree of matching the model to real economic relations, which is tantamount to the adequacy of the econometric model, characterized by the significance of the coefficient of determination.

When building an STLF model, we usually have the following explanatory variables to select from: loads shifted in time, calendar variables and weather variables (temperature, rain or snowfall, cloud cover, etc.).

Review of exogenous variable selection methods in econometric regression models

The most popular methods of selecting exogenous variables in econometric models are: the Hellwig method, the method of analysis of the matrix of correlation coefficients, the method of graph analysis, the Pawlowski method and the method of elimination of quasi-permanent variables.

Hellwig method

The Hellwig method [3] of integral information capacity is a simple but effective method of selecting variables according to [1, 3]. The method requires the estimation of the matrix R and the vector R_0 . The elements of the R matrix are correlation coefficients selected in pairs of successive variables marked as i and j from the set of k explanatory variables. The matrix R can be expressed as follows:

$$(1) \quad R = [r_{ij}] \quad i = 1, \dots, k; \quad j = 1, \dots, k$$

The elements of the vector R_0 are correlation factors between the explained variable and the following explaining variables. This vector is described as:

$$(2) \quad R_0 = [r_i] \quad i = 1, \dots, k$$

The following calculations are performed of the so-called contamination of an individual information carrier X_j according to the formula:

$$(3) \quad g_j = \frac{1}{k-1} \sum_{i \neq j} |r_{ij}|$$

Individual capacity of the information carrier X_j of variable Y is calculated using the following equation:

$$(4) \quad h_j = \frac{r_j^2}{1 + \sum_{i \neq j} |r_{ij}|} = \frac{r_j^2}{1 + (k-1)g_j}$$

$(i, j = 1, \dots, k; i \neq j)$

On this basis, the integral capacity of information carriers can be calculated using the following equation:

$$(5) \quad H_m = \sum_{j=1}^k h_j = \sum_{j=1}^k \frac{r_j^2}{1 + \sum_{i \neq j} |r_{ij}|}$$

If this capacity is close to one, it means that the variables constituting a given combination provide almost a complete resource of information of endogenous variable Y . The criterion for selecting the optimal combination of explanatory variables can be expressed as follows:

$$(6) \quad H_{mo} = \max_m H_m$$

where H_{mo} means the integral capacity of information carriers for the optimum combination of variables.

Method of graph analysis

Graph algorithms or graph analytics is used to determine the strength and direction of relationships between graph objects placed in nodes. When variables are selected, the objects are potential explanatory variables, and the arcs represent relationships between variables, described by correlation coefficients.

Pawlowski method

The Pawlowski method uses the maximal determinant of the moment matrix of the explanatory variables. A set of m variables is considered. It is assumed that the model will use k exogenous variables, with $k < m$. The procedure for selecting a combination of variables begins with the determination of the correlation matrix R , and then the submatrix with k variables. The next step is to calculate determinants from the correlation submatrix. The determinant with the highest value indicates the optimal combination of exogenous variables. The explanatory variables are the less correlated with each

other, the greater the value, closer to one, has the value of the determinant.

Review of simultaneous methods of exogenous variable selection

Current variable selection methods are based on both multivariate regression and simultaneous methods [1-14]. The most common methods include: All Subset Models (ASM), Sequential Search (SS), StepWise Regression (SW) based on strategies such as Forward Selection (FS) and Backward Elimination (BE), Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), Elastic Net and Variable Importance Projections (VIP) on Partial Least Squares (PLS).

The All Subset Models (ASM) method [1, 4] compares models built on all combinations of n variables and leads to the selection of the best subset of variables, however, due to the calculation time, it is rather useless for a large number of variables.

Sequential search (SS) is a method of selecting the optimal subset of variables in order to create a model with a given number of variables [5]. Each subsequent variable is selected by replacing it with the remaining variables and selecting the best one according to the adopted criterion.

The most commonly used method is the StepWise (SW) regression method [5, 6]. Using the Forward Selection (FS) procedure, the method starts with a 0-dimensional model and adds successive variables that meet certain criteria. Typically, the variable selected in the next step is the minimization of the Residual Sum of Squares (RSS), which enables the evaluation of the F-Snedecor test comparing models with variables p and $p + j$.

In the case of backward elimination (BE), the maximum number of variables (denoted p) in the model is assumed. The algorithm starts with a p -dimensional model. In the next steps, redundant variables are eliminated to minimize the increase in the RSS value, tested with the F-Snedecor test. The F test could be replaced by the minimization of other statistics, e.g. the Akaike Information Criterion (AIC) is used [7].

In recent years, methods using artificial intelligence have become more and more common, e.g. genetic algorithms (GA) [8, 9], particle swarm optimization (PSO) [10] or ant colony optimization (ACO) [11]. These algorithms were initially used as optimization methods, but have been adapted to carry out the selection of exogenous variables in models.

The LASSO method [12] minimizes RSS with an additional condition that checks if the sum of the absolute values of the factors is less than a predetermined value. This provides a basis for selecting a set of variables, as some regression factors take values equal to 0.

The extension of the LASSO method combined with the ridge regression method results in the Elastic Net method [13]. The additional condition consists of the sum of the absolute values of the factors and the sum of the squares of the components. Such construction of the criterion ensures good results in the selection of highly correlated variables.

The Variable Importance Projection (VIP) method uses the canonical powered of partial least squares (CPPLS) [14]. The VIP coefficient is defined for each variable. Variables with a VIP value less than the defined criterion value (usually equal to 1, since the average VIP is 1) are removed in the selection procedure.

Classification of variable selection methods taking into account procedure typology

In the source literature [1, 2], many procedures for the selection of variables in multidimensional models are

considered. An interesting classification of methods is presented in [2], taking into account the topology of procedures within various model structures. The models were divided into: linear models, models of grouped variables, additive models, partial linear models and non-parametric models. In scientific research, it is always necessary to take into account the context in which particular procedures should be used, what specific problem they address and compare them on this basis.

Three main categories of variable selection procedures have been introduced in [2]. These are the following categories of algorithms: Test-based, Penalty-based and Screening-based.

The first developed are based on statistical tests (e.g., testing residuals for normality, t-tests, etc.). The penalty-based procedures impose constraints on the parameters directly in the estimation process (eg. LASSO and ridge fall etc.). The screening-based procedures are not all designed to do selection intrinsically but rather ranking variables by importance.

Conclusions

Many sources [1-14] provide descriptions of methods for selecting exogenous variables for multidimensional models, e.g. the STLF model [15]. The selection of appropriate subsets of variables can be made in order to show cause-and-effect relationships, improve the accuracy of the forecast, eliminate irrelevant variables (noise reduction) or shorten the modeling time.

REFERENCES

- [1] Cassotti M., Grisoni F., *Variable Selection Methods: An Introduction*, University of Milano-Bicocca, available online: www.molecularDescriptors.eu (accessed on 15 April 2020)
- [2] Desboulets L.D.D., A Review on Variable Selection in Regression Analysis, *Econometrics*, 6 (2018), 45
- [3] Hellwig Z., *Linear Regression and its Application to Economics*, Pergamon Press, Oxford 1963
- [4] Ullah A., Wang H., Parametric and Nonparametric Frequentist Model Selection and Model Averaging, *Econometrics*, 1 (2013), 157-179
- [5] Miller A., *Subset Selection in Regression*, 2nd ed., Chapman & Hall/CRC, Boca Raton 2002
- [6] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., *The elements of Statistical Learning*, 2nd ed., Springer, Berlin 2009
- [7] Akaike H., Fitting autoregressive models for prediction, *Ann. Inst. Stat. Math.*, 21 (1969), 243
- [8] Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Reading, Kluwer Academic, Boston 1989
- [9] Leardi R., Boggia R., Terrile M., Genetic Algorithms as a Strategy for Feature Selection, *J. Chemom.*, 6 (1992), 267-281
- [10] Clerc M., *Particle Swarm Optimization*; ISTE Ltd., London 2006
- [11] Dorigo M., Blum C., Ant Colony Optimization Theory: A Survey, *Theor. Comput. Sci.*, 344 (2005), 243-278
- [12] Tibshirani R., Regression Shrinkage and Selection via the Lasso, *J. R. Stat. Soc. B*, 58 (1996), 267-288
- [13] Zou H., Hastie T., Regularization and Variable Selection via the Elastic Net, *J. R. Stat. Soc. B*, 67 (2005), 301-320
- [14] Indahl U., Liland K., Næs T., Canonical Partial Least Squares: A Unified PLS Approach to Classification and Regression Problems, *J. Chemom.*, 23 (2009), 495-504
- [15] Sowinski J., The Impact of the Selection of Exogenous Variables in the ANFIS Model on the Results of the Daily Load Forecast in the Power Company, *Energies*, 14 (2021)

Author: dr hab. inż. Janusz Sowiński, prof. CUT, Czestochowa University of Technology, Department of Electrical Engineering, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Czestochowa, E-mail: janusz.sowinski@pcz.pl

Prognozowanie produkcji energii słonecznej z wykorzystaniem platformy NEXO i VRM Portal

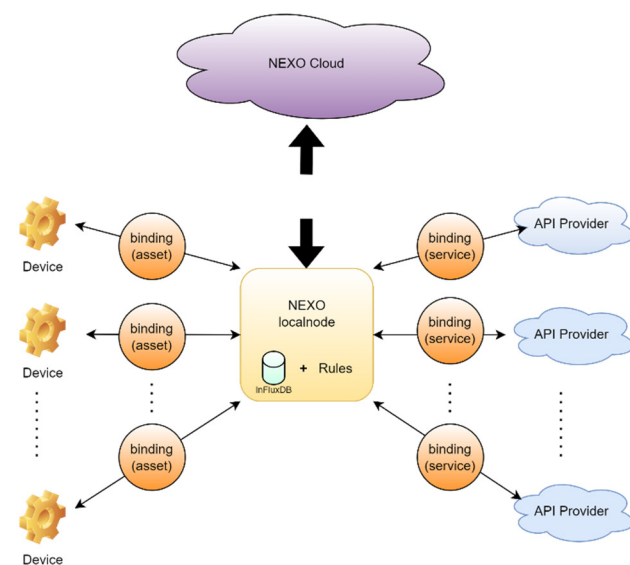
Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki prognozowania produkcji energii słonecznej z wykorzystaniem dwóch modeli regresyjnych: regresji LASSO oraz lasu losowego. Dane o produkcji energii uzyskano z użyciem mikroinstalacji Victron. Dzięki połączeniu usługi VRM Portal oraz platformy teleinformatycznej NEXO możliwe było pozyskanie danych niezbędnych do nauki modeli prognostycznych. W artykule zaprezentowano metodykę modelowania produkcji energii słonecznej z użyciem języka Python oraz biblioteki SkForecast. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że najlepszą prognozę uzyskuje się, stosując model lasów losowych.

Abstract. The paper presents forecasting of solar energy production using two regression models: LASSO regression and random forest. Data on energy production was obtained using Victron micro-installations. Thanks to the combination of the VRM Portal service and the NEXO platform, it was possible to obtain the data necessary to learn forecasting models. The article presents the methodology of solar energy production modeling using the Python language and the SkForecast library. Based on the test results, it was found that the best forecasts are obtained using the random forests model. (Forecasting of solar energy production using the NEXO platform and VRM Portal).

Platforma teleinformatyczna NEXO

Obecnie Internet Rzeczy (*IoT, Internet of Things*) jest jedną z najdynamiczniej rozwijających się technologii informatycznych [1]. W dużej mierze rozwój ten jest wynikiem coraz większej dostępności technologii sieciowych i Internetu w wielu gałęziach przemysłu oraz dla odbiorców indywidualnych, a także wzrostu liczby urządzeń posiadających zaawansowane możliwości komunikacyjne [2]. Koncepcja Internetu Rzeczy wciąż ewoluje, a obszar jego zastosowań poszerza się. Rozwojowi *IoT* silnie sprzyja również trend cyfryzacji przemysłu oraz życia codziennego, w którym coraz większą rolę odgrywają inteligentne urządzenia lub usługi cyfrowe [2, 3]. W najprostszej postaci Internet Rzeczy to technologia pozwalająca na komunikację pomiędzy wieloma urządzeniami końcowymi (ang. *edge devices*) oraz usługami sieciowymi (ang. *services*), w tym chmurami obliczeniowymi (ang. *cloud computing*).

Jednym z dostępnych systemów *IoT* pozwalających na integrację wielu urządzeń automatyki budynkowej z wykorzystaniem popularnych protokołów *IoT* jest platforma teleinformatyczna NEXO. Architektura platformy dla jednego węzła lokalnego (ang. *local node*) została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Architektura platformy NEXO

Konektor VICTRON

Mikroinstalacja utworzona z wykorzystaniem przetwornicy VICTRON umożliwi optymalną współpracę pomiędzy

inwerterami PV, magazynem energii, instalacją odbiorczą oraz siecią elektroenergetyczną. Dzięki zastosowaniu specjalistycznego oprogramowania możliwe jest wdrażanie optymalnych algorytmów sterowania przepływem energii elektrycznej wewnątrz mikroinstalacji.

Jednym z konektorów usługi dostępnych na platformie NEXO jest konektor Victron API (*VRM binding*), pozwalający na dostęp do danych reprezentujących stan mikroinstalacji prosumenckiej zbudowanej w oparciu o przetwornice firmy Victron i oprogramowanie w chmurze Victron Energy VRM Portal. Struktura konektora VRM binding ściśle odpowiada interfejsowi VICTRON API 2.0. W jej skład wchodzi punkty końcowe (ang. *endpoints*) oraz mechanizmy autentykacji zgodne ze standardem REST API.

Jednym z celów badań przeprowadzonych w niniejszej pracy było opracowanie algorytmu prognozowania produkcji energii słonecznej. Do realizacji tego zadania zastosowano wybrane modele uczenia maszynowego. Dane do trenowania i testowania modeli pozyskano z wykorzystaniem konektora VICTRON współpracującego z platformą NEXO.

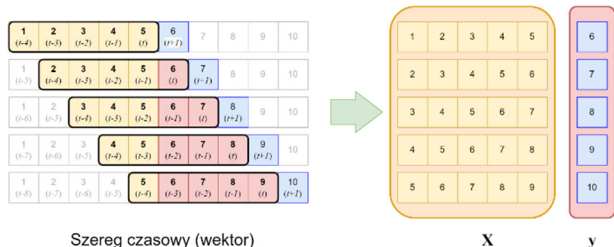
Prognozowanie produkcji energii słonecznej z wykorzystaniem biblioteki SkForecast

Prognozowanie szeregów czasowych polega na wyznaczeniu przyszłych wartości zmiennej w czasie wielkości na podstawie modelu i wartości tej wielkości zmierzonych w przeszłości [4]. W niniejszej pracy wielkością podlegającą prognozowaniu jest ilość energii elektrycznej, produkowanej z wykorzystaniem instalacji fotowoltaicznej będącej jednym z elementów mikroinstalacji prosumenckiej zbudowanej z wykorzystaniem systemu Victron Energy.

Istnieje wiele metod prognozowania szeregów czasowych używanych do prognozowania produkcji energii fotowoltaicznej, w tym m.in.: *Autoregressive Moving Average (ARMA)*, *Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)*, *Seasonal Autoregressive Integrated Moving-Average (SARIMA)* [5, 6] lub też model stworzony przez pracowników firmy Facebook, oparty na uogólnionym modelu addytywnym z wykorzystaniem sezonowości i kalendarza zdarzeń [7]. W niniejszej pracy zaproponowano odmienne podejście. Do prognozowania produkcji energii słonecznej zastosowano znane modele regresyjne, takie jak lasy losowe i regresja z regularyzacją (LASSO) [8]. Dla tak sformułowanego zadania prognozowania niezbędne było przekształcenie szeregu czasowego do formatu typowego dla algorytmów regresyjnych z wykorzystaniem biblioteki SkForecast.

Otwartoźródłowe oprogramowanie Skforecast, stworzone w języku Python, pozwala na prognozowanie

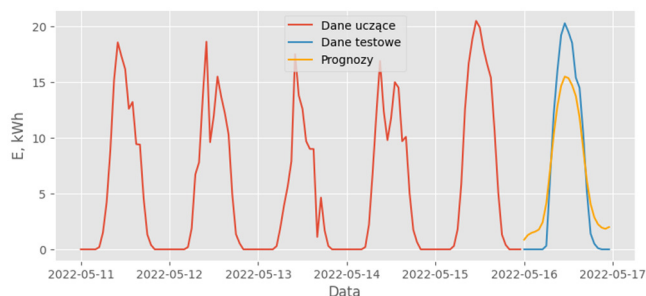
szeregów czasowych z wykorzystaniem typowych algorytmów regresji, wchodzących w skład biblioteki scikit-learn stanowiącej światowy standard w dziedzinie uczenia maszynowego w języku Python [9, 10]. Podstawowym zadaniem procedur zaimplementowanych w ramach biblioteki SkForecast jest transformacja szeregu czasowego zapisanego w postaci wektora do formy macierzowej, możliwej do przetwarzania przez algorytmy regresji. Schemat przekształcenia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat przekształcenia szeregu czasowego w postaci wektora do formy macierzowej

Wyniki badań

W badaniach zastosowano dwa rodzaje modeli uczenia maszynowego, tj. regularyzowaną regresję liniową LASSO oraz lasy losowe. Do badań użyto szeregów czasowych reprezentujących energię wyprodukowaną przez elektrownię fotowoltaiczną w marcu i maju 2022 roku, pozyskanych z wykorzystaniem platformy NEXO i konektora VICTRON. W pierwszym etapie badań przeprowadzono czyszczenie danych, w tym uzupełnianie danych brakujących, a także usunięcie wartości odstających (ang. *outliers*). Przetwarzanie wstępne prowadzono z użyciem bibliotek Numpy i Pandas języka Python. Kolejnym etapem był podział szeregów czasowych na zbiory uczące i testowe. W dalszej kolejności prowadzono trening modeli uczenia maszynowego i strojenie hiperparametrów. Przykładowe wyniki prognozowania produkcji energii w wybranym tygodniu maja 2022 r. zaprezentowano na rysunku 3. Prognozy uzyskano z użyciem modelu LASSO dla współczynnika kary $\alpha = 1,0$ i liczby opóźnień $l = 24$.

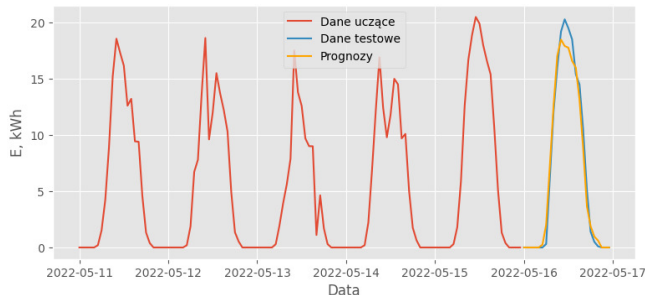


Rys. 3. Wyniki prognozowania produkcji energii (model LASSO, $\alpha = 1,0$, $l = 24$)

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki prognozowania produkcji energii dla tego samego przedziału czasowego z użyciem modelu lasu losowego dla maksymalnej głębokości drzewa $max_depth = 6,0$, liczby drzew $n_estimators = 8$ i liczby opóźnień $l = 36$.

Wnioski

W pracy przeprowadzono badania mające na celu uzyskanie prognoz produkcji energii elektrycznej dla elektrowni fotowoltaicznej wchodzącej w skład mikroinstalacji prosumenckiej zbudowanej w oparciu o przetwornicę VICTRON.



Rys. 4. Wyniki prognozowania produkcji energii (las losowy, $max_depth = 6$, $n_estimators = 8$, $l = 24$)

Do prognozowania użyto modeli LASSO i lasu losowego, przy czym modele trenowano na danych pozyskanych z wykorzystaniem platformy NEXO. W trakcie analizy wyników badań stwierdzono m.in., że dokładność obu badanych modeli ściśle zależy od liczby opóźnień l . Dodatkowo stwierdzono, że w przypadku modelu LASSO duży wpływ na dokładność ma współczynnik kary α , natomiast w przypadku lasu losowego istotną rolę grają odpowiednio liczba drzew i maksymalna głębokość drzewa. Ostatecznie największą dokładność prognoz na danych testowych, wyrażoną w postaci miary MAE równej 0.74 kWh (*mean absolute error*), uzyskano dla modelu lasu losowego.

Artykuł powstał w ramach działań mających na celu rozpowszechnienie rezultatów osiągniętych w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0767/17 „SmartX - platforma do integracji rozwiązań inteligentnego budynku” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



LITERATURA

- [1] Hasan Q.F., A. ur Rehman Khan, Madani S.A., *Internet of Things. Challenges, Advances and Applications*, CRC Press, New York 2018
- [2] Miller M., *Internet rzeczy. Jak inteligentne telewizory, samochody, domy i miasta zmieniają świat*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2016
- [3] Li M., Gu W., Chen W., He Y., Wu Y., Zhang Y., Smart Home: Architecture, Technologies and Systems, *Procedia Computer Science*, 131 (2018), 393-400
- [4] Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M., *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2015
- [5] Percival D.B., Walden A.T., *Spectral Analysis for Physical Applications*, Cambridge University 1993
- [6] Nespoli A., Ogliari E., Leva S., Massi Pavan A., Mellit A., Lughì V., Dolara A., Day-Ahead Photovoltaic Forecasting: A Comparison of the Most Effective Techniques, *Energies*, 12 (2019), 1621
- [7] Harvey A., Peters S., Estimation Procedures for Structural Time Series Models, *Journal of Forecasting*, 9 (1990), 89-108
- [8] Kim S.J., Koh K., Lustig M., Boyd S., Gorinevsky D., An Interior-Point Method for Large-Scale L1-Regularized Least Squares, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 1 (2007), 4, 606-617
- [9] Strona internetowa biblioteki scikit-learn. <https://scikit-learn.org/>
- [10] Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 12 (2011), 2825-2830

Autorzy: dr hab. inż. Sebastian Dudzik, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: sebastian.dudzik@pcz.pl; dr inż. Bartosz Kowalczyk, ConnectPoint sp. z o.o., ul. Zagadki 21, 02-227 Warszawa, E-mail: bartosz.kowalczyk@connectpoint.pl

Electricity demand forecasting using modern recurrent neural networks: New mechanisms and possibilities

Abstract. The article presents modern gated recurrent neural networks for forecasting electricity demand. Their hybridization with exponential smoothing is described, as well as new mechanisms to facilitate forecasting challenging electricity demand time series such as attention, dilated connections, on-the-fly deseasonalization, cross-learning and ensembling.

Streszczenie. Artykuł przedstawia nowoczesne, bramkowe rekurencyjne sieci neuronowe do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Opisana jest ich hybrydyzacja z wygładzaniem wykładniczym oraz nowe mechanizmy ułatwiające prognozowanie trudnych szeregów czasowych zapotrzebowania na energię elektryczną, takie jak atencja, połączenia rozszerzone, dynamiczne odsezonowanie, uczenie krzyżowe i łączenie wyników. (Prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną z wykorzystaniem nowoczesnych rekurencyjnych sieci neuronowych: nowe mechanizmy i możliwości).

Introduction

We present a hybrid architecture combining exponential smoothing (ES) and recurrent neural network (RNN) for short-term load forecasting (STLF). The model produces both point forecasts and predictive intervals (PIs) using various built-in mechanisms and procedures. It predicts the daily load profile (24 hours) for the next day based on historical loads.

Model architecture

Figure 1 illustrates two versions of the model. The ES-adRNN variant combines ES and dilated RNN with an attention mechanism. The cES-adRNN variant extends this architecture by incorporating a context track. The context track generates a dynamic context vector based on the representative group of time series (TS).

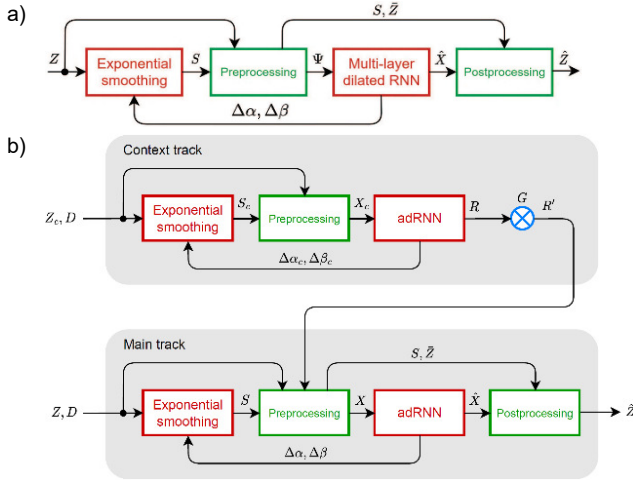


Fig. 1. Model architectures: a) ES-adRNN, b) cES-adRNN

Data preprocessing and extended inputs

Input (Δ_t^{in}) and output (Δ_t^{out}) windows are defined as shown in Figure 2. The input sequences are preprocessed as follows: $x_t = \log \frac{z_t}{\hat{z}_t s_{t,\tau}}$. To enrich the input information, the input patterns are extended as follows: $\mathbf{x}_t^{in} = [\mathbf{x}_t^{in}, \hat{\mathbf{s}}_t, \log_{10}(\hat{z}_t), \mathbf{d}_t^w, \mathbf{d}_t^m, \mathbf{d}_t^y]$, where $\mathbf{x}_t^{in} = [x_{t,\tau}^{in}]_{\tau \in \Delta_t^{in}}$; $\hat{\mathbf{s}}_t$ – a seasonal vector predicted by ES for the t -th output period reduced by 1; $\log_{10}(\hat{z}_t)$ – a current level of the time series; $\mathbf{d}_t^w, \mathbf{d}_t^m, \mathbf{d}_t^y$ – binary one-hot vectors encoding day of the week, day of the month and week of the year for the forecasted day, respectively.

In cES-adRNN the input pattern is additionally extended by a modulated context vector from the context track, \mathbf{r}_t^c .

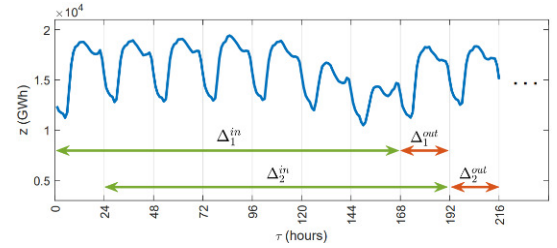


Fig. 2. Sliding windows defining input and output sequences

Dynamic exponential smoothing component

We propose a dynamic Holt-Winters model of the form:

$$l_{t,\tau} = \alpha_t \frac{z_t}{s_{t,\tau}} + (1 - \alpha_t) l_{t,\tau-1}, \quad s_{t,\tau+168} = \beta_t \frac{z_t}{l_{t,\tau}} + (1 - \beta_t) s_{t,\tau}$$

where $l_{t,\tau}$ is a level component, $s_{t,\tau}$ is a weekly seasonal component, and $\alpha_t, \beta_t \in [0,1]$ are smoothing coefficients, all for recursive step t .

The smoothing coefficients are adapted using corrections $\Delta \alpha_t$ and $\Delta \beta_t$ learned by RNN as follows: $\alpha_{t+1} = \sigma(I\alpha + \Delta \alpha_t)$, $\beta_{t+1} = \sigma(I\beta + \Delta \beta_t)$, where $I\alpha$ and $I\beta$ are initial values of the smoothing coefficients, and σ is a sigmoid function.

Recurrent cell with dilation and attention mechanisms

adRNNCell shown in Figure 3 combines two dRNNCells to obtain a more efficient cell, which is able to preprocess dynamically the input data. The bottom dRNNCell produces attention vector \mathbf{m}_t , whose components weight the inputs to the upper dRNNCell. Vector \mathbf{m}_t has a dynamical character. It is adjusted to the current inputs at time t .

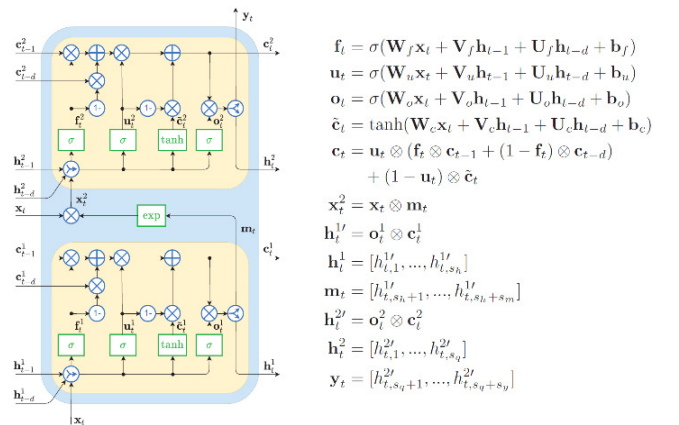


Fig. 3. New recurrent cells with dilation and attention mechanisms (adRNNCell)

Hierarchical RNN architecture

RNN has several layers with hierarchical dilations, which helps to extract more abstract features in successive layers and obtain a larger receptive field (Fig. 4). This makes it easier to learn the long-term and seasonal temporal dependencies of different scales.

The input linear layer reduces the dimensionality of the calendar variables by embedding them in r -dimensional continuous space. The output linear layer of the main track produces corrections for ES, $\Delta\alpha_t$ and $\Delta\beta_t$, point forecasts, \hat{x}_t^{RNN} , and two vectors of quantiles: a lower one, \hat{x}_t^{RNN} , and an upper one, \hat{x}_t^{RNN} . These quantiles of assumed orders, q and \bar{q} , define PI. RNN uses ResNet-style shortcuts between blocks to improve the learning process. In the context track, the output linear layer produces corrections $\Delta\alpha_t$ and $\Delta\beta_t$, and context vector r_t .

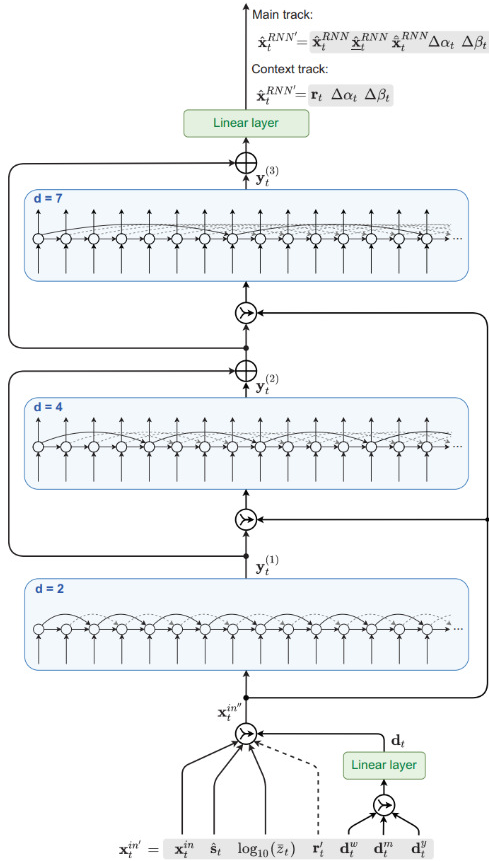


Fig. 4. adRNN architecture (the link shown with a dashed line does not exist in the context track)

Quantile loss function

To enable RNN to learn both point forecasts and PI quantiles, we employ the following loss function:

$$L_\tau = \rho(z'_\tau, \hat{z}'_{q^*, \tau}) + \gamma[\rho(z'_\tau, \hat{z}'_{q, \tau}) + \rho(z'_\tau, \hat{z}'_{\bar{q}, \tau})]$$

where $\rho(z, \hat{z}_q) = (z - \hat{z}_q) \left(q - \mathbf{1}_{(z < \hat{z}_q)} \right)$ is a pinball loss, z is an actual value; \hat{z}_q is a forecasted value of q -th quantile; $q \in (0, 1)$ is a quantile order; $q^* = 0.5$ corresponds to the median; $z'_\tau = z_\tau / \bar{z}_\tau$ is a normalized actual time series value from output window Δ_t^{out} ; $\hat{z}'_{q^*, \tau} = \exp(\hat{x}_\tau) \hat{s}_{t, \tau}$ is a forecasted value of z'_τ ; q and \bar{q} are the quantile orders for the lower and upper bounds of PI, respectively; $\hat{z}'_{q, \tau} = \exp(\hat{x}_\tau) \hat{s}_{t, \tau}$ is a forecasted value of q -quantile of z'_τ ; $\hat{z}'_{\bar{q}, \tau} = \exp(\hat{x}_\tau) \hat{s}_{t, \tau}$ is

a forecasted value of \bar{q} -quantile of z'_τ ; and $\gamma \geq 0$ is a controlling parameter.

Experimental study

We evaluated the proposed models on the STLF problem for 35 European countries. The data period is from 2006 to 2018. The models were optimized on data from the period 2006-17 and tested on data from 2018.

Table 1 compares the results with the baseline models. GWtest in this table is a percentage of cases for which a given model is significantly better in terms of MAPE than other models using a pairwise one-sided Giacomini-White test at $\alpha = 0.05$. "e5" and "e100" depict ensemble of 5 or 100 members, respectively.

Table 1. Forecast quality metrics

Model	MAPE	MdAPE	lqrAPE	RMSE	MPE	StdPE	GWtest
Naive	5.08	4.84	3.32	704.34	-0.26	7.91	1.05
ARIMA	3.30	3.01	3.00	475.09	-0.01	5.31	18.35
ES	3.11	2.88	2.73	439.26	0.01	5.13	27.37
Prophet	4.53	4.32	3.03	619.39	-0.13	6.82	6.77
N-WE	2.49	2.28	2.30	332.49	-0.13	4.26	59.25
GRNN	2.48	2.28	2.27	332.91	-0.11	4.25	61.80
MLP	2.92	2.68	2.78	395.72	0.09	5.04	33.68
SVM	2.55	2.29	2.52	357.24	-0.13	4.37	56.69
LSTM	2.76	2.57	2.52	381.76	0.02	4.47	39.70
ANFIS	3.65	3.17	3.66	507.08	-0.10	6.43	13.53
MTGNN	2.87	2.62	2.59	372.65	-0.02	4.64	33.68
DeepAR	3.42	3.25	2.95	487.14	-0.51	5.16	18.59
WaveNet	3.03	2.84	2.69	417.49	-0.83	4.68	28.42
N-BEATS	2.56	2.36	2.39	356.83	-0.04	4.29	51.58
LGBM	2.87	2.60	2.52	391.16	-0.05	4.64	36.99
XGB	2.69	2.43	2.42	366.97	0.00	4.20	48.57
ES-adRNNe100	2.14	1.93	2.09	290.89	-0.11	3.60	81.95
cES-adRNN	2.08	1.86	2.04	281.15	-0.25	3.39	84.66
cES-adRNNe5	1.96	1.74	1.93	265.37	-0.25	3.22	93.23
cES-adRNNe100	1.93	1.71	1.91	262.65	-0.25	3.19	95.49

Conclusions

The experimental study performed on a challenging STLF problem with multiple seasonality showed that the proposed model outperformed in terms of accuracy its competitors. The model is equipped with many mechanisms and procedures designed to increase forecasting efficiency:

- hybrid architecture – ES for on-the-fly preprocessing and RNN for modeling temporal dependencies in the series,
- hierarchical RNN, which learns temporal dependencies of different scales at different layers,
- context RNN that provides additional global information to the main RNN,
- new recurrent cell with dilation and attention mechanisms, which help in modelling seasonal dependencies as well as selecting input information,
- dynamic ES model – RNN corrects ES parameters in each recurrent cycle,
- cross-learning, i.e. learning on multiple time series in the same time, which enables RNN to capture shared features of the individual series and prevents over-fitting,
- composed asymmetrical loss function based on quantiles, which enables RNN to produce both point forecasts and PIs, and also to reduce the forecast bias,
- ensembling and mechanisms to delay overfitting.

Authors: mgr inż. Sławek Smyl, independent researcher, E-mail: slaweks@hotmail.co.uk; dr hab. inż. Grzegorz Dudek, prof. CUT and Paweł Pełka, Czestochowa University of Technology, Department of Electrical Engineering, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: grzegorz.dudek@pcz.pl, pawel.pelka@pcz.pl

Analiza predykcyjna danych pomiarowych wykorzystywanych w systemach nadzorujących pracę urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych

Streszczenie. Analiza predykcyjna jest procesem wydobywania informacji z zebranych wcześniej danych w celu przewidywania przyszłych trendów i zdarzeń. Wykonane badania mają na celu zbudowanie modelu predykcyjnego wspomagającego pracę systemów urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych (eor). W artykule opisano wykorzystanie klasyfikatorów k -NN oraz drzewa decyzyjne w celu predykcji stanu pracy urządzeń eor.

Abstract. Predictive analytics is the process of extracting information from previously collected data in order to anticipate future trends and events. The research carried out is aimed at building a predictive model supporting the operation of electrical heating devices for railway junctions (eor). The article describes the use of k -NN classifiers and decision trees to predict the operating state of eor devices. (**Predictive analysis of measurement data used in systems supervising the operation of electric heating devices at railway junctions.**)

Wstęp

Rozjazd kolejowy jest newralgicznym elementem drogi kolejowej, szczególnie narażonym na negatywne oddziaływanie śniegu i niskich temperatur. Najstarszym sposobem usuwania śniegu z rozjazdów jest ręczne oczyszczanie rozjazdów. Obecnie do oczyszczania przestrzeni roboczej rozjazdów kolejowych stosowane są systemy ogrzewania rozjazdów, m.in. elektryczne ogrzewanie rozjazdów (eor). Można zauważyć znaczący wzrost łącznej mocy zainstalowanych grzejników w nowo projektowanych urządzeniach, w szczególności w powszechnie stosowanych rozjazdach typu Rz190 i Rz300. Monitoring i sterowanie pracą instalacji eor [1] realizowane są przez automat pogodowy (np. model APR-11 w przypadku urządzeń prod. AREX Sp. z o.o. – system DIMaC-EK). Automat może być zabudowany w rozdzielnicy REOR lub na nastawni, umożliwiając tym samym dyżurnemu sterowanie pracą urządzeń. Jednocześnie pozyskane dane są na bieżąco przesyłane i archiwizowane. Poprzez transmisję bezprzewodową możliwy jest zdalny monitoring pracy urządzeń.

Zbudowanie modelu predykcyjnego wspomagającego pracę systemów urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych wymaga analizy predykcyjnej danych pomiarowych.

Dane pomiarowe w analizie predykcyjnej

Urządzenia eor mogą być sterowane ręcznie lub automatycznie. Dla urządzeń eor wymagany jest poszerzony zakres przesyłania danych [1]: informacje dotyczące napięcia fazowego i międzyfazowego, moce pobierane w poszczególnych obwodach, temperatura szyny ogrzewanej, temperatura szyny nieogrzewanej, temperatura zamknięcia (opcja), wykrycie śniegu przez czujnik śniegu nawiewanego, wykrycie wilgoci przez czujnik wilgoci.

System monitoringu urządzeń elektroenergetyki kolejowej SMUE pozwala na bieżący podgląd parametrów pracy urządzeń oraz umożliwia zbieranie (archiwizowanie) danych.

Dane do badań pozyskano z urządzenia pomiarowego eor na jednej ze stacji kolejowych w woj. małopolskim. Analizę prowadzono na zebranych danych pomiarowych (dane źródłowe) z 30 dni okresu zimowego – styczeń 2013 r. Pozyskano w ten sposób blisko 12 tysięcy (rekordów) odczytów. Dane te, przedstawione na rysunku 1, mają postać danych źródłowych i kodów, obejmujących: datę i godzinę pomiaru (kolumny A i B, przetworzone dane kolumny C i H), binarny parametr załączenia grzałek

(kolumna D), temperaturę zewnętrzną, temperaturę szyny zimnej i szyny ogrzewanej (kolumny E, F, G), stan wykrycia opadów śniegu oraz wykrycia wilgoci (kolumny I oraz J) podane w formie liczbowej w zakresie od 0 do 7; gdzie poszczególne cyfry oznaczają: „0” – brak wykrytego śniegu, „1” to śnieg wypadkowy, zawiera w sobie wszystkie pomiary własne i nadesłane przez sterownik nadrzędny rozdzielnicy, „2” to śnieg wykryty przez przetwornik pogodowy, „4” to śnieg wykryty na podstawie wilgoci i prognozy temperatury, cyfry „3”, „5”, „6” i „7” są odpowiednio sumą arytmetyczną ww. cyfr.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	dd.mm.crrk	godz.mn.sc	narastajaco przyrost_cz [0 / 1] asu	załączenie_o grzewania	Temp_powietrza [°C]	Temp_szynyzimnej [°C]	Temp_szynyoogrzewanej [°C]	przyrost_s	Stan wykrycia śniegu	Stan wykrycia wilgoci
100	02.01.2013	10:00:00	00:08:53	0	1,2	0,1	2,1	533,000	0	0
101	02.01.2013	10:00:30	00:00:30	0	1,1	0,1	2,1	30,000	0	0
102	02.01.2013	10:07:55	00:07:25	0	1,2	0,3	1,8	445,000	0	3
103	02.01.2013	10:08:25	00:00:30	0	1,2	0,1	2	30,000	0	3
104	02.01.2013	10:10:05	00:01:40	0	1,2	0,1	1,8	100,000	0	1
105	02.01.2013	10:11:26	00:01:21	0	1,1	0,2	1,7	81,000	0	3
106	02.01.2013	10:13:31	00:02:05	0	1,1	0,2	1,7	125,000	0	1
107	02.01.2013	10:15:16	00:01:45	0	1	0,2	1,7	105,000	0	3
108	02.01.2013	10:15:46	00:00:30	0	1	0,2	1,7	30,000	0	1
109	02.01.2013	10:17:43	00:01:57	0	1	0,1	1,6	117,000	0	3
110	02.01.2013	10:18:22	00:00:39	0	1	0,2	1,5	39,000	0	1
111	02.01.2013	10:19:20	00:00:58	0	0,9	0,2	1,5	58,000	0	3
112	02.01.2013	10:20:56	00:01:36	0	0,9	0,1	1,4	46,000	0	1
113	02.01.2013	10:29:45	00:08:49	1	0,7	0,2	1,3	529,000	5	1
114	02.01.2013	10:30:15	00:00:30	1	0,7	0,1	1,3	30,000	5	1
115	02.01.2013	10:31:33	00:01:18	1	0,7	0,2	1,1	78,000	0	0
116	02.01.2013	10:32:03	00:00:30	1	0,7	0,1	1,2	30,000	5	3
117	02.01.2013	10:32:33	00:00:30	1	0,7	0,1	1,2	30,000	5	1
118	02.01.2013	10:33:25	00:00:52	1	0,7	0,1	1,3	52,000	5	3
119	02.01.2013	10:34:46	00:01:21	1	0,6	0,1	1,5	81,000	0	0
120	02.01.2013	10:35:16	00:00:30	1	0,6	0,1	1,5	30,000	0	0
121	02.01.2013	10:37:17	00:02:01	1	0,6	0,2	2,1	121,000	5	3
122	02.01.2013	10:37:47	00:00:30	1	0,6	0,1	2,2	30,000	5	3
123	02.01.2013	10:38:17	00:00:30	1	0,6	0,2	2,4	30,000	5	1

Rys. 1. Przykładowe dane pomiarowe wykorzystane w analizie (Źródło: opracowanie własne)

Zastosowania klasyfikatorów k -NN i drzew decyzyjnych w analizie danych pomiarowych eor

Najistotniejszym zadaniem klasyfikacji jest budowa określonego modelu, który służy do predykcji przydziału do klasy prognozowanej zmiennej. Wybranymi przykładami metod nadzorowanych (uczenie maszynowe) są:

- algorytmy k -NN (k -najbliższych sąsiadów) – metoda hierarchiczna,
- drzewa decyzyjne – metoda niehierarchiczna.

W algorytmie k -NN dane pomiarowe dzieli się na zbiór testowy i zbiór treningowy. Klasyfikator, opierając się na zbiorze treningowym, uczy się właściwości danych i przypisuje każdemu wektorowi klasę, czyli wartość decyzyjną, będącą wielkością wyjściową modelu. Dokładność klasyfikatora wyznaczana jest poprzez

porównanie wartości decyzyjnych ze zbioru testowego z klasami przewidzianymi z użyciem tego modelu [2-4].

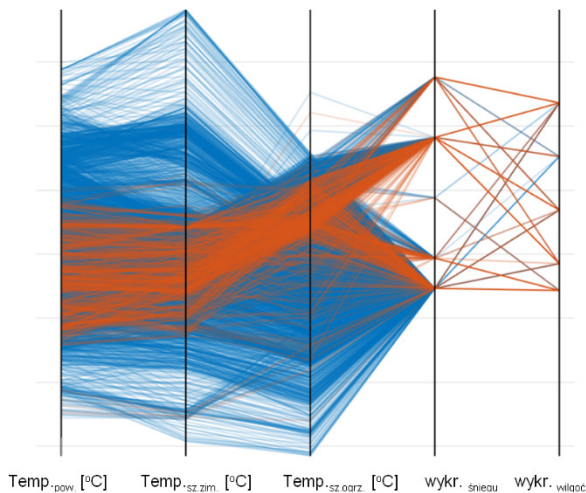
W celu uniknięcia nadmiernego przystosowania (przeuczenia) klasyfikatora do danych (tzw. overfitting) zastosowano metodę sprawdzianu krzyżowego (cross-validation), polegającego na podziale próby statystycznej na K podzbiorów, a następnie przeprowadzeniu analiz na niektórych z nich – każdy z nich jako testowy, a wszystkie pozostałe jako zbiór uczący, a następnie dokonanie uśrednienia rezultatów w celu uzyskania klasyfikatora lepszego jakościowo). Sprawdzenie krzyżowe pozwala wyeliminować tzw. błędy trzeciego rodzaju i właściwie ocenić trafność diagnostyczną modelu predykcyjnego.

Dzięki zastosowaniu klasyfikacji nadzorowanej określono, do jakiej klasy należy określona próbka danych, co pozwala na interpretowanie wyników analizy. Klasyfikatory pozwalają nam z pewną celnością odróżnić, w których momentach urządzenia grzejne eor powinny być załączone, a w których nie.

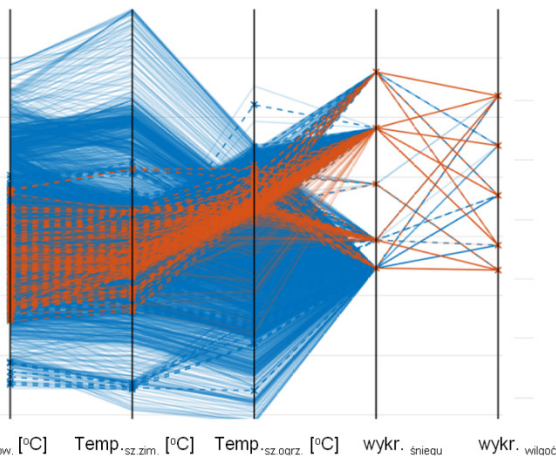
Drzewo decyzyjne (klasyfikacyjne) jest grafem, w którym każdy wewnętrzny węzeł odpowiada pewnej hipotetycznej decyzji, a elementy końcowe (liście) reprezentują cele (klasy, do których należą obiekty) [2, 3]. Drzewa decyzyjne są istotnym narzędziem w uczeniu maszynowym i eksploracji danych, są one powszechnie wykorzystywane do rozwiązywania problemu klasyfikacji danych.

Rezultaty analizy

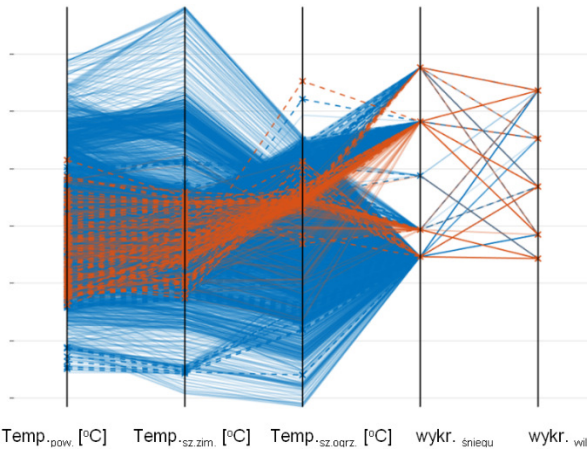
Na rysunku 2 przedstawiono dane pomiarowe na wykresie współrzędnych równoległych.



Rys. 2. Reprezentacja danych na wykresie współrzędnych równoległych (Źródło: opracowanie własne)



Rys. 3. Klasyfikacja danych z użyciem klasyfikatora k -NN (k -najbliższych sąsiadów) (Źródło: opracowanie własne)



Rys. 4. Klasyfikacja danych z użyciem klasyfikatora drzewiastego (drzewa decyzyjne) (Źródło: opracowanie własne)

Legenda do rysunków 2-4:

- kolor pomarańczowy – klasa „1” (grzanie włączone),
- kolor niebieski – klasa „0” (grzanie wyłączone),
- czarne pionowe linie (słupki) – (kolejno od lewej): wartość temperatury powietrza, wartość temperatury szyny zimnej, wartość temperatury szyny ogrzewanej, wykrycie śniegu, wykrycie wilgoci.

Przykłady klasyfikacji z zastosowaniem klasyfikatorów k -NN przedstawiono na rysunku 3, natomiast na rysunku 4 pokazano klasyfikację z użyciem drzewa decyzyjnego.

Uzyskana dokładność klasyfikacji metodą k -NN wynosi 87,4%, a z użyciem drzewa decyzyjnego 88,4%.

Wnioski

Algorytm k -NN najbliższych sąsiadów jest użyteczny szczególnie wtedy, gdy zależność między zmiennymi objaśniającymi a objaśnianymi jest złożona lub nietypowa (np. niemonotoniczna), czyli trudna do modelowania w klasyczny sposób. W badaniach ustawiono k -krotny ($k = 5$) sprawdzian krzyżowy, co pozwoliło na uzyskanie klasyfikatorów nie idealnie dopasowanych do danych, lecz do ogólnego trendu.

W analizie predykcyjnej uzyskano dużą zbieżność rezultatów klasyfikacji metodą k -NN i klasyfikacji drzewa decyzyjnego do danych pomiarowych (uzyskana dokładność klasyfikacji odpowiednio 87,4 i 88,4%)

LITERATURA

- [1] Wytyczne do projektowania urządzeń elektrycznego ogrzewania rozjazdów PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. – Instrukcja let-5, Warszawa 2015.
- [2] Everitt B.S., Landau S., Leese M., Stahl D., *Miscellaneous Clustering Methods*, in *Cluster Analysis*, 5th Edition, John Wiley & Sons, Chichester 2011
- [3] Nguyen H.S., *Systemy decyzyjne*, Uniwersytet Warszawski, 2011, <https://mst.mimuw.edu.pl/lecture.php?lecture=syd>
- [4] *K-nearest neighbors algorithm*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/K-nearest_neighbors_algorithm (access 25 April 2023)

Autorzy: mgr inż. Artur Wachtarczyk, absolwent studiów doktoranckich, Politechnika Częstochowska; dr hab. inż. Janusz Sowiński, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: janusz.sowinski@pcz.pl

Prognozowanie bilansowych strat energii elektrycznej

Streszczenie. Punktem wyjścia do analiz są obliczenia strat technicznych i handlowych w sieciach dystrybucyjnych, a następnie z pomocą określonych związków korelacyjnych wiążących te straty z różnicą bilansową – określenie różnicy bilansowej. Wykorzystana została Metodologia Dualnego Sprzężenia (MDS), łącząca obliczenia inżynierskie poprzez wykorzystanie autorskiego programu EUROEFEKT oraz statystyczne – analizę regresji i korelacji.

Abstract. The starting point for the analyses are calculations of technical and commercial losses in distribution networks, and then, with the help of specific correlation relationships linking these losses with the balance sheet difference, determination of the balance sheet difference. The Dual Coupling Methodology (MDS) was used, combining engineering calculations through the use of the proprietary EUROEFEKT program and statistical – regression and correlation analysis. **(Forecast of balance losses).**

Wstęp

Porównywanie strat energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych wymaga znajomości wielu aspektów. Sieci dystrybucyjne są bardzo zróżnicowane nie tylko pod względem struktury sieci, ale również wolumenu dostawy energii elektrycznej. Ich wielkość zależy od szeregu czynników, takich jak gęstość obciążenia sieci (MW lub MWh na km² obszaru), gęstość linii i stacji, struktura sieci, rozkład geograficzny odbiorów itp. [1, 2]. Porównanie zatem wielkości strat, nawet obliczonych w procentach w stosunku do energii wprowadzonej do sieci, pomiędzy poszczególnymi obszarami bez ich szczegółowej analizy może prowadzić do błędnych wniosków.

Analiza

Na podstawie danych wynikających ze sprawozdawczości ARE zostały obliczone straty energii w poszczególnych elementach sieci dystrybucyjnej w podziale na straty w sieci niskiego, średniego i wysokiego napięcia. Procentowy rozkład strat energii w stosunku do strat bilansowych zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Rozkład procentowy strat energii w sieci dystrybucyjnej

Straty energii	Procentowy rozkład strat energii w stosunku do strat bilansowych	
	SN+nN	sieci dystrybucyjnej
W licznikach	2,98	2,31
Uptywnościowe w nN	0,09	0,07
W przyłączach	2,54	1,97
Obciążeniowe w nN	16,40	12,69
Jałowe trafo SN/nN	12,00	9,29
Obciążeniowe trafo SN/nN	3,74	2,89
Systematyczne	9,78	7,57
Handlowe	19,52	15,11
Uptywnościowe w SN	3,03	2,35
Obciążeniowe w SN	29,70	22,99
W kondensatorach SN	0,00	0,00
Jałowe trafo SN/SN	0,16	0,12
Obciążeniowe trafo SN/SN	0,05	0,04
Różnica bilansowa w nN+SN	100	77,40
Uptywnościowe w 110 kV		0,88
Obciążeniowe w 110 kV		13,69
W kondensatorach 110 k		0,06
Jałowe trafo 110/SN		6,24
Obciążeniowe trafo 110/SN		1,75
Różnica bilansowa		100

W analizowanej sieci dystrybucyjnej największe w sieci niskiego napięcia, wynoszące 41,69%, są straty w transformatorach SN/nN, straty obciążeniowe w liniach sieci niskiego napięcia wynoszą 43,45% strat w sieci niskiego napięcia. Obciążeniowe straty energii w liniach sieci SN wynoszą 90,15% strat energii w tej sieci. Straty energii w sieci 110 kV stanowią 22,61% strat bilansowych. Obciążeniowe straty energii w liniach sieci 110 kV wynoszą 60,54% strat w tej sieci, a straty energii w transformatorach 110/SN, które wynoszą 35,32%.

Algorytm prognozowania strat bilansowych

Na różnicę bilansową, inaczej straty bilansowe, składają się straty napięciowe, prądowe i handlowe.

Straty napięciowe to straty w:

- licznikach,
- uptywnościowe w liniach sieci niskiego, średniego i wysokiego napięcia,
- w kondensatorach,
- jałowe w transformatorach: SN/nN, SN/SN oraz 110/SN.

Straty prądowe to straty:

- w przyłączach,
- obciążeniowe w liniach sieci niskiego, średniego i wysokiego napięcia,
- obciążeniowe w transformatorach: SN/nN, SN/SN oraz 110/SN.

Straty handlowe to straty:

- systematyczne, wynikające z prognozy rozruchu i klasy liczników,
- ewidencyjne, wynikające ze sposobu i trybu rozliczeń odbiorców grupy taryfowej G,
- nielegalny pobór energii elektrycznej.

Straty napięciowe prądowe oraz straty handlowe systematyczne to straty, które składają się na uzasadniony wolumen różnicy bilansowej OSD. Straty nieuzasadnione to przede wszystkim nielegalny pobór energii elektrycznej, nie można jednak ograniczyć go do zera.

Straty napięciowe, w przyłączach oraz handlowe systematyczne można obliczyć z użyciem arkusza Excel. Błędy wynikające z uproszczeń są stosunkowo niewielkie.

Prognozowanie strat obciążeniowych

Strat obciążeniowych w liniach sieci nie da się tak prosto obliczyć jak pozostałych strat, są to bowiem rozległe, bardzo różnorodne sieci. Można to zrobić z użyciem programu komputerowego lub w oparciu o korelację pomiędzy stratami obciążeniowymi w liniach sieci a parametrami takimi jak: energia, gęstość energii, długość linii, liczba stacji, obszar.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że najlepsza korelacja ($r_{xy} = 0,843$ dla $\alpha = 0,05$) występuje dla funkcji liniowej dwóch zmiennych o postaci:

$$\Delta E_{obcnn} = 1942,29 \cdot E_1 + 7099,79 \cdot E_2 + 286965$$

$$E_1 = E_s \cdot A / (L_n \cdot F_n); E_2 = E_{OZE} \cdot A / (L_n \cdot F_n)$$

gdzie:

E_s – energia dostarczona do sieci niskiego napięcia minus energia wprowadzona z odnawialnych źródeł energii na niskim napięciu;

E_{OZE} – energia wprowadzona z odnawialnych źródeł energii na niskim napięciu;

A – obszar;

F_n – liczba stacji zasilających sieć niskiego napięcia;

L_n – długość linii tworzących sieć niskiego napięcia.

Dla sieci średniego napięcia funkcja opisująca straty obciążeniowe w liniach sieci ma postać:

$$\Delta E_{obcSN} = 8,87 \cdot E_1 + 8,53 \cdot E_2$$

$$E_1 = E_{SS} \cdot A / (L_s \cdot F_s); E_2 = E_{OZES} \cdot A / (L_s \cdot F_s)$$

gdzie:

E_{SS} – energia dostarczona do sieci średniego i niskiego napięcia minus energia wprowadzona z odnawialnych źródeł energii do sieci średniego napięcia;

E_{OZES} – energia wprowadzona z odnawialnych źródeł energii do sieci średniego napięcia;

A – obszar;

F_s – liczba stacji zasilających sieć średniego napięcia;

L_s – długość linii tworzących sieć średniego napięcia.

Współczynnik korelacji $r_{xy} = 0,778$.

Dla sieci wysokiego napięcia funkcja liniowa dwóch zmiennych daje najlepszą korelację. Wzór na straty obciążeniowe w liniach sieci wysokiego napięcia przyjmie postać:

$$\Delta E_{obcnn} = 1,59E-9 \cdot E_1 + 2,650E-9 \cdot E_2$$

$$E_1 = E_{SW}^2 \cdot A / (L_w \cdot 790,4); E_2 = E_T^2 \cdot A / (L_w \cdot F_w)$$

gdzie:

E_{SW} – energia wprowadzona do sieci wysokiego napięcia minus energia wprowadzona z sieci NWN do sieci wysokiego napięcia;

E_{OZES} – energia wprowadzona z sieci NWN do sieci 110 kV;

A – obszar;

F_w – liczba stacji zasilających sieć wysokiego napięcia;

L_w – długość linii tworzących sieć wysokiego napięcia.

Współczynnik korelacji $r_{xy} = 0,687$.

Na podstawie wyżej opisanego algorytmu obliczono straty energii na poszczególnych poziomach bilansowych dla analizowanego obszaru. Wyniki w procentach do energii wprowadzonej przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Obliczone straty energii w latach 2015-2020

	Wykonanie			Obliczone		
	SN+nN	110 kV	Sieć	SN+nN	110 kV	Sieć
2015	5,43	1,35	4,92	5,26	1,05	4,50
2016	5,72	1,05	4,90	5,16	1,02	4,49
2017	5,17	0,98	4,43	5,08	1,01	4,41
2018	4,83	0,97	4,20	4,98	0,98	4,31
2019	4,43	0,94	3,98	4,96	0,92	4,33
2020	5,21	0,89	4,46	5,01	0,90	4,32

Z tabeli wynika, niekiedy stosunkowo duża, różnica pomiędzy rzeczywistymi stratami energii (wykonanie)

a obliczonymi według zaproponowanego algorytmu. Jest to efekt strat handlowych, a dokładniej nielegalnego poboru energii elektrycznej. Jest to zjawisko losowe, niekorzystne, którego nie da się prognozować. OSD skutecznie walczy z tym procederem, jednak nie da się go skutecznie wyeliminować.

W celu wyliczenia wskaźników do wyznaczenia uzasadnionych wolumenów różnicy bilansowej w sieci dystrybucyjnej konieczna jest prognoza urzędzeń oraz energii na lata 2021-2025. Do prognozy urzędzeń przyjęto średnioroczny przyrost w latach 2015-2020. Do prognozy energii przyjęto model Holta-Wintersa, wykorzystujący tzw. wygładzenie wykładnicze. Wygładzenie polega na stworzeniu ważonej średniej ruchomej, której wagi określa się według schematu – im starsza informacja o badanym zjawisku, tym mniejszą wartość stanowi ona dla aktualnej prognozy. W tabeli 3 podano prognozę strat energii, obliczoną w procentach do energii wprowadzonej do sieci.

Tabela 3. Prognoza strat energii [%]

	W sieci SN+nN	W sieci 110 kV	W sieci dystrybucyjnej
2021	5,068	0,997	4,327
2022	4,990	1,013	4,306
2023	4,930	1,023	4,282
2024	4,880	1,032	4,257
2025	4,986	1,067	4,362

Z tabeli wynika, że prognozowane straty energii dla analizowanego obszaru będą malały na wszystkich stopniach sieci do 2024 roku, potem nieznacznie wzrosną.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

- Operatorzy Systemu Dystrybucyjnego są zdecydowanie różni względem siebie i to zarówno pod względem struktury sprzedaży energii elektrycznej, gęstości energii, jak i parametrów technicznych sieci dystrybucyjnej takich jak: długość linii niskiego, średniego i wysokiego napięcia, zarówno napowietrznej, jak i kablowej, liczby stacji zasilających poszczególne stopnie sieci.
- Każdy Operator powinien być traktowany indywidualnie: należy dla każdego Operatora Systemu Dystrybucyjnego stosować indywidualne funkcje opisujące obciążeniowe straty energii w liniach sieci dystrybucyjnych; pozostałe straty energii oblicza się według takiego samego algorytmu, wykorzystując odpowiednie dla Operatora dane o parametrach technicznych sieci.
- Straty energii elektrycznej to zarówno straty napięciowe, niezależne od przepływającej energii, jak i obciążeniowe, które zależą od kwadratu przepływającej energii; dla każdego z Operatorów Systemu Dystrybucyjnego określono procent strat napięciowych, jest to o tyle ważne, że bez względu na to ile energii przepłynie przez sieć, straty te będą występowały zawsze w takiej wysokości.
- Ani strat technicznych ani handlowych nie da się całkowicie wyeliminować.

LITERATURA

- [1] Gawlak A., Profitability Analysis of Investment Projects in Distribution Networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), 8, 13-16
- [2] Kolcun M., Gawlak A., Kornatka M., Conka Z., Active and Reactive Power Losses in Distribution Transformers, *Acta Polytechnica Hungarica*, 1 (2020), 17, 161-174

Autor: dr hab. inż. Anna Gawlak, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: anna.gawlak@pcz.pl

Concept of the International Research Project for Digital Energy Path for Planning and Operation of sustainable grid, products and society

Abstract. This paper presents the conceptual assumption of the international research project entitled *Digital Energy Path for Planning and Operation of sustainable grid, products and society (DIEGO)*, planned for years 2022-2024. As part of the project in Poland, an analysis of electricity processes occurring in a real industrial plant will be carried out and predictive models will be developed to determine the demand for power and energy of selected loads located in the industrial plant under consideration as well as power and energy generation and electrical effectiveness of selected technological processes. In addition, with use of multi-agent systems, methods and algorithms for real-time balancing and determination of appropriate operating regimes of controllable loads, energy sources and storage systems will be developed.

Streszczenie. W artykule przedstawiono założenia koncepcyjne międzynarodowego projektu badawczego pt. *Cyfrowa Ścieżka dla Planowania i Eksploatacji Zrównoważonych Sieci Elektroenergetycznych, Produktów i Społeczności (DIEGO)*, zaplanowanego do realizacji w latach 2022-2024. W ramach projektu w Polsce przeprowadzona zostanie analiza procesów elektroenergetycznych zachodzących w rzeczywistym zakładzie przemysłowym oraz opracowane zostaną modele predykcyjne do określania zapotrzebowania na moc i energię elektryczną wybranych odbiorów znajdujących się w rozpatrywanym zakładzie, wytwarzania mocy i energii elektrycznej oraz efektywności energetycznej wybranych procesów technologicznych. Ponadto, z wykorzystaniem systemów wieloagentowych, opracowane zostaną metody i algorytmy bilansowania w czasie rzeczywistym oraz wyznaczania odpowiednich reżimów pracy odbiorów sterowanych, źródeł energii elektrycznej oraz systemów magazynowania energii. *(Założenia koncepcyjne międzynarodowego projektu badawczego pt. Cyfrowa Ścieżka dla Planowania i Eksploatacji Zrównoważonych Sieci Elektroenergetycznych, Produktów i Społeczności (DIEGO)).*

Introduction

Research project entitled "Digital Energy Path for Planning and Operation of sustainable grid, products and society" (acronym DIEGO) is realized under the "Digital Transformation for Green Energy Transition" (EnerDigit) initiative [1]. It is expected that digital transformation will have an essential impact on energy system designing in the future. Additionally, digitalization can bring many various, positive effects in the domain of energy systems [1].

Performed projects under the EnerDigit initiative should address key challenges and opportunities relating to the following objectives [1]:

- social sustainability,
- energy and ICT infrastructure,
- energy marketplaces, business models and communication.

Realized research projects should also support the following objectives, mainly by creating the digital solutions in energy systems [1, 2]:

- advance the green energy transition in all sectors of the energy system while ensuring security of supply,
- shaping new transnational business and investment opportunities by sector coupling and development of new value chains in innovative and cost-effective energy solutions, thereby creating new employment opportunities and contributing to the development of an environmentally sustainable financial growth,
- ensuring social sustainability and coherence with digitalization in other sectors in the progression of the green energy transformation.

Project objectives

The main objective of DIEGO project is the development and testing of consistent methods and applications for a digital integrated energy system and components crosslinking of processes and infrastructures to provide reliable multigrad and sustainable industrial products. With DIEGO project planning and operation digital energy solutions, an optimized local energy symbiosis and increase in system resiliency, reliability as well as maintenance management should be guaranteed [3].

The digital building blocks developed and demonstrated throughout the project DIEGO are as follows [3]:

1. Software components for planning multi-energy grids across multiple sectors and diverse types of consumers/producers/storages.
2. Optimization algorithms and prediction methods for real-time energy balancing in a microgrid comprising different sectors and consumption types.
3. ICT architecture supporting (near-)deterministic data exchange.
4. Digital tools for enhancing the design of photovoltaic cells.

According to [3], to assure a reliable, continuous and safe supply of electricity in the future, the development of new sustainable and clean energy sources is gaining importance. The use of information and communications technology (ICT) and digital applications to monitor, control and protect power systems and to enable services offering that will be significant in grids with a large share of renewable sources and thus smooth the transition from conventional to sustainable smart grids. The ICT will increase the complexity of such integrated systems, though, and, thus, necessitate new methods and tools for planning, operation and optimal integration of advanced digital solutions in energy systems domain. The DIEGO project aims to develop and test methods, solutions and tools for planning and operating components and local energy systems in the environments of manufacturing enterprises, industrial parks, public campuses and living test laboratories.

The DIEGO digital solutions, consisting concepts of data models, interfaces and pilot applications, will be implemented and operated in 5 demonstration installations in different locations to test several use cases and scenarios of digital energy path for planning and operation of the sustainable grid, products and society. In Poland the real test environment will be the coupling of energy (RES generation, load, storage) and electrical components in AC grid of industrial enterprise for sustainable and energy-efficient manufacturing [3].

Demonstration installation in Poland

A short description of electric power arrangement of the demonstration installation concerning industrial enterprise located in Poland is presented below.

Considered factory is supplied from existing overhead line of 15 kV via MV/LV substation located on its premises. In the mentioned substation a transformer with a rated power of 630 kVA is installed. This transformer supplies the main LV switchgear with 5 LV circuits. Four bays are used to power the main switchgears in particular buildings, and one bay is a connection to the switchgear of a photovoltaic installation located on the factory premises.

An electricity storage facility is also located on the premises of the industrial enterprise. The storage system includes two inverter systems and two lithium-ion batteries. One of the inverters together with the batteries serves as an electricity storage system, and the second one together with the batteries creates an UPS system for needs of an industrial enterprise.

Power system analysis

As part of the DIEGO project, analyses of the power system located on the premises of the industrial plant will be carried out, in particular:

- analysis of electric power arrangement existing in the enterprise and technological processes realized there,
- exploration of an accessed measurement data on received power and electrical energy consumption as well as generation of power and electrical energy in the factory,
- modelling of selected electrical energy loads and technological processes realized in the factory in the scope of electric power demand.

Statistical analysis of data

For statistical analysis two types of data are available: demand for power/electricity in industrial plant and generation of power/electricity in a PV system located nearby the industrial plant, due to the lack of an appropriate amount of historical data from the PV installation located on the premises of the plant. Data resolution is 1 minute but will be converted to 15 minute values for forecasting purposes. Preprocessing of "raw" data will be executed as the first step: identification and correction of incorrect data, missing data and time changes problem (two time in year). In the next step, selected descriptive statistics will be calculated for the all available time series including mean, standard deviation, minimum, maximum, spread, coefficient of variation, selected percentiles, variance, skewness and kurtosis. Tests of normality of the time series distribution will be also performed. Pearson linear autocorrelation coefficients for analysed time series will be calculated – choice of the most important lagged values of the explained variable. Verification of daily periodicity, seasonality in available electricity demand and generation time series will be executed as the next task. Daily profiles of demand for power/electricity time series will be also calculated to verify their usefulness in forecasting models. The aim of the task is to determine additional explanatory variables for forecasting models (daily periodicity and seasonality markers). Statistical analysis of electricity demand and generation time series in order to find the most valuable explanatory variables for linear and non-linear prediction models will be executed as next task. Proposed methods include analyses of Pearson linear correlation coefficients and explanatory variables cross-correlation matrix, sensitivity analyses/importance rating by MLP artificial neural network, random forest, gradient-boosted decision trees and backward stepwise regression will be executed.

Forecasting of energy generation and electric energy demand

The next point of research will be selection and development of forecasting models for power and electricity demand. Creation and verification of linear (ARIMA and multiple linear regression models) and non-linear models (selected methods of machine learning, deep learning included) will be done. Proposed solutions will predict electricity generation and electricity demand of considered industrial plant. Analyses will verify reasonability of using ensemble methods including AI/ML models as the integrator of single models. Formulation of guidelines on preferred prediction models, and input data scope as a final product will be done.

Forecasting of energy effectiveness

Analysis of current Polish legislation and literature will precede forecasting process. Possible energy effectiveness indicators will be checked for feasibility under existing measurement data. After that, various models will be created and verified. Similarly to generation and demand prediction linear, non-linear and ensemble models will be considered for the task. Formulation of guidelines on preferred prediction models, and input data scope as a final product will be done.

Summary and conclusions

In conclusion the implementation of DIEGO international research project will contribute to increasing the energy efficiency of the electrical installation of the industrial plant under consideration and will increase the degree of integration and cooperation of renewable energy sources, energy storage units and selected electricity loads. The methods and algorithms developed during the project may significantly contribute to reducing the carbon footprint of the company, where the demonstration installation will be established, which in the era of rising energy prices is one of priority areas of interest of the European Union authorities.

REFERENCES

- [1] Join Call 2020, Digital Transformation for Green Energy Transition (MICall20), Call for Proposals, ERA-Net SES and MI Joint Call 2020 EnerDigit
- [2] Call for proposals, Multilateral Joint Call for RDI projects on digital transformation for green energy transition, www.eranet-smartenergysystems.eu
- [3] Digital Energy Path for Planning and Operation of sustainable grid, products and society (acronym DIEGO). Final Application

Authors: dr inż. Łukasz Rokicki, Warsaw University of Technology, Electrical Power Engineering Institute, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, E-mail: lukasz.rokicki@pw.edu.pl; prof. dr hab. inż. Mirosław Parol, Warsaw University of Technology, Electrical Power Engineering Institute, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, E-mail: miroslaw.parol@pw.edu.pl; dr hab. inż. Paweł Piotrowski, Warsaw University of Technology, Electrical Power Engineering Institute, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, E-mail: pawel.piotrowski@pw.edu.pl; mgr inż. Marcin Kopyt, Warsaw University of Technology, Electrical Power Engineering Institute, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland, E-mail: marcin.kopyt@pw.edu.pl; inż. Jakub Domaszewski, Electrum Concreo Sp. z o.o., ul. Watykańska 13, 15-638 Białystok, Poland, E-mail: jdomaszewski@electrum.pl; dr inż. Bartłomiej Arendarski, Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF, Sandtorstrasse 22, 39106 Magdeburg, Germany, E-mail: bartlomiej.arendarski@iff.fraunhofer.de; prof. dr inż. Przemysław Komarnicki, Hochschule Magdeburg-Stendal Breitscheidstrasse 2, 39014 Magdeburg, Germany, E-mail: przemyslaw.komarnicki@h2.de

Wybrane modele funkcjonalne społeczności energetycznych

Streszczenie. W artykule zaprezentowano charakterystykę społeczności energetycznej – spółdzielni energetycznej, poprzez wskazanie najistotniejszych kryteriów jej tworzenia wraz z przedstawieniem katalogu korzyści z członkostwa w spółdzielni. Korzyści te zostały również zwymiarowane, a podane wyniki dotyczą odbiorców z dwóch najpopularniejszych grup taryfowych G11 i C11.

Abstract. The article presents the characteristics of the energy community – an energy cooperative, by indicating the most important criteria for its creation together with a catalog of benefits from membership in the cooperative. These benefits have also been measured, and the presented results concern recipients from the two most popular tariff groups G11 and C11. (**Selected functional models of energy communities**).

Wstęp

Postępująca liberalizacja koncentrująca się na decentralizacji energetyki systemowej ewoluje w kierunku rozwiązań proekologicznych i rozproszonych bazujących na energetyce odnawialnej, a także na budowie jej obywatelskiego wymiaru. Ogólny charakter ram prawnych sformułowanych na poziomie wspólnoty daje swobodę wyboru optymalnego scenariusza implementacji każdemu z państw członkowskich. Budowa niezależności energetycznej na poziomie lokalnym powinna jednak spełniać pewne określone ramy zdefiniowane jako tzw. społeczności energetyczne (ang. Energy Community (EC)). Na poziomie dyrektywy REDII [1] oraz tzw. dyrektywy rynkowej [2] wprowadzono do porządku prawnego odpowiednio Renewable Energy Community (REC) oraz Citizens Energy Community (CEC). Ich celem jest umożliwienie i ułatwienie rozwoju energetyki rozproszonej w ramach posiadanej przez nich osobowości prawnej. Ich cechą charakterystyczną jest również dobrowolny i otwarty charakter uczestnictwa oraz działalność przynosząca korzyści ekonomiczne i środowiskowe na szczeblu lokalnym. Unijny kierunek transformacji rynku energii znalazł i znajduje swoje próby odzwierciedlenia także w prawie polskim, gdzie dokonano implementacji i sformalizowano możliwość tworzenia spółdzielni energetycznych.

Celem artykułu jest weryfikacja tego czy, a jeśli tak, to w jakich konfiguracjach popytowo-podażowych, utworzenie spółdzielni energetycznej będzie przynosić korzyści jej członkom. Uwzględnione zostały ograniczenia i warunki definiujące spółdzielnię energetyczną wynikające z polskich aktów prawnych, a także dokonana została analiza opłacalności zawiązywania spółdzielni dla scenariuszy: (i) odbiorcy energii, (ii) indywidualnego prosumenta rozliczanego w modelu opustowym oraz (iii) indywidualnego prosumenta rozliczanego w modelu netbillingowym. Opłacalność ta jest dodatkowo rozważana przez pryzmat opłat dystrybucyjnych oraz towaru, jakim jest energia elektryczna.

Spółdzielnia energetyczna

Spółdzielnie energetyczne działają na podstawie systemu prosumenckiego w modelu tzw. net-meteringu (system opustów). W modelu tym sprzedawca energii, z którym spółdzielnia energetyczna ma podpisaną umowę kompleksową sprzedaży energii elektrycznej, rozlicza się z nią z różnicy pomiędzy ilością energii elektrycznej wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej elektroenergetycznej i ilości energii elektrycznej pobranej z tej sieci na potrzeby własne przez spółdzielnię w stosunku skorygowanym współczynnikiem ilościowym od 1 do 0,6. Oznacza to, że 1 MWh energii wytworzona w spółdzielni i niezużyta w chwili produkcji przez jej członków jest wprowadzana do sieci dystrybucyjnej pełniąc rolę „depozytu energii”, z którego może bezkosztowo być pobrana w ilości 0,6 MWh. Może się

to dzieć w dowolnym momencie w ramach okresu rozliczeniowego. Podkreślić należy to, że energia pochodząca ze źródeł wytwórczych w spółdzielni i pobierana z depozytu sieciowego nie podlega opłatom za energię jako towar i jest zwolniona z szeregu składników opłaty dystrybucyjnej. W przypadku gdy ilość energii zdeponowana w sieci operatora jest niewystarczająca do pokrycia zapotrzebowania członków spółdzielni, pobrana brakująca energia rozliczana jest z zachowaniem wszystkich elementów kosztowych po stronie dystrybucji i sprzedaży.

Utworzenie spółdzielni wymaga spełnienia określonych kryteriów, z których najistotniejsze to: (i) możliwość powstania na terenach maksymalnie trzech sąsiadujących ze sobą gmin wiejskich lub miejsko-wiejskich, (ii) łączna moc instalacji OZE w ramach spółdzielni musi pokrywać nie mniej niż 70% potrzeb własnych, (iii) maksymalna liczba członków spółdzielni energetycznej to 999, a minimalna w zależności od statusu prawnego członków musi wynosić co najmniej 3 (przedsiębiorstwa) lub 10 podmiotów (odbiorcy indywidualni), (iv) członkowie spółdzielni muszą być przyłączeni do sieci jednego operatora na poziomie nN lub SN.

Ustawa o OZE [3] definiuje także enumeratywny katalog wymiernych korzyści z tytułu członkostwa w spółdzielni energetycznej i korzystania z własnej energii elektrycznej. Do tego katalogu po stronie składowych opłat dystrybucyjnych zaliczyć należy: (i) składnik zmienny sieciowy, (ii) opłatę OZE, (iii) opłatę kogeneracyjną, (iv) opłatę mocową. Ponadto po stronie energii elektrycznej jako towaru członkowie spółdzielni zwolnieni są z: (i) akcyzy, (ii) opłat za „certyfikację” energii (tzw. kolory), (iii) opłaty rozliczeniowej.

Analiza korzyści

Kalkulacja korzyści z uczestnictwa w spółdzielni energetycznej została przeprowadzona odrębnie dla kosztów dystrybucji oraz towaru, jakim jest energia elektryczna. Do analiz kosztów dystrybucji przyjęto: (i) scenariuszem bazowym (a) były koszty energii elektrycznej wraz z usługą dystrybucji dla odbiorców energii z grup taryfowych C11 i G11, (ii) rzeczywiste poziomy stawek opłat z taryfy dystrybucyjnej Tauron Dystrybucja SA (na dzień 01.03.2023), (iii) liczba członków spółdzielni wynosi 10, (iv) moc umowna każdego z członków 10kW, (v) zużycie energii pojedynczego odbiorcy z grupy taryfowej G11 i C11 wynosi odpowiednio: 2,5 MWh/rok i 10 MWh/rok. Ponadto założono, że w scenariuszu: (b) źródło PV jest dobrane tak, że nie występuje zakup energii spoza depozytu sieciowego, (c) spółdzielnia nie posiada fizycznego magazynu energii, a po scaleniu prosumentów ze scenariusza b) w spółdzielnię musi ona dokupować 20% energii wynikającej z pogorszenia współczynnika opustowego z 0,8 na 0,6, (d) spółdzielnia ze scenariusza c) posiada fizyczny magazyn energii o mocy i pojemności gwarantującej brak konieczności zakupu energii

spoza depozytu sieciowego. Analizy nie uwzględniają w żadnym scenariuszu kosztów nakładów inwestycyjnych w źródła wytwórcze i magazynowe. W tabelach 1 i 2 przedstawiono odpowiednio wyniki obliczeń dla spółdzielni zrzeszających wyłącznie odbiorców z grupy taryfowej C11 oraz G11.

Tabela 1. Kalkulacja korzyści dla odbiorców z grupy taryfowej C11

Pozycja kosztowa	Stawka	a)	b)	c)	d)
		Odbiorca	Prosument 1/0,8	Spółdzielnia 1/0,6	Spółdzielnia 1/0,6 + magazyn
Wartość netto [zł/rok]					
Składnik stały	5,1 zł/kW/m-c	6120,00	6120,00	6120,00	6120,00
Oplata przejściowa	0,08 zł/kW/m-c	96,00	96,00	96,00	96,00
Abonament	4,56 zł/m-c	547,20	547,20	547,20	547,20
Stawka jakościowa	0,0242 zł/kWh	2420,00	0,00	484,00	0,00
Zmienna sieciowa	0,2227 zł/kWh	22 270,00	0,00	4454,00	0,00
Oplata kogeneracyjna	0,00496 zł/kWh	496,00	0,00	0,00	0,00
Oplata mocowa	0,1024 zł/kWh	7168,00	7168,00	0,00	0,00
Oplata OZE	0 zł/kWh	0,00	0,00	0,00	0,00
SUMA	zł	39 117,20	13 931,20	11 701,20	6763,20
Korzyść względem scenariusza „Odbiorca”			-64%	-70%	-83%

Tabela 2. Kalkulacja korzyści dla odbiorców z grupy taryfowej G11

Pozycja kosztowa	Stawka	a)	b)	c)	d)
		Odbiorca	Prosument 1/0,8	Spółdzielnia 1/0,6	Spółdzielnia 1/0,6 + magazyn
Wartość netto [zł/rok]					
Składnik stały	7,9 zł/kW/m-c	948,00	948,00	948,00	948,00
Oplata przejściowa	0,33 zł/kW/m-c	39,60	39,60	39,60	39,60
Abonament	4,56 zł/m-c	547,20	547,20	547,20	547,20
Stawka jakościowa	0,0242 zł/kWh	605,00	0,00	121,00	0,00
Zmienna sieciowa	0,2643 zł/kWh	6607,50	0,00	1321,50	0,00
Oplata kogeneracyjna	0,00496 zł/kWh	124,00	0,00	0,00	0,00
Oplata mocowa	9,54 zł/m-c	1144,80	1144,80	0,00	0,00
Oplata OZE	0 zł/kWh	0,00	0,00	0,00	0,00
SUMA	zł	10 016,10	2679,60	2977,30	1534,80
Korzyść względem scenariusza „Odbiorca”			-73%	-70%	-85%

Model funkcjonalny społeczności energetycznej, jaką jest spółdzielnia, może uwzględniać w zasadzie dowolny kształt i zasady wewnętrznego rozliczania kosztów funkcjonowania spółdzielni, w tym koszty zakupu/sprzedaży energii między odbiorcami a wytwórcami. Na potrzeby analiz przyjęto założenie, że odbiorca taryfowy z grupy C11 przed przystąpieniem do spółdzielni płaci na mocy cennika [4] 2186 zł/MWh. Wytwórca energii elektrycznej przed przystąpieniem do spółdzielni mógł wystartować w aukcji OZE [5], a po jej pozytywnym rozstrzygnięciu sprzedawać energię po cenach na poziomie 244,77-327,73 zł/MWh. W ramach spółdzielni energetycznej istnieje możliwość sprzedaży energii bezpośrednio odbiorcom w spółdzielni, dzięki czemu możliwe staje się uzyskanie ceny kontraktu atrakcyjnej dla obu stron transakcji. Efektywny poziom różnicy cen wynosi 1860 zł/MWh, co przy założeniu sprawiedliwego podziału tego efektu między strony transakcji ustala cenę zakupu energii/sprzedaży na poziomie ok. 1257 zł/MWh.

Wnioski

Elastyczność funkcjonowania spółdzielni energetycznej wraz z ustawowo nakreślonym katalogiem korzyści sprawia, że uczestnictwo w tej społeczności daje wymierne korzyści zarówno w zakresie możliwości tańszego zakupu energii elektrycznej, jak i unikniętych kosztów dystrybucji. Korzyść jest odnotowywana zarówno w scenariuszu zrzeszenia się odbiorców w spółdzielnię, jak i zrzeszenia się prosumentów w spółdzielnię.

LITERATURA

- [1] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources; (OJ L 328, 21.12.2018); European Union: Brussels, Belgium, 2018
- [2] Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 – on Common Rules for the Internal Market for Electricity and Amending Directive 2012/27/EU; European Union: Brussels, Belgium, 2019 (OJ L 158, 14.6.2019)
- [3] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Act of February 20, 2015 on Renewable Energy Sources) Dz.U. 2020 poz. 261
- [4] https://www.tauron.pl/-/media/offer-documents/firma/taryfa-msp/ts-podstawowe/2022-04-01_ts_msp_prad_taryfaabcor_www_k.ashx
- [5] <https://www.ure.gov.pl/pl/oze/aukcje-oze/ogloszenia-i-wyniki-auk>

Autor: dr inż. Maciej Soltysik, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: maciej.soltysik@pcz.pl

Magazynowanie energii w magazynach elektrochemicznych z wykorzystaniem akumulatorów LiFePO₄ i LTO

Streszczenie. Porównano magazyny energii, analizując dotychczasowe rodzaje akumulatorów i nowej generacji akumulatory żelazowo-fosforanowe oraz tytanowe. Zakres porównania dotyczy parametrów mających istotny wpływ na czas użytkowania i koszty instalacji magazynów opartych na tych akumulatorach.

Abstract. Comparison of energy storage based on existing types of batteries and new generation of iron-phosphate and titanium batteries. The scope of the comparison is on parameters that have a significant impact on the service life and installation costs of storage facilities based on these batteries. (Energy storage in electrochemical storage based on LiFePO₄ and LTO batteries).

Wstęp

Prezentowany materiał zawiera porównanie właściwości eksploatacyjnych akumulatorów Li-Ion z LiFePO₄ oraz LTO. Porównane zostaną główne cechy tych akumulatorów, do których zalicza się:

- liczbę cykli,
- głębokość rozładowania,
- pojemność,
- prądy ładowania i rozładowania,
- temperatury pracy,
- końcowe napięcie ładowania i rozładowania.

Analiza rozpatrywanych parametrów prowadzi do zastanowienia się nad rozwiązaniami i typami akumulatorów, które z jednej strony są tymi najtańszymi i ogólnie dostępnymi, a z drugiej strony nad najdroższymi i w chwili obecnej znacznie trudniej dostępnymi, a mimo tego bardzo opłacalnymi w perspektywie długiego czasu eksploatacji. Dodatkową zaletą akumulatorów LiFePO₄ oraz LTO są wysokie prądy ładowania i rozładowania dochodzące do 6C, co oznacza 10-, a nawet 6-minutowe czasy ładowania.

Akumulatory

Akumulator można zbudować z dowolnej liczby ogniw. Większość baterii litowo-jonowych składa się z ogniw 18650 łączonych szeregowo w celu uzyskania wyższego napięcia. Bateria do laptopa będzie o napięciu 10,8 V (6 ogniw, łączonych 3S2P, czyli 3 szeregowo i 2 równolegle). Bateria do samochodu tesla P100D o napięciu ponad 400 V i mocy maksymalnej 451 kW składa się z ponad 7000 ogniw typu 18650.

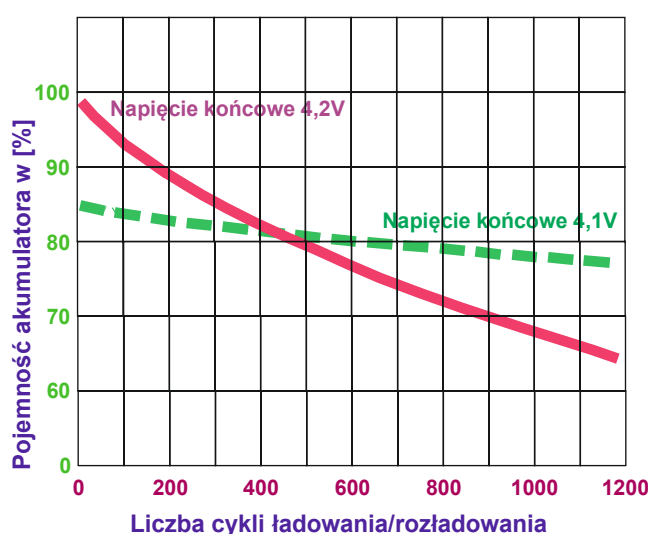
Porównanie akumulatorów Li-Ion

Na rysunkach 1 oraz 2 pokazano zależność między końcowym napięciem ładowania a ilością cykli oraz pojemnością uzyskaną dla danej wartości napięcia. Zależność ta wskazuje wyraźny spadek pojemności wraz ze spadkiem napięcia ładowania, a także istotny spadek pojemności od ilości cykli i tak dla nominalnej wartości napięcia ładowania 4,2 V pojemność początkowa 100% zmniejsza się po 1200 cykli do ok. 65%.

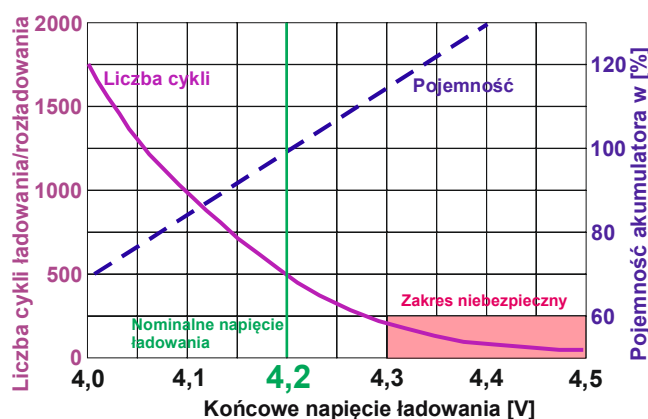
Tabela 1. Zależności wartości napięcia i ilości cykli ładowania ogniwa Li-Ion, źródło: batteryuniversity.com

Napięcie [V]	Ilość cykli rozładowania	Pojemność po pełnym naładowaniu [mAh]
4,3	250	3300
4,2	500	3000
4,1	1000	2700
4,0	2000	2100
3,9	4000	1500

Na podstawie tabeli 1 widać, że ogniwo o pojemności 3000 mAh utrzymuje nominalną ilość cykli na poziomie 500, a dla napięcia 3,9 V posiada połowę pojemności, natomiast ilość cykli wzrasta ośmiokrotnie do 4000.



Rys. 1. Zależność między liczbą cykli, pojemnością akumulatora w stosunku do końcowego napięcia ładowania [oprac. własne]



Rys. 2. Zakres napięcia ładowania dla liczby cykli i pojemności [oprac. własne]

Zależności przedstawione w tabeli 1 wskazują na docelowe tendencje w zakresie budowy i wykorzystania akumulatorów do budowy magazynów elektrochemicznych ze szczególnym uwzględnieniem akumulatorów LTO i LFP do budowy stacjonarnych magazynów energii, natomiast NMC, NCA i inne odmiany magazynów Li-Ion do mobilnych magazynów

energii jako np. zasilanie samochodów elektrycznych i hybrydowych.

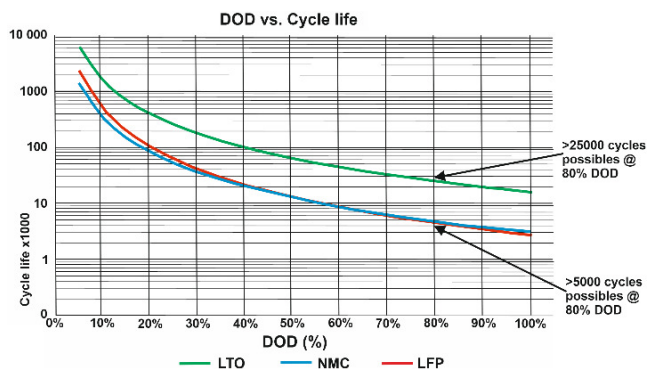
Tabela 2. Podstawowe parametry popularnych akumulatorów o dużej liczbie cykli i głębokości rozładowania 100% [1-3]

Parametr	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₂ (LFP)	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ (LTO)
Gęstość energii [Wh/kg]	200-240	150-190	100-135	90-120
Gęstość energii [Wh/l]	670	300	247	200
Liczba cykli (DOD 100%)	500	3000	3600	15000-25000
Rezystancja wewnętrzna [mΩ]	20	0,3	<15	0,5
Samorozładowanie [%/miesiąc]	5	5	4	3
Napięcie komórki	3,6/3,7	3,6/3,7	3,2/3,3	2,2/2,3
Odcięcie napięcia podczas ładowania [V/cell]	4,2	4,2	4,2	2,8
Odcięcie napięcia podczas rozładowania [V/cell, 1C]	2,5	2,5-3,0	2,5	1,5
Prąd ładowania	0,5C	1C	1C	5-10C
Prąd rozładowania	2C	2-3C	3C	5-10C
Temp. ładowania	0-45°C	0-55°C	-20-55°C	-20-55°C
Temp. rozładowania	-20-60°C	-30-55°C	-30-55°C	-30-55°C
Procent ceny w stosunku do LTO [%]	30	50	55	100

Atrakcyjność akumulatorów LTO i LiFePO₄ zależy głównie od:

- Bardzo dużej liczby cykli
- Dużej głębokości rozładowania
- Szybkości ładowania i rozładowania do 10C
- Szerokiego zakresu temperatur pracy
- Niskich kosztów inwestycyjnych po uwzględnieniu ilości cykli i czasu eksploatacji

Zależności przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 3 wskazują na bardzo wysoką korelację między głębokością rozładowania a ilością cykli. Najbardziej popularne akumulatory Li-Ion, a zarazem najtańsze osiągają ok. 500 cykli przy głębokości rozładowania 80%, natomiast dla akumulatorów, które można zaliczyć do grupy o wysokiej ilości cykli (LTO, LFP i NMC), realną wielkością jest 5000 do 25 000 cykli w zależności od typu akumulatora. W tym przypadku zdecydowanie korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie akumulatora LTO, ponieważ pomimo najwyższej ceny jego osiągi w zakresie głębokiego rozładowania do nawet 100%, a ilość cykli powyżej 25 000 [2] niwelują wyższy koszt samych akumulatorów. Porównanie liczby cykli wypada zdecydowanie na korzyść akumulatorów LTO w stosunku do LFP i NMC, ponieważ ta liczba cykli jest pięciokrotnie wyższa, a w przypadku akumulatorów Li-ion nawet pięćdziesięciokrotnie.



Rys. 3. Liczba cykli w zależności od głębokości rozładowania dla akumulatorów LTO, NMC i LFP [oprac. własne]

Jeśli przyjąć cenę akumulatorów LTO za 100%, to akumulatory LFP i NMC kosztują ok. połowy tego co LTO, natomiast akumulatory NCA kosztują już tylko ok. 30%. Akumulatory NCA pomimo, że kosztują 30% tego co LTO, to ilość cykli mają 50 razy mniejszą i tym samym akumulatory LTO, pomimo że są najdroższe, to w perspektywie długiego użytkowania wypadają najkorzystniej. Dodatkowymi zaletami akumulatorów LTO są wysokie prądy ładowania i rozładowania dochodzące do 10C oraz szerszy zakres temperaturowy pracy i, co z tego wynika, krótki czas ładowania – ok. 6 minut. Wadami natomiast są niższe gęstości energii i niższe napięcia jednostkowe.

Wnioski

W zastosowaniach, w których nie jest wymagany długi okres pracy i duża liczba cykli, zapewne przez najbliższe lata będą wykorzystywane „zwykłe” akumulatory Li-Ion w różnych wersjach w zależności od potrzeb.

Dla zastosowań, gdzie jest wymagana duża gęstość energii i duża ilość cykli, będą miały zastosowanie akumulatory NMC i NCA, głównie ze względu na dużą gęstość energii i znacznie wyższą liczbę cykli z wykorzystaniem akumulatorów NMC.

Akumulatory z grupy tych o wysokiej ilości cykli, głównie LFP i LTO, będą wprowadzane do zastosowań stacjonarnych tam, gdzie głównym ograniczeniem nie jest brak miejsca, a wymagana jest duża ilość cykli. Dla akumulatorów LTO czas życia przy trzykrotnym cyklu dziennym i DOD 100% wynosi ponad 23 lata, co jest wynikiem bardzo zadowalającym. W tym okresie akumulatory Li-Ion musiałyby być wymienione wielokrotnie.

LITERATURA

- [1] Koniak M., Czerepicki A., Selection of the Battery Pack Parameters for an Electric Vehicle based on Performance Requirements, *Materials Science and Engineering*, 211 (2017), 012005, doi:10.1088/1757-899X/211/1/012005.
- [2] Karta katalogowa: High Discharge Rate Long Cycle Life LTO Battery LTO66160-30Ah/40Ah/45Ah.
- [3] Karta katalogowa: Yinlong LTO Battery Cells.

Autorzy: mgr inż. Patryk Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: patryk.galuszkiewicz@pcz.pl; mgr inż. Zbigniew Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zbigniew.galuszkiewicz@pcz.pl

Magazynowanie energii w systemach mikroinstalacji z wykorzystaniem pomp ciepła i magazynów energii elektrycznej oraz ciepła

Streszczenie. Porównano różne rodzaje pomp ciepła oraz wpływ zastosowanych rozwiązań w zakresie ogrzewania gospodarstw domowych i innych obiektów użyteczności publicznej. Przedstawiono wykorzystanie dużych buforów ciepła w systemach ogrzewania obiektów z uwzględnieniem pozyskiwania energii elektrycznej ze źródeł OZE.

Abstract. Comparison of different types of heat pumps and the impact of applied solutions for heating households and other public facilities. The use of large heat buffers in facility heating systems, taking into account the extraction of electricity from RES sources. (Energy storage in microgrid systems using heat pumps and storage of electricity and heat).

Wstęp

Ochrona środowiska wymusza stosowanie czystych technologii w zakresie ogrzewania budynków mieszkalnych. Wzrost liczby elektrycznych urządzeń wykorzystywanych w gospodarstwach domowych wymusza stosowanie technologii związanych z OZE. Głównymi źródłami energii OZE w przypadku indywidualnych gospodarstw domowych są:

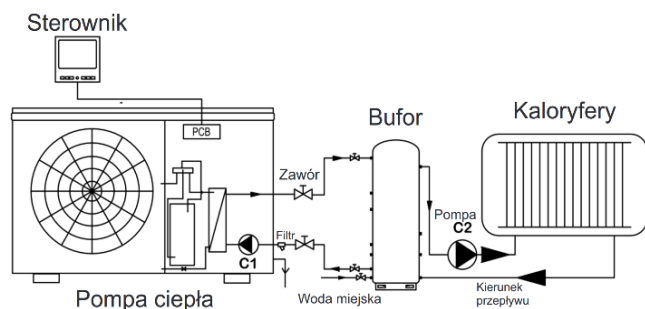
- Słońce – systemy solarne,
- Słońce – systemy fotowoltaiczne,
- Wiatr – wiatraki.

Słońce pozwala wprost na zamianę energii słońca na ciepło w systemach solarnych, natomiast słońce i wiatr to energia elektryczna z wykorzystaniem mikroinstalacji. Elementem łączącym ciepło i prąd elektryczny są pompy ciepła, szczególnie te pracujące na najnowszym czynniku R290.

Biorąc pod uwagę fakt, że średnio 2/3 potrzebnej energii zużywana jest na ogrzewanie, a 1/3 do zasilania pozostałych urządzeń stosowanych w domu, bardzo ważnym elementem takiego systemu jest magazynowanie ciepła i energii elektrycznej.

System mikroinstalacji

Przykład prostej wersji pompy ciepła z buforem do ogrzewania pomieszczeń przedstawia rysunek 1. W wersjach bardziej rozbudowanych znajdują się systemy dodatkowo wyposażone w solary i fotowoltaikę, które wspierają efektywność ekonomiczną systemu ogrzewania pomieszczeń i ciepłej wody użytkowej. Systemy pomp ciepła z czynnikiem R290 (propan), przedstawione na rysunku 2, zapewniają funkcjonowanie systemów domowych wyposażonych w ogrzewanie podłogowe i kaloryfery ze względu na wysoką temperaturę wody wyjściowej dochodzącą do 75°C.



Rys. 1. Przykładowe zastosowanie pompy ciepła do ogrzewania domu lub innego obiektu [oprac. własne]



Rys. 2. Pompa ciepła typu monoblok R290 firmy AIRCAL [1]

Tabela 1. Parametry pomp ciepła 12 i 16 kW firmy AIRCAL

Parametr	Jednostka	Master Head AMH12DC	Master Head AMH16DC	Master Head AMH16DCT	
Zakres grzania	kW	4,0-13,0	5,0-17,0	5,0-17,0	
Grzanie (A7/6°C, W30/35°C)	Pojemność grzania	kW	12,20	16,00	16,00
	Moc	kW	2,72	3,41	3,41
	Prąd	A	11,83	14,83	5,18
	COP*	W/W	4,48	4,69	4,69
Grzanie (A7/6°C, W47/55°C)	Pojemność grzania	kW	10,65	13,60	13,60
	Moc	kW	3,51	4,41	4,41
	COP	W/W	3,03	3,08	3,08
Grzanie (A-25°C, W30/35°C)	Pojemność grzania	kW	6,28	8,16	8,16
	Moc	W	3,56	4,34	4,34
	COP	W/W	1,76	1,88	1,88
Chłodzenie (A35/24°C, W23/18°C)	Pojemność chłodzenia	kW	10,80	14,85	14,85
	Moc	kW	2,88	3,97	3,97
	Prąd	A	12,52	21,39	6,03
	EER	W/W	3,75	3,74	3,74
Chłodzenie (A35/24°C, W12/7°C)	Pojemność chłodzenia	kW	9,40	13,20	13,20
	Moc	kW	3,16	4,22	4,22
	EER	W/W	2,97	3,13	3,13

* COP coefficient of performance

Parametry w tabeli 1 podano dla dwóch pomp ciepła jednofazowych 12 i 16 kW oraz pompy trójfazowej 16 kW dla typowych wartości temperatur.

Bufor ciepła

Zalecenia producentów pomp ciepła w zakresie wielkości buforów mówią o 9-10 l/kW mocy pompy ciepła. Zastosowanie większych buforów ciepła pozwala na magazynowanie zwiększonych ilości ciepła i wykorzystanie ich w okresach, kiedy:

- następuje zachmurzenie i przestaje pracować fotowoltaika,
- po zachodzie słońca,
- w strefach czasowych drogiego prądu (godz. 6-13, 15-22),
- dłuższa żywotność pompy ciepła, mniejsza ilość załączeń.

Przykładowy bufor ciepła przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy magazyn ciepła firmy EcoJura [2]

Wielkość bufora ciepła

Założenia:

- Ogrzewamy dom o powierzchni 150 m²
- Zapotrzebowanie na energię nie większe niż 79 kWh/m²/r (norma od 2014 r.)
- Licznik energii elektrycznej dwutaryfowy
- Strefa dzienna (droższa) w godz. 6-13 i 15-22. Taryfa G12W
- Strefa nocna (tańsza) w godz. 13-15, 22-6 oraz weekendy i święta

Zapotrzebowanie domu na ciepło 150 m² x 79 kWh/m²/r = 11 850 kWh

Przyjmując długość okresu grzewczego 200 dni, otrzymujemy średnie zapotrzebowanie 59,25 kWh/d.

Czas dostępności energii „nocnej” wynosi 10 h/d.

Wzór na ilość magazynowanego ciepła w wodzie

$$Q = m \times C_w \times [T_2 - T_1] \text{ [J]}$$

gdzie:

m – ilość wody w buforze w kg,

C_w – stała dla wody 4198 J/kg·K,

T₂ – maksymalna temperatura wody w buforze,

T₁ – minimalna temperatura wody w buforze.

Po przekształceniu m = 1016 kg (213 300 000 / 209 900) dla dwóch załączeń pompy w czasie doby i po uwzględnieniu zwiększonego zapotrzebowania w okresie zimowym o 30% powinien zostać zastosowany bufor o pojemności ok. 700 l.

Instalacja fotowoltaiczna

Uwzględniając zapotrzebowanie domu na ciepło w wielkości

$$Q = 11\,850 \text{ kWh/r}$$

i sprawność pompy z czynnikiem R290, COP wynoszącym 4,5, ilość energii, którą należy pobrać z sieci energetycznej, wynosi 2633 kWh.

Dla ceny energii pozaszczytowej (tryb nocny) w firmie Tauron w 2023 roku i powyżej 2000 kWh zagwarantowanej ustawowo w niższej cenie, będzie wynosić 0,751 zł/kWh

i przy zapotrzebowaniu 2633 kWh koszt zakupu energii wyniesie 1977,40 zł/r.

Dodatkowym argumentem dla rozwiązania z pompą ciepła jest posiadanie mikroinstalacji fotowoltaicznej o mocy 4 kW (rys. 4), która zapewnia w warunkach Polski Centralnej i Południowej produkcję roczną na poziomie 4 MWh, co pokrywa zapotrzebowanie pompy ciepła z pewnym nadwyżką.



Rys. 4. Przykładowa instalacja fotowoltaiczna [oprac. własne]

Magazynowanie energii elektrycznej

Magazyny energii wraz z założeniami na przyszłość dla zastosowań domowych można podzielić na:

Magazyny elektrochemiczne (akumulatory)

- Akumulatory Li-Ion,
- Akumulatory żelazowo-fosforanowe LiFePO₄,
- Akumulatory LTO.

Ostatnie analizy przeprowadzone na podstawie dostępnych danych pozyskanych z materiałów prezentowanych przez producentów akumulatorów jednoznacznie wskazują, że do zastosowań dwu-, trzyletnich będą dalej wykorzystywane najtańsze akumulatory Li-Ion. Liczba cykli dla tego typu akumulatorów zależy głównie od głębokości rozładowania (DOD) i wynosi ok. 500 cykli lub nieznacznie więcej. Dla zastosowań średniookresowych przy dwóch cyklach w ciągu dnia głównie będą wykorzystywane akumulatory typu LFP (żelazowo-fosforanowe), których cena jest ok. dwa razy wyższa od Li-Ion, natomiast liczba cykli 3600 na poziomie DOD 80% z nawiązką rekompensuje cenę. Żywotność akumulatorów LFP wynosi ok. 6-12 lat w zależności od liczby cykli w ciągu jednego dnia i głębokości rozładowania, która w przypadku płytszego rozładowania znacznie zwiększa liczbę cykli. Z obecnie produkowanych wersji akumulatory LTO są najbardziej perspektywicznym typem ze względu na liczbę cykli na poziomie 25 000 i, pomimo ich najwyższej ceny, są najbardziej opłacalne po uwzględnieniu liczby cykli głębokości rozładowania DOD 100% i prądów ładowania i rozładowania na poziomie 10C, niektórzy producenci podają informacje o poziomie 30C.

Wnioski

Pompa ciepła 16 kW pobiera z sieci energetycznej 3,41 kW, pozostałą część ciepła pobiera z otoczenia. Duże bufor ciepła zapewniają niższe koszty użytkowania i dłuższy jednorazowy czas pracy pompy ciepła, a to powoduje zwiększony czas pracy (mniejsza ilość cykli). Zastosowanie fotowoltaiki, wiatraków i magazynów energii elektrycznej wydłuża czas wykorzystania energii pozyskanej z OZE oraz pozwala na magazynowanie pewnej części energii w miejscu jej wytworzenia w postaci energii elektrycznej w magazynach typu elektrycznego oraz w postaci ciepła.

LITERATURA

[1] Katalog firmy Aircal Heat Pump.

[2] EcoJura, karta katalogowa JuraHeat B.

Autorzy: mgr inż. Patryk Galuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: patryk.galuszkiewicz@pcz.pl; mgr inż. Zbigniew Galuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zbigniew.galuszkiewicz@pcz.pl

Modelling hysteresis loops of non-oriented electrical steel

Abstract. Non-oriented electrical steels are the most important segment of the market of soft magnetic materials. In the paper the usefulness of the model based on hyperbolic tangent nonlinear transformation for the description of quasi-static hysteresis loops for this type of material. An extension to dynamic conditions was achieved by accounting an additional fractional field term in the description.

Streszczenie. Blachy elektrotechniczne o ziarnach nieorientowanych stanowią najważniejszy segment rynku materiałów magnetycznie miękkich. W pracy zweryfikowano użyteczność modelu opartego na nieliniowej transformacji tangens hiperboliczny do opisu quasi-statycznych pętli histerezy dla tego typu materiału. Rozszerzenia modelu na warunki dynamiczne dokonano poprzez uwzględnienie dodatkowego składnika pola o charakterze ułamkowym. (Modelowanie pętli histerezy stali elektrotechnicznej o ziarnach nieorientowanych).

Introduction

Non-oriented electrical steels (NOES) are the most important group of soft magnetic materials (SMMs). Their share is estimated at 80% [1], whereas their market size was valued at 12.57 billion USD in 2020 [2]. NOES are used in rotating electrical machines, ranging from generators for wind turbines to motors for the transportation sectors and small motors for household appliances [3]. The designers of magnetic circuits in these devices need more and more sophisticated CAD tools in order to optimize their designs and to develop eco-friendly and efficient solutions.

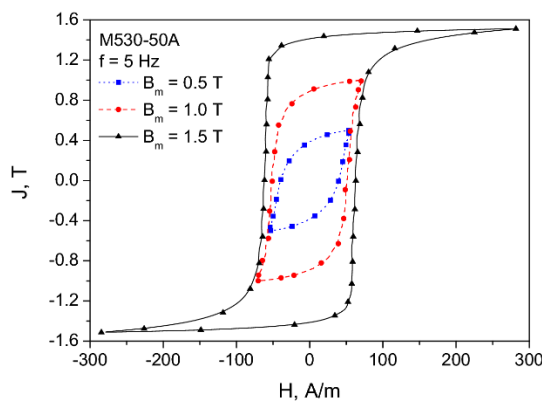


Fig. 1. Measured hysteresis loops for a typical non-oriented electrical steel sheet, 0.50 mm thick, $f = 5$ Hz, rolling direction

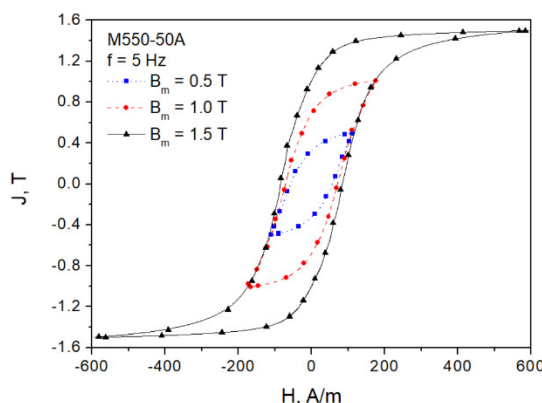


Fig. 2. Measured quasi-static hysteresis loops for a typical non-oriented electrical steel sheet, 0.5 mm thick, transverse direction

The present paper is a follow-up of previous research [4]. The aforementioned paper considered the possibility to describe hysteresis loops of grain-oriented electrical steels used mostly in magnetic circuits of power and distribution transformers with the $T(x)$ hysteresis model [5].

In the present paper an attempt to describe symmetric hysteresis of NO steel with the $T(x)$ model shall be undertaken. Hysteresis loops for two principal directions (rolling and transverse) shall be considered. Despite the steels used in rotating machines are referred to as non-oriented, they exhibit considerable anisotropy (Figs 1 and 2).

Foundations of the $T(x)$ model

The $T(x)$ model is a versatile tool, based on hyperbolic tangent transformation. Its developer used an abstract notation with dimensionless units [5]. Paper [4] provided a tangible interpretation for the anhysteretic curves and provided a practical algorithm for determination of minor loops.

Symmetric hysteresis loops are described with the relationship $y = \tanh(x \mp a_0) \pm b$, where a_0 is coercive field strength in dimensionless units, whereas b is introduced in order to match loop branches at tips with coordinates $\pm x_m$ $b = 0.5 [\tanh(x_m + a_0) - \tanh(x_m - a_0)]$.

It is interesting to remark that within the $T(x)$ model framework there exists a tangible description of the anhysteretic curve (interpreted as the middle curve between the loop branches)

$$y_{\text{anh}} = 0.5t [\tanh(x + a_0) + \tanh(x - a_0)]$$

In magnetic measurements the input signal is magnetic polarization, whereas field strength is the model output. After relatively simple transformations it is possible to derive an analytical expression which allows one to determine field strength values at the anhysteretic curve, it is given as

$$x = \text{atanh} \left\{ \left[-\left(1 - T^2(a_0)\right) + \sqrt{\left(1 - T^2(a_0)\right) + 4T^2(a_0)y_{\text{anh}}^2} \right] / \left[2T^2(a_0)y_{\text{anh}} \right] \right\}$$

The knowledge of anhysteretic curve allow one to determine the corresponding values of loop field strengths, this important remark was stressed out in [6].

In the present paper an attempt to determine quasi-static minor hysteresis loops shall be undertaken for the case when one includes reversibility in the description. The model developer mentioned such possibility in his textbook, the concept relies on adding an additional term in the fundamental model equation which becomes

$$y = \tanh(x \mp a_0) \pm b + cx$$

The effect of non-zero cx is depicted qualitatively in Figure 3; it can be seen that differential susceptibility (loop slopes) is significantly affected; however a less obvious effect is that the modelled value of coercive field strength attains smaller values that for $c = 0$.

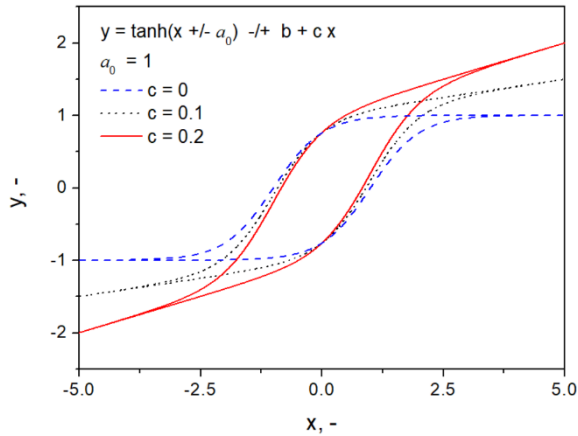


Fig. 3. Simulated major hysteresis loops for different values of c parameter

In this case it is necessary to resort to numerical methods in order to determine the coordinates of the point in which the loop branches coincide.

Acknowledgements

K.Ch., B.K. and M.R. are grateful for financial support within the framework of the Program No. 020/RID/2018/19 "Regional Initiative of Excellence" granted by the Minister of Science and High Education in the years 2019-2023, from which the costs of mutual visits of these scientists to Čačak/Częstochowa, respectively, were covered, leading to fruitful discussions which stimulated the joint cooperation.

REFERENCES

- [1] Davies H.A., Fiorillo F., Flohrer S., Guenther H., Hasegawa R., Sievert J., Varga L.K., Yamaguchi M., Challenges in Optimizing the Magnetic Properties of Bulk Soft Magnetic Materials, *J. Magn. Magn. Mater.*, 320 (2008), 20, 2411-2422
- [2] <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/non-grain-oriented-electrical-steel-market/>
- [3] Heller M., Stöcker A., Kawalla R., Leuning N., Hameyer K., Wei X., Hirt G., Böhm L., Volk W., Korte-Kerzel S., Characterization Methods along the Process Chain of Electrical Steel Sheet – from Best Practices to Advanced Characterization, *Materials*, 15 (2022), 1, 32
- [4] Chwastek K., Jabłoński P., Kusiak D., Szczegielniak T., Kotlan V., Karban P., The Effective Field in the T(x) Hysteresis Model, *Energies*, 16 (2023), 5, 2237
- [5] Takács J., *Mathematics of Hysteretic Phenomena*, Wiley, Weinheim, 2003
- [6] Takács J., Mathematical Proof of the Definition of Anhyseretic state, *Physica B*, 372 (2006), 1-2, 57-60

Authors: *dr hab. inż. Krzysztof Chwastek, prof. CUT, Czestochowa University of Technology, Department of Electrical Engineering, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: krzysztof.chwastek@pcz.pl; dr Branko Koprivica/Marko Rosić, Faculty of Technical Sciences Čačak, 32102 Čačak, Serbia; E-mail: branko.koprivica/marko.rosic@ftn.kg.ac.rs; dr inż. Roman Gozdur, Lodz University of Technology, Department of Semiconductor and Optoelectronic Devices, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź; E-mail: roman.gozdur@p.lodz.pl; dr hab. inż. Piotr Gębara, prof. CUT, Czestochowa University of Technology, Department of Physics, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, E-mail: piotr.gebara@pcz.pl*

Komputerowe technologie trójwymiarowe w elektroenergetyce

Streszczenie. Opisano techniki modelowania trójwymiarowego stosowane w przemyśle, w tym zasady modelowania metodą MES, która obecnie jest powszechnie stosowana podczas procesów projektowych w różnorodnych gałęziach przemysłu. Omówiono najbardziej popularne metody druku przestrzennego wykorzystywane do wytwarzania zaprojektowanych elementów. Wskazano, że druk przestrzenny nie jest jeszcze rozpowszechniony w branży energetycznej tak jak w innych gałęziach przemysłu, co warunkuje możliwość jego zastosowania do produkcji izolacyjnych elementów konstrukcyjnych linii energetycznych. W pracy zaprezentowano w pełni funkcjonalny element osprzętu linii energetycznej wykonany z użyciem technologii FDM wraz z wynikami badań.

Abstract. Publication presents the variety of 3D modeling techniques in industry, and describes the principle of FEM modeling, which is now commonly used in design processes in various industries. The 3D printing methods of designed elements were also shown, and the most popular ones were described. It was pointed out that the 3D printing in the power industry is not yet as popular as in other industries, which significantly increases the possibilities for the development of insulation parameters of power line construction elements. A fully functional element made using FDM technology was presented, which shows the usefulness of this technology as well as gives further opportunities for its development. (*Three-dimensional computer technologies in the electric power industry*).

Wstęp

Dzięki dynamicznemu rozwojowi techniki komputerowej na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat powstało wiele różnorodnych narzędzi i technologii przystosowanych do tworzenia grafiki 3D. Pomimo iż możliwość prezentacji obiektów w trzech wymiarach jest dostępna w inżynierii już od dość długiego czasu, to jej technologia jest ciągle udoskonalana.

Należy również zauważyć, iż obecnie istnieje wiele różnorodnych technik druku przestrzennego. Z roku na rok technologie te są ciągle udoskonalane i nowocześniejsze. Modelowanie trójwymiarowe jest więc nieodłącznym procesem poprzedzającym wykonywane na późniejszym etapie prace optymalizujące stworzone obiekty oraz docelowo sam wydruk zaprojektowanych elementów.

Modelowanie przestrzenne w przemyśle

Obecnie komputerowe przetwarzanie obrazów oraz związane z nim projektowanie różnorodnych elementów wykorzystywanych w przemyśle stało się pewnego rodzaju standardem.

Najczęściej wykorzystywane sposoby modelowania 3D to modelowanie oparte na wykorzystaniu krzywych NURBS (ang. *Non-uniform rational B-splines*). Użycie tego rodzaju krzywych podczas projektowania obiektów pozwala na tworzenie ich ze zdecydowanie większą dokładnością niż w przypadku techniki modelowania wielokątowego (ang. *polygonal modeling*).

Modelowanie wielokątowe to proces polegający na aproksymacji, czyli budowaniu rozwiązań w taki sposób, który nie posiada analitycznej możliwości jego przedstawienia za pomocą siatki tworzącej wielokąty.

Przy tworzeniu różnych obiektów przestrzennych w przemyśle stosuje się również sposób modelowania trójwymiarowego wykorzystujący konstruktywną geometrię bryły CSG (ang. *Constructive Solid Geometry*) [1]. Technika ta bazuje na reprezentacji danych obiektów poprzez zastosowanie przy ich tworzeniu drzewa działań logicznych takich jak sumy, różnice czy iloczyny.

Metoda elementów skończonych (MES)

Metody komputerowe są procesami analizy różnego rodzaju zagadnień, które wykorzystują przybliżone metody obliczeniowe zaimplementowane w postaci programu komputerowego. Metody rozwiązań przybliżonych cieszą się coraz to większą popularnością między innymi w mechanice, termodynamice czy elektrodynamice. Są one najczęściej wiązane z programami CAE (ang. *Computer Aided Engineering*), które, wykorzystując zaawansowane metody

komputerowe, umożliwiają modelowanie różnych zjawisk fizycznych w układach o zróżnicowanych stopniach zaawansowania. Programy te pozwalają na symulację dynamiki/kinematyki układu, analizę przepływu ciepła, naprężeń czy aerodynamiczności złożonych obiektów. Zastosowanie tej technologii w przemyśle znacząco usprawnia proces projektowania bardziej skomplikowanych obiektów, a tym samym ma duży wpływ na obniżenie kosztów tego procesu [2].

Druk przestrzenny, czyli technologia przyrostowa

Prace nad koncepcją technologii druku przestrzennego sięgają lat 70. XX wieku. Obecnie technologia druku 3D to jedna z najpopularniejszych technologii w produkcji małoseryjnej części wykonywanych z tworzyw sztucznych o dobrych właściwościach mechanicznych. Technologia ta zapewnia stosunkowo wysoką jakość zespolenia poszczególnych warstw ze sobą, minimalizując ryzyko ich oddzielenia się od siebie.

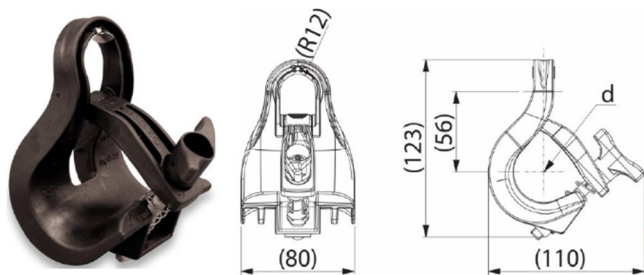
Na rynku istnieje wiele technik druku przyrostowego, na przykład technologia FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*), która jest obecnie metodą najbardziej rozpowszechnioną. Jej popularność wynika ze stosunkowo niskich kosztów zakupu urządzenia do druku, niskich kosztów eksploatacji oraz dużej gamie dostępnych na rynku materiałów drukarskich, tzw. filamentów.

Większość drukarek FDM posiada jedną głowicę drukującą, co pozwala na wydruk modelu tylko z jednego rodzaju materiału. Dostępne są jednak drukarki, które pozwalają na jednoczesny wydruk za pomocą czterech lub pięciu filamentów o różnych kolorach i parametrach. Druk metodą FDM jest stosunkowo tani w porównaniu do technologii SLS i SLA, jednak wytworzone elementy nie są tak precyzyjne jak przy zastosowaniu metod SLS i SLA [3].

Osprzęt izolacyjny napowietrznych linii energetycznych

Poprawnie działający system elektroenergetyczny zapewnia bezpieczeństwo energetyczne, czyli stan gospodarki, który umożliwia pokrycie bieżącego oraz perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną. Parametry izolacyjne stosowanego obecnie osprzętu uległy znaczącej poprawie, a co z tego wynika, zmniejszyła się ich podatność na awarie i uszkodzenia. Osprzęt jest również o wiele bardziej rozwinięty niż jeszcze kilkanaście lat wstecz, kiedy – ze względu na brak możliwości zastosowania tworzyw sztucznych – wykorzystywano najczęściej elementy stalowe izolowane za pomocą ceramiki lub szkła, co nie dawało zbyt dużych możliwości rozwoju. Nowoczesne materiały łączą ze sobą

wiele potrzebnych cech, takich jak: wytrzymałość na różnice temperatur, trudnopalność i odporność na promieniowanie UV. Na szczególną uwagę zasługuje uchwyt przelotowy prod. ENSTO, który został wykonany w całości z tworzywa sztucznego, a jedynym elementem stalowym jest śruba łącząca wszystkie jego części (rys. 1).



Rys. 1. Schemat uchwytu przelotowego SO270 2-4x(25-120) mm² prod. ENSTO [4]

Uchwyt ten jest powszechnie stosowanym elementem osprzętu linii energetycznej. Spełnia on wszystkie stawiane przed nim wymagania zapisane w odnośnych normach (tj. PE-EN-50483-4/5/6).

Osprzęt linii elektroenergetycznych a druk 3D

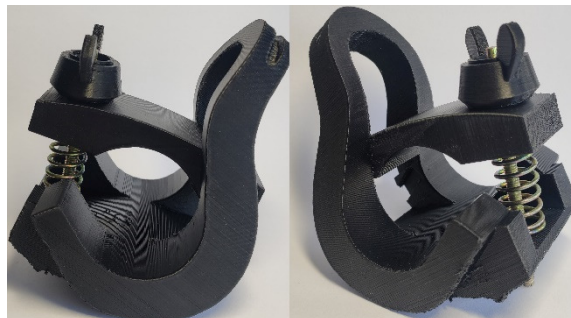
Obserwując rozwój technologiczny zarówno technologii przestrzennych, w tym różnych programów do modelowania przestrzennego, jak i rozmaitych technologii przyrostowych, zapostulowano możliwość wykorzystania druku 3D do prototypowania osprzętu linii elektroenergetycznych. W tym celu podjęto próbę ponownego zaprojektowania jednego z dostępnych na rynku uchwytów przelotowych, przy czym dostosowano tworzony model pod kątem druku przestrzennego. Skupiono się na wewnętrznej strukturze obiektu oraz na doborze takiego materiału drukarskiego, który posiada odpowiednio parametry dielektryczne.

Pierwszym, bardzo istotnym etapem tego procesu było zamodelowanie obiektu za pomocą narzędzia do modelowania przestrzennego. Zamodelowany obiekt przeniesiono do oprogramowania Z-Suit, firmy ZORTRAX. Narzędzie to służy do zarządzania drukiem 3D, jak również daje możliwość dostosowania zaimportowanego modelu pod kątem skalowania modelu oraz wyboru jego struktury wewnętrznej, co ma znaczenie w przypadku testów określających wytrzymałość elementu na przebicie.

Ważnym aspektem procesu wytwórczego elementu był dobór materiału drukarskiego. Dobrano filament o nazwie Z-ESD, charakteryzujący się znaczącą rezystywnością powierzchniową (10^6 - 10^9 Ω/sq), co pozwala na wykorzystanie go do tworzenia obiektów, w których występuje ryzyko przepływu prądu elektrycznego (np. podczas uszkodzenia warstwy izolacyjnej przewodu typu AsXSn, do której przytwierdzony jest uchwyt).

Zrealizowano próbną wydruk elementu w technologii FDM. Rezultaty prac, tj. gotowy uchwyt przelotowy linii nN, przedstawiono na rysunku 2. Przybliżony sumaryczny czas wydruku uchwytu to około 36 godzin, a masa zużytego materiału drukarskiego to 225 gramów. Parametry czasowe podano dla drukarki firmy ZORTRAX M200, co jest istotne,

gdyż czas wytworzenia takiego elementu może ulegać znacznym zmianom zależnie od posiadanej bazy sprzętowej.



Rys. 2. Uchwyt przelotowy linii napowietrznej izolowanej wykonany w technologii druku 3D [opracowanie własne]

W celu doświadczalnej weryfikacji poprawności działania oraz wytrzymałości elektrycznej wydrukowanego uchwytu zaprojektowano i wykonano układ pomiarowy zasilany z transformatora 220 V/60 kV. Służył on do zamodelowania krytycznych warunków, jakie mogą wystąpić w izolowanej napowietrznej linii energetycznej niskiego napięcia.

Układ zasilono z transformatora i przeprowadzono próby napięciowe napięciem 1 kV oraz 6 kV. Uchwyt przelotowy spełnił założenia i zadziałał poprawnie, co potwierdził brak przebicia elektrycznego do konstrukcji montażowej. Pomiary wykonano w temperaturze równej 24°C przy stosunkowo niskiej wilgotności powietrza (około 33%).

Podsumowanie

W pracy wykazano przydatność technik modelowania oraz druku 3D do wykonania prototypów osprzętu linii energetycznych niskiego napięcia. Opracowana i wykonana konstrukcja może być poddawana dalszym modyfikacjom w zakresie struktury zewnętrznej i wewnętrznej oraz zastosowanych materiałów, w tym pod kątem właściwości elektrycznych, właściwości mechanicznych, odporności na promieniowanie UV, jak też redukcji masy elementu. Dodatkowo, zastosowanie bardziej zaawansowanego oprogramowania graficznego, posiadającego wbudowane funkcje wykorzystujące metody MES, daje możliwość uwzględnienia analizy rozkładu pola elektrycznego w procesie projektowania, a tym samym optymalizacji właściwości końcowych elementu. Powyższe zagadnienia będą obszarem dalszych prac badawczych.

LITERATURA

- [1] Schneider P., NURB Curves: A Guide for the Uninitiated, MACTECH, 26.09.2014
- [2] Matulewski J., Grafika 3D czasu rzeczywistego, WN PWN, Warszawa 2014
- [3] Paliga I.J., Popularne technologie druku 3D, Studio, 2016
- [4] Ensto Pol Sp. z o.o., Katalog wyrobów dla energetyki, 2023

Autorzy: mgr inż. Mateusz Rak; dr hab. inż. Mariusz Najgebauer, prof. PCz; dr inż. Jarosław Jędryka, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: mateusz.rak@pcz.pl; mariusz.najgebauer@pcz.pl; jaroslaw.jedryka@pcz.pl

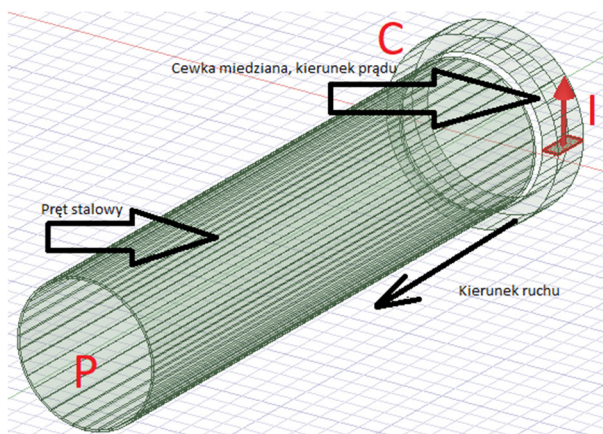
Nagrzewanie indukcyjne jako proces przemiany strat wiroprowodowych w energię cieplną w ruchu liniowym

Streszczenie. Przedstawiono wykorzystanie środowiska Ansys do symulacji wielośrodowiskowej. Omówiono źródła ciepła, rozkład ciepła w środowiskach przewodzących ciepło, rozpraszanie ciepła, straty elektryczne, nagrzewanie się elementów urządzeń pod wpływem strat elektrycznych, temperaturę nagrzewanych elementów urządzeń, powiązanie stanu energetycznego ogrzewanych elementów z ruchem ślizgowym, czyli ruch elementów urządzenia związany ze stratami generowanymi w urządzeniu.

Abstract. The article presents the use of the Ansys environment for multi-environment simulation. Combination of heat source, heat distribution in heat-conducting environments, heat dissipation, electrical losses, heating of device elements under the influence of electrical losses, temperature of heated device elements, linking the energy state of elements with the sliding movement of heating and heated elements, i.e. movement of device elements associated with losses generated in the device. (**Induction heating as a process of transforming eddy current losses into thermal energy in linear motion**).

Wstęp

W artykule przedstawiono sposób zastosowania programów Ansys do analizy układu przedstawionego na rysunku 1. Pręt stalowy, oznaczony na rysunku „P”, obejmowany jest przez cewkę „C”, w której płynie prąd „I”. Kierunek prądu oznaczony jest czerwoną strzałką. Częstotliwość prądu w cewce jest rozpatrywana jako jedna ze zmiennych systemowych, gdyż zmiana częstotliwości zasilania ma wpływ na wielkość strat wiroprowodowych. Straty, które w obiekcie zostają zamienione na ciepło, mają zaś wpływ na bilans energii. W wirtualnym doświadczeniu, które rozpatrywane jest w niniejszej pracy, autorzy dokonali porównania wpływu zmiany częstotliwości w zakresie 60 Hz do 3 kHz. W trakcie symulacji brano pod uwagę obszar pręta pokryty cewką wzbudnika. Jest to obszar ok. 0,5 długości pręta. Przestrzeń dobrano w ten sposób, aby można było jednocześnie obserwować rozptyw energii cieplnej w objętości badanego pręta.



Rys. 1. Zobrazowanie zjawiska analizowanego w artykule zrealizowanego w oparciu o strukturę wielościanową (36 płaszczyzn składających się na okrąg)

Metoda obliczeń

Wszystkie obliczenia wykonano, wykorzystując środowisko Ansys Workbench 2021. Część użyta do symulacji wykonana została za pomocą programu Maxwell, pracującego zgodnie z metodą elementów skończonych tensorów naprężeń Maxwella (3).

Kształt taki w znacznym stopniu ułatwia projektowanie siatki elementów skończonych, zmniejszając jednocześnie wielkość obliczeń błędnych. Po wyliczeniu rozkładu natężenia pola B [T] w analizowanej przestrzeni można obliczyć rozkład sił, prądów, momentów oraz temperatury, używając znanej formuły

$$(1) \quad F = \int \left[\frac{1}{\mu_0} B(B.n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2.n \right] dC$$

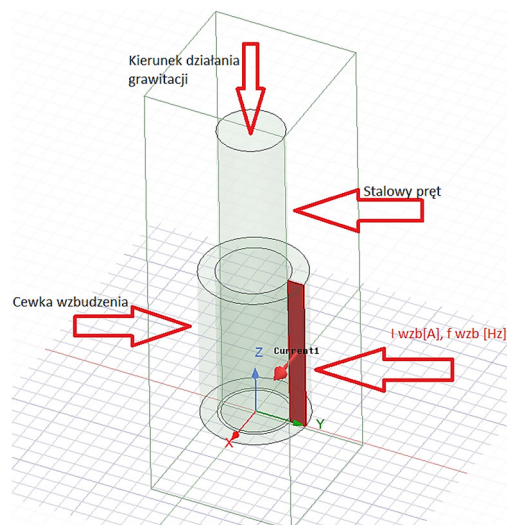
Biorąc pod uwagę gabaryty oraz stopnie swobody analizowanego urządzenia, można przewidzieć momenty skrętu działające na maszynę

$$(2) \quad T = r * F$$

Wielkości obliczone na podstawie wzorów (1) oraz (2) wraz z wyliczonymi po symulacji wartościami indukcji B [T] przy wektorze jednostkowym n , wskazującym kierunek działającej siły, indukcji, prądu lub momentu obrotowego, przy uwzględnieniu wielkości stałej przenikalności magnetycznej dla próżni $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] są prawdziwe pod warunkiem zachowania właściwej proporcji pomiędzy przenikalnością magnetyczną próżni oraz przenikalności materiału konstrukcyjnego analizowanego urządzenia w proporcji większej niż 1/1000. W przypadku analizy urządzenia konstruowanego ze stali w otoczeniu powietrza, próżni (przenikalność stali, powietrza) warunki te są spełnione.

Wyniki obliczeń

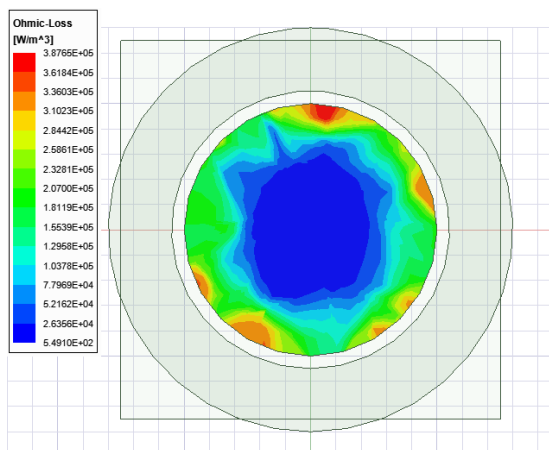
W związku z możliwością dostępu do Platformy Obliczeniowej PIONIER z jej dużymi obszarami pamięci oraz szybkimi procesorami użyto projektu bez konieczności stosowania kształtów wielopłaszczyznowych. Na rysunku 2 przedstawiono projekt analizowany w niniejszym artykule. Należy zwrócić uwagę na konstrukcję wykonaną w oparciu o krzywe gładkie, a ilość elementów skończonych użytych do tego rodzaju analizy pozwolił na wyliczenia z ilością elementów błędnych poniżej 1%.



Rys. 2. Zobrazowanie zjawiska analizowanego w artykule zrealizowanego w oparciu o strukturę krzywych gładkich

Zgodnie z założeniami do projektu wstępnego urządzenie składa się z cewki miedzianej zasilanej prądem przemiennym o częstotliwości f . Pole generowane przez cewkę powoduje pojawianie się prądów wirowych Eddy Current, które to prądy, przepływając po powierzchni pręta (zjawisko wypierania prądów), powodują jego nagrzewanie. Program Ansys Maxwell pozwala jedynie na wyliczenie strat związanych z rezystancją materiału grzanego indukcyjnie (Omic Losses). W ten sposób można tylko oszacować straty (nagrzewanie) na podstawie gęstości energii strat (jednostką jest kW/m^3).

W przypadku pierwszych obliczeń (tab. 1) straty wynoszą np. $5,83\text{E}5 \text{ W/m}^3$, licząc wyniki podłużnego przekroju wałka, a więc 583 kW/m^3 . Wielkość wynika ze skali wykresu i wielkości maksymalnych, a nie wartości rzeczywistych. Przykładowy wykres rozkładu strat rezystancyjnych w wałku przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Straty rezystancyjne w pręcie: przekrój poprzeczny wałka na wysokości $\frac{1}{2}$ cewki (patrz rys. 2)

Biorąc powyższe pod uwagę, należałoby policzyć energię wydzielną w podgrzewanym pręcie zgodnie z wzorem

$$(3) \quad E = \oint \text{OmicLoss} \, dV$$

Tego rodzaju potraktowanie obliczeń pozwala na wyliczenie rzeczywistej wartości energii przekazywanej przez cewkę do materiału wałka stalowego poprzez korzystanie ze specjalizowanego kalkulatora, który można znaleźć w programie Maxwell. Dodatkowo tę funkcję można wykonać, przekazując obliczenia do programu sprzężonego z programem Maxwell o nazwie IcePack. Jest to program środowiska Ansys potrafiący poprzez właściwe sprzężenie obliczyć temperaturę ustaloną wałka. Należy zwrócić uwagę, że wyniki można jedynie interpretować jako „stan ustalony”.

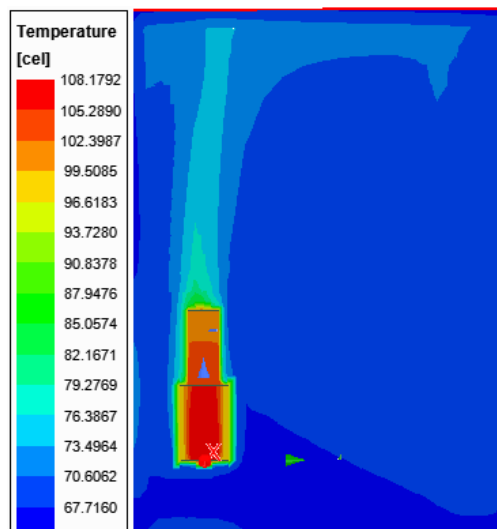


Rys. 4. Schemat „coupling” w procesie wyliczania temperatury wałka

Tabela 1. Wyniki symulacji

Lp.	$I_{\text{wz}} [\text{kA}]$	$f_{\text{wz}} [\text{Hz}]$	$B [\text{T}]$	Straty $[\text{W/m}^3]$
1	0,8	60	0,29	0,168E5
2	0,8	300	0,68	1,97E5
3	0,8	1000	1,12	1,25E6
4	0,8	2000	1,30	3,16E6
5	0,8	3000	1,43	1,23E7

W celu uzyskania powyższych wyników należało użyć sprzężenia programów przy 4 nawrotach (oznacza to stabilizację po trzecim przybliżeniu). Przykładowe wyniki zapotrzebowania mocy potrzebnej do podgrzania pręta do temperatury przedstawionej na wykresach rozkładu temperatury przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład temperatury w obszarze obliczeń. Pokazany przepływ ogrzanego powietrza

W obliczeniach uwzględniono dodatkowo dynamiczną zmianę rezystancji miedzi w zależności od temperatury cewki oraz zależność zmiany objętości powietrza w zależności od jego temperatury. Efekt tego rodzaju zmian można zaobserwować, wywołując w symulacji zmianę kierunku grawitacji i efektów tego rodzaju postępowania przy zmianie danych przeprowadzonego doświadczenia wirtualnego.

LITERATURA

- [1] Ansys, *System coupling Tutorials, Dokumentacja Ansys 2023*
- [2] Halmann D., *Modelowanie układów elektromagnetycznych w środowisku Ansys (Ansys Electronics Desktop)*, Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia
- [3] Maxwell 15.0 application User's Guide
- [4] Ansys 14.0 application User's Guide
- [5] WorkBench 14 application User's Guide
- [6] Wang Z.Z., Zhang Ch.-N., Song Q., Fan J.-X., Zhang Ch.-X., *Research on noise source identification of traction motor system for electric buses based on sound intensity*, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE

Autorzy: dr hab. inż. Marek Lis, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marek.lis@pcz.pl; mgr inż. Michał Kobierski, Politechnika Częstochowska, Szkoła Doktorska, ul. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa, E-mail: fireman666@o2.pl; dr inż. Marek Chmiel, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marek.chmiel@pcz.pl

Ocena stopnia odkształcenia sygnałów w obwodzie z łukiem elektrycznym o zaburzonych parametrach

Streszczenie. Opisano czynniki wpływające na odkształcenia przebiegów na wejściach wybranych odbiorników energii elektrycznej oraz wskazano na ich skutki eksploatacyjne. Ocenę ilościową tych efektów wyrażono za pomocą współczynników zawartości harmonicznyc. Dokonano tego symulacyjnie bez uwzględniania zaburzeń, z zaburzeniami deterministycznymi oraz z zaburzeniami losowymi. Jako obciążenie nieliniowe wybrano łuk elektryczny opisany modelem hybrydowym Mayra-Cassiego. Zamieszczono charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne oraz obliczono wartości wielkości elektrycznych z wykorzystaniem współczynników THD.

Abstract. The factors influencing waveform distortions at the inputs of selected electric energy receivers were described and their operational effects were indicated. The quantification of these effects was expressed using harmonic content factors. This was done by simulation without taking into account disturbances, with deterministic disturbances and with random disturbances. The electric arc described by the Mayr-Cassie hybrid model was selected as the non-linear load. The dynamic voltage-current characteristics have been included and the values of electrical quantities have been calculated using the THD coefficients. (Evaluation of the degree of distortion of signals in a circuit with an electric arc with disturbed parameters).

Wstęp

Jednym z najważniejszych wskaźników pomiarowych służących do określania jakości energii elektrycznej jest całkowite zniekształcenie harmoniczne THD (Total Harmonic Distortion) [1]. Oprócz tego stosuje się zestaw limitów ustalonych w stosunku do poszczególnych harmonicznyc. Limity harmonicznyc napięcia (normy międzynarodowe to amerykańska IEEE 519, IEC 61000-2-2, IEC 61000-2-12 oraz norma europejska EN 50160) zależą od wielkości sieci.

Obie normy IEC, podobnie jak IEEE 519 i EN 50160, ustalają w sieciach nN i SN limit całkowitych harmonicznyc napięcia na poziomie 8%, a także określają limity dla poszczególnych harmonicznyc napięcia, w tym przypadku aż do 50 lub 40 harmonicznyc. To zależy od możliwej krotności harmonicznyc względem 3 i ich parzystości [2].

W sieciach publicznych stosuje się 5% dla całkowitego zniekształcenia harmonicznyc prądu i 2% całkowitego zniekształcenia harmonicznyc napięcia, z maksimum 1% dla poszczególnych harmonicznyc napięcia.

Jeśli poziomy zakłóceń losowych są stosunkowo wysokie, to mogą znacząco wpływać na błędy pomiarów wskaźnika THD.

Określenia współczynników zawartości harmonicznyc bez uwzględniania zaburzeń losowych

Całkowite zniekształcenie harmoniczne (THD) definiuje się jako stosunek napięcia skutecznego wszystkich produktów zniekształceń (oprócz składowej stałej) do całkowitego napięcia skutecznego sygnału

$$(1) \quad THD_{r_n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_{total}} 100\%$$

Często odnosi się go do harmonicznyc podstawowej

$$(2) \quad THD_{f_n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} 100\%$$

Wartości THD (zarówno THD_f, jak i THD_r) wyrażone w procentach można przeliczać na decybele i odwrotnie, np.

$$(3) \quad THD_{dB} = 20 \log \frac{THD_{\%}}{100}$$

Znajomość wartości skutecznej składowej podstawowej i wskaźnika THD konkretnej wielkości elektrycznej umożliwia obliczanie wartości skutecznej napięcia [3]

$$(4) \quad U = U_1 \sqrt{1 + THD_{f_U}^2}$$

Moc czynna może być określona z zależności

$$(5) \quad P = U_1 I_1 (1 - THD_{f_U} \cdot THD_{f_I})$$

Natomiast moc pozorna wyraża się wzorem

$$(6) \quad S = UI = U_1 \sqrt{1 + THD_{f_U}^2} I_1 \sqrt{1 + THD_{f_I}^2}$$

Określenia współczynników zawartości harmonicznyc z uwzględnianiem zakłóceń losowych

Całkowite zniekształcenia harmoniczne sygnału wraz z szumem można określić ze wzorów

$$(7) \quad THD_{r_n} + N = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2 + V_{noise}^2}}{V_{total}} 100\%$$

lub

$$(8) \quad THD_{f_n} + N = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2 + V_{noise}^2}}{V_1} 100\%$$

Normy zalecają przeprowadzanie pomiarów harmonicznyc do 40 rzędu (THD40) w przebiegu napięciowych sieci zasilania o częstotliwości znamionowej 50 Hz. Szerokość okna czasowego analizy DFT jest również określona i wynosi 200 ms, tym samym rozdzielczość częstotliwościowa wynosi 5 Hz. Normy zalecają także przeprowadzenie uśredniania wyznaczonych wartości Ah w bardzo krótkim (3 s), krótkim (10 min) i długim (2 godz.) czasie pomiaru.

Modele łuku z zaburzonymi losowo parametrami

W wyniku integracji modeli Mayra i Cassiego otrzymuje się bardziej ogólny model hybrydowy w postaci

$$(9) \quad g = \varepsilon(i) \frac{i^2 + I_M^2}{P_M} + [1 - \varepsilon(i)] \frac{i^2}{g U_C^2} - \theta(i) \frac{dg}{dt}$$

gdzie: P_M – moc modelu Mayra, U_C – napięcie modelu Cassiego, I_M – odcięta punktu odpowiadająca napięciu zapłonu $U = P_M / (2I_M)$, ($I_M > 0$ A).

Funkcję wagową można określić zależnością

$$(10) \quad \varepsilon(i) = \exp\left(\ln(k_i) \frac{i^2}{I_0^2}\right)$$

Wartość k_i określa rzędną punktu przełączania funkcji $\varepsilon(l_0) = k_i$, gdzie $0 < k_i < 1$, $l_0 > l_M$. Funkcja tłumienia może być zadana w postaci nieliniowej zależnej od prądu

$$(11) \quad \theta(i) = \theta_{iC} + \theta_{iM} \exp(-\alpha_i |i|)$$

gdzie $\theta_M \gg \theta_C$. Bardziej fizycznie uzasadniona jest jej zależność od konduktancji kolumny

$$(12) \quad \theta(g) = \theta_{gC} + \theta_{gM} \exp(-\alpha_g g)$$

gdzie $\theta_{gM} \gg \theta_{gC}$. Zamiast stałych parametrów można użyć zależności określające wielkości stochastyczne

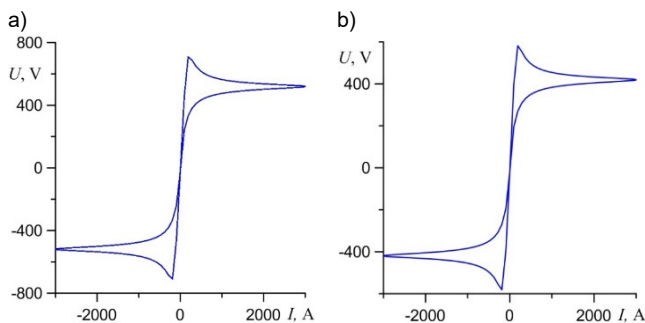
$$(13) \quad U_{st}(t) = U_C + \xi_C(t) \cdot U_C = (1 + \xi_C(t)) U_C$$

gdzie $\xi_C(t)$ – bezwymiarowe zaburzenia stochastyczne.

Badania symulacyjne procesów w obwodzie z łukiem elektrycznym o harmonicznych i stochastycznych zaburzeniach parametrów

Na początku dokonano symulacji procesów w obwodach z łukiem niezaburzonym i z wymuszeniem prądowym sinusoidalnym $i = 3000 \sin \omega t$, A o częstotliwości 50 Hz. W drugim etapie uwzględniono występowanie zakłóceń deterministycznych. Symulacje z zaburzeniami stochastycznymi przeprowadzono na trzecim etapie badań. Wyniki badań pokazano na rysunkach i w tabeli 1.

Na rysunku 1 pokazano charakterystyki dynamiczne łuku niezaburzonego.



Rys. 1. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków z wymuszeniem prądowym sinusoidalnym opisanych modelem hybrydowym ($P_M = 500$ W, $I_M = 5$ A, $\theta_M = 1 \cdot 10^{-3}$ s, $\theta_C = 2 \cdot 10^{-4}$ s, $k_i = 0,4$, $I_0 = 10$ A, $U_{AK} = 16$ V): a) z funkcją tłumienia (11) i $U_C = 500$ V, $\alpha_i = 0,2$ A $^{-1}$, b) z funkcją tłumienia (12) i $U_C = 400$ V, $\alpha_g = 500$ S $^{-1}$

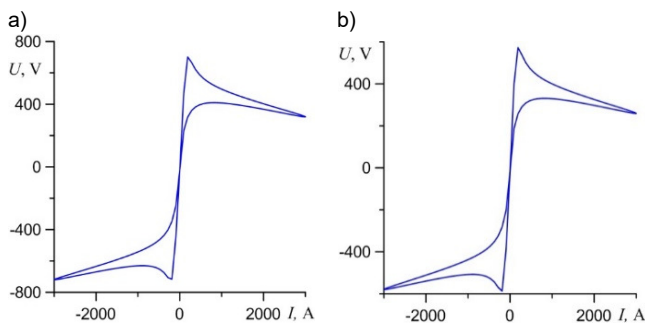
Na rysunku 2 pokazano charakterystyki dynamiczne łuku płonącego w warunkach występowania zaburzeń

$$(14) \quad U_{st}(t) = (1 + \alpha_{23} \sin \omega t) U_C$$

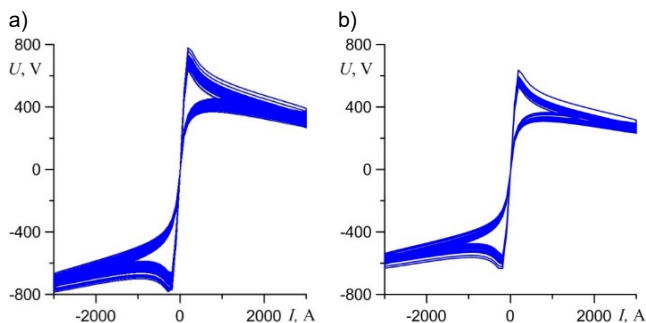
Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki dynamiczne łuku płonącego w warunkach zaburzeń losowych

$$(15) \quad U_{st}(t) = (1 + \alpha_{23} \sin \omega t + \alpha_s \xi(t)) U_C$$

gdzie $\alpha_s = 0,01$.



Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków z zaburzeniami deterministycznymi ($\alpha_{23} = -0,4$): a) z funkcją tłumienia (11), b) z funkcją tłumienia (12)



Rys. 3. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków z zaburzeniami deterministycznymi i losowymi: a) z funkcją tłumienia (11), b) z funkcją tłumienia (12)

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów w obwodzie z łukiem

Rys.	THDf+N [%]	THDr+N [%]	U_{rms} V	P W	S VA
1a	44,63	40,75	513,6	$9,63 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^6$
1b	44,67	40,79	414,6	$8,31 \cdot 10^5$	$8,79 \cdot 10^5$
2a	46,51	40,94	517,2	$9,90 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^6$
2b	46,51	40,97	417,5	$7,99 \cdot 10^5$	$8,82 \cdot 10^5$
3a	46,69	41,11	503,1	$9,67 \cdot 10^5$	$1,07 \cdot 10^6$
3b	46,68	41,12	406,1	$7,84 \cdot 10^5$	$8,61 \cdot 10^5$

Wnioski

1. Zaburzenia deterministyczne pochodzące od oddziaływania sąsiednich faz układu trójfazowego wpływają na deformacje dynamicznych pętli histerezy łuku elektrycznego. Skutkiem jest wzrost THD.
2. Jednoczesne występowanie zaburzeń deterministycznych i stochastycznych powoduje nie tylko zdeformowania, ale i rozmycie dynamicznych pętli histerezy łuku elektrycznego. Ponadto następuje wzrost THD.

LITERATURA

- [1] Lechner T., Harmonic Distortion Measurements in the Presence of Noise, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG Mühldorfstraße 15 | D - 81671 München, June 17, 2011
- [2] Markiewicz H., Klajn A., Zaburzenia napięcia Norma EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, Politechnika Wroclawska, Lipiec 2004
- [3] Svensson S., Power Measurement Techniques for Non-sinusoidal Conditions. The Significance of Harmonics for the Measurement of Power and other AC Quantities, Diss., Göteborg 1999

Autorzy: dr inż. Marek Gała, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marek.gala@gmail.com; dr hab. inż. Antoni Sawicki, E-mail: sawicki.a7@gmail.com; dr hab. inż. Lubomir Marciniak, E-mail: lubmar2015@gmail.com

Audits of road lighting installations – case study

Abstract. In the European Union (EU), street lighting accounts for around 3-4% of the total electricity used by EU countries. In Poland, the energy consumption of street lighting is approximately 1.5% of the total electricity consumed in the country. However, in some cities, such as Warsaw or Krakow, the energy consumption of street lighting can be up to 40% of the total electricity consumed by the city. The Energy Efficiency Act in force in Poland assumes that final energy savings of 5580 thousand toe will be achieved by the end of 2030. One of the basic tools to be used in order to achieve savings in electricity consumption is a properly conducted energy audit of such installations. There are no guidelines or other documents that could be used by auditors of such installations. In the article, based on a selected road lighting installation, the authors want to present good practices that auditors should follow.

Streszczenie. W Unii Europejskiej (UE) oświetlenie uliczne stanowi około 3-4% całkowitej energii elektrycznej zużywanej przez kraje UE. W Polsce zużycie energii przez oświetlenie uliczne wynosi około 1,5% całkowitej energii elektrycznej zużywanej w kraju. Jednakże, w niektórych miastach, takich jak Warszawa czy Kraków, zużycie energii przez oświetlenie uliczne może wynosić nawet do 40% całkowitej energii elektrycznej zużywanej przez miasto. Obowiązująca w Polsce ustawa o efektywności energetycznej zakłada osiągnięcie oszczędności energii finalnej do końca 2030 roku w wysokości 5580 tys. toe. Jednym z podstawowych narzędzi do stosowania w celu osiągnięcia oszczędności zużycia energii elektrycznej jest prawidłowo przeprowadzony audyt energetyczny takich instalacji. Nie ma opracowanych wytycznych ani innych dokumentów, jakimi mogliby się posługiwać audytorzy takich instalacji. W artykule na podstawie wybranej drogowej instalacji oświetleniowej autorzy chcą przedstawić dobre praktyki, którymi powinni kierować się audytorzy. (Audyty instalacji oświetlenia drogowego jako narzędzie poprawy energooszczędności – studium przypadku).

Introduction

As the world's population grows, so does the demand for energy. Despite the crisis caused by the Covid pandemic and Russia's invasion of Ukraine, long-term forecasts of electricity demand indicate that this demand will increase in the coming years [1]. This is due to many factors, including the expected increase in demand for electric vehicles and heat pumps. To meet this ever-increasing demand, the efficient use of electricity has become increasingly important in all aspects of energy consumption. One way to use electricity efficiently is to take various measures to save energy.

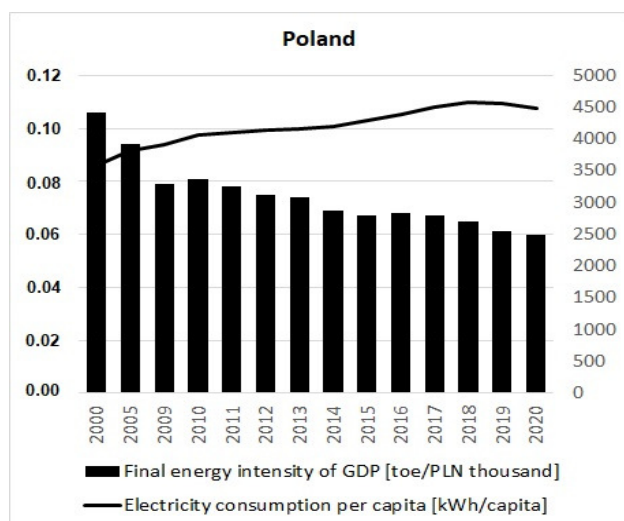


Fig. 1. Change in total energy intensity in Poland against the background of total energy consumption per capita from 2000 to 2020. Source: Own study

This is shown in Figure 1, where a clear upward trend can be seen in the case of electricity consumption per capita in Poland against the background of a decrease in the economy's energy intensity in these years in [toe/PLN thousand]. We face a dilemma how and where to save electricity so that the output power increases.

LED technology is far more energy efficient than any previous light-emitting technology. Many innovative

technologies are being developed around the world, e.g. PLED [2, 3], which are intended to improve the efficiency of the LED sources themselves or other elements of lighting installations [4]. Street lighting in Poland, according to various estimates [5, 6], consumes from 1500 to 2500 GWh of electricity and is responsible for a significant part of greenhouse gas emissions. Based on estimates, it is estimated that approximately 3.3 million street and road luminaires are used in Poland. Sodium and mercury sources dominate in lighting installations, accounting for up to 60% of emitters used. These sources are characterized by a relatively low efficiency (about 40%), and the average age of such lighting installations is 15-30 years. It is estimated that by 2030, LED technology is to be used to illuminate all buildings and roads managed by the local government in the group of so-called "Progressive Cities" [6]. This is to improve the energy efficiency of communes, reduce CO₂ emissions, and reduce the costs associated with the fee for electricity consumption [7].

In order to consciously and responsibly carry out the modernization of street lighting, which often has to be associated with investments – according to the authors, an inseparable element is to conduct an energy audit of such an installation. In the article, the authors present selected elements of an example of an energy audit of a road lighting installation containing, in their opinion, the necessary elements required on the basis of the required legal acts and the Standards in force in Poland.

Energy audit of a road lighting installation - a case study

In the world literature [8-11], the authors present various approaches to increasing energy efficiency and describe various parameters characterizing street lighting installations. In Poland, apart from the Energy Efficiency Act [12], in which the legislator described in detail the required efficiency indicators and detailed Ministerial Regulations [13], auditors are obliged to apply the regulations contained in the Standards [14-18] when performing an audit.

One of the streets in a small county town in the north of Poland was chosen as a case study. In accordance with the above-mentioned legal acts, an inventory of the entire road lighting installation and the necessary measurement data was made. The results are presented in Tables 1 and 2.

Table 1. Results of road lighting installation inventory

PARAMETER	THE RESEARCH RESULTS
Lighting category	M5
Road surface	Asphalt
Road width	6 m
Pole type	concrete type ZN+OZ
Number of poles	4+5 (11)
Pole height	8 m
Distance from the edge of the road	4 m
Distance between poles	50 m
Boom height	0.3 m
Boom angle	5°
Boom length	1.5 m
Types of luminaires	SGS 203 + MALAGA
Luminaire power	250 W
Light source type	soda
The color of the light	yellow
Number of luminaires	8+1 (9)
Fixing the luminaire	4 under the power line, 5 on the cable line
QUALITY PARAMETERS	
Visual guidance	Good
Color rendering	Low (sodium lighting)
Installation aesthetics	Partly unsightly

Table 2. Results of photometric measurements of road lighting installation

PARAMETER	RESEARCH RESULTS	NORM
Average surface luminance $L_m [cd/m^2]$	2.18	0.5
Total uniformity U_0	0.13	0.35 (lowest value)
Longitudinal uniformity U_l	0.12	0.40 (lowest value)
Interfering glare [%]	26,00	15 (maximum)

Conclusions

- Road with medium traffic. The lighting does not meet all the parameters and is inappropriate for this class of street. Light sources with disproportionately high power as for this class of street were used. Energy-intensive effect, uneconomical. Can be replaced with 72W LED luminaires.
- Modernization proposal for LED luminaires with the following parameters:
 - luminous flux (luminaire): 7221 lm, luminous flux (lamp): 8700 lm, Luminaire power: 72.0 W.
- Analysis of the profitability of lighting modernization: The existing sodium lighting generates high electricity consumption, which significantly burdens the city budget in terms of electricity charges. High energy consumption also means high CO₂ emission.
- Thanks to the modernization we gain:
 - Decrease in charges for electricity consumption by 75%. Such a significant decrease is possible thanks to the use of 72 W LED luminaires, which meet the same parameters as the existing sodium luminaires.
 - Energy efficiency of the new installation – electricity consumption is significantly lower by 75%.
 - Reduced CO₂ emissions by 7.4 tons – a significant ecological effect in the residential area.

REFERENCES

- [1] Ministry of Climate and Environment, Energy Policy of Poland Until 2040, Warsaw (2021)
- [2] Cao Y. et al., Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometre-scale structures, *Nature*, 562 (2018), 249-253
- [3] Lin K. et al., Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent, *Nature*, 562 (2018), 245-248
- [4] Schabowski J., Benefits of using modern composite technologies in the design, construction and maintenance of safe road infrastructure, *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie*, 1(120) (2020), 45-59
- [5] Pracki P., Jägerbrand A., Application of road lighting energy efficiency evaluation system in practice, *Proceedings of the CIE Centenary Conference: Towards a New Century of Light*, CIE, Paris (2013)
- [6] Zajkowski M., The SOWA program for the modernization of road lighting in the commune, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91, 7 (2015), 85-88
- [7] Weźgowiec M., Popławski T., Kurkowski M., Forecasting energy consumption on lighting objectives in the years 2018-2030 in the aspect of resolving network of Polish progressive cities, *Rynek Energii*, 1(140) (2019)
- [8] Lobão J.A., Devezas T., Catalão J.P.S., Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation, *Energy Rep.* 1 (2015), 110-115
- [9] Campisi D., Gitto S., Morea D., Light Emitting Diodes Technology in Public Light System of the Municipality of Rome: An Economic and Financial Analysis. *Int. J. Energy Econ. Policy*, 7 (2017), 200-208
- [10] Sahu S., Reddy T.S., Auditing of Street Lighting System for Energy Efficiency Improvement, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 7, 4 (2018), 1189-1194
- [11] Sánchez-Balvás L.A., Felipe J.J., Quintero J.M., Fuente A., An energy efficiency-based classification approach for street lighting by considering operational factors: A case study of Barcelona, *Energy Effic.*, (2021), 14, 15
- [12] Act of 20 April 2021 amending the Energy Efficiency Act and certain other acts, Sejm of the Republic of Poland, Warsaw (2021)
- [13] Regulation of the Minister of Climate and Environment of 12 April 2022 amending the regulation on the detailed scope and method of preparing an energy efficiency audit and methods of calculating energy savings, Warsaw (2022)
- [14] PKN-CEN/TR 13201-1:2016-02 – Road lighting. Part 1: Guidelines for the selection of lighting classes. The standard includes lighting parameters that allow you to easily select the appropriate lighting class
- [15] PN-EN 13201-2:2016-03 – Road lighting. Part 2: Lighting requirements. It discusses the photometric requirements for individual lighting classes in accordance with the needs of roads and environmental conditions
- [16] PN-EN 13201-3:2016-03 – Road lighting. Part 3: Lighting calculations. It provides guidance on calculation methods and software that should be used when designing street lighting
- [17] PN-EN 13201-4:2016-03 – Road lighting. Part 4: Methods of measuring lighting parameters. Principles of taking measurements, as well as a description of the conditions in which they should be carried out
- [18] PN-EN 13201-5:2016-03 – Road lighting. Part 5: Energy efficiency indicators. The latest entry in street lighting standards. It discusses the minimum energy efficiency values of modern luminaires that should be used in road lighting systems

Authors: prof. dr hab. inż. Tomasz Popławski, Czestochowa University of Technology, Department of Electrical Engineering, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Czestochowa, E-mail: tomasz.poplawski@pcz.pl; dr inż. Marek Kurkowski, Czestochowa University of Technology, Department of Electrical Engineering, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Czestochowa, E-mail: marek.kurkowski@pcz.pl

Współpraca energoelektronicznego kompensatora MMC z piecem łukowym AC

Abstract. The article presents the use of a modular multilevel converter (MMC VSC) built of n single-phase PM power bridges, in which the cluing elements are IGBT transistors. By connecting them to three branches connected in a delta to the secondary circuit of the network transformer with parallel filters of higher harmonics, full and fast compensation of inductive and capacitive reactive components of the load current is obtained, while minimizing fluctuations of the voltage supplying the AC arc furnace transformer. Selected measurement results recorded in the AC arc furnace power supply system are also presented. (Cooperation of the modular multilevel converter with the AC arc furnace).

Streszczenie. Przedstawiono zastosowanie wielopoziomowego kompensatora MMC (ang. Modular Multilevel Converter VSC) zbudowanego z n jednofazowych mostków mocy PM, w których elementami kluczującymi są tranzystory IGBT. Poprzez włączenie ich do trzech gałęzi połączonych w trójkąt do obwodu wtórnego transformatora sieciowego wraz z równoległymi filtrami wyższych harmonicznych uzyskuje się pełną i szybką kompensację składowych biernych indukcyjnych i pojemnościowych prądu obciążenia przy jednoczesnej minimalizacji wahań napięcia zasilającego transformator pieca łukowego AC. Zaprezentowano także wybrane wyniki pomiarów zarejestrowane w układzie zasilania pieca łukowego AC.

Wstęp

Praca odbiorników energii elektrycznej o nieliniowych charakterystykach napięciowo-prądowych, zasilanych zarówno z publicznych, jak i z przemysłowych sieci elektroenergetycznych, może powodować szereg zaburzeń elektromagnetycznych, mających bezpośredni wpływ na degradację jakości energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców. Zasadnicze znaczenie z punktu widzenia jakości energii elektrycznej wykazuje praca odbiorników energii elektrycznej użytkowanych w przemyśle hutniczym, w tym w szczególności: pieców łukowych AC oraz pieców indukcyjnych wyposażonych w przekształtniki energoelektroniczne, generujących wyższe harmoniczne prądów i powodujących zaburzenia napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia PCC (ang. *point of common coupling*). Również istotnego znaczenia z punktu widzenia jakości energii elektrycznej nabiera stale rosnąca liczba przyłączanych do sieci elektroenergetycznej rozproszonych źródeł odnawialnej energii elektrycznej (turbiny wiatrowe, farmy wiatrowe, instalacje fotowoltaiczne), a także systemów magazynowania energii elektrycznej.

Znaczna część odbiorników energoelektronicznych, głównie napędów AC i DC, charakteryzuje się zdeterminowanymi widmami generowanych przez te odbiorniki wyższych harmonicznych prądów. Drugą grupę stanowią odbiorniki o bardzo dużych mocach jednostkowych i niespokojnym, wręcz stochastycznym, poborze mocy czynnej i biernej. Do tej grupy odbiorników zaliczają się piece łukowe prądu przemiennego AC. Moc pobierana przez piece łukowe z sieci elektroenergetycznej zależy w głównej mierze od masy i rodzaju wsadu, a także od zastosowanych metod kompensacji mocy biernej. W odniesieniu do parametrów sieci zasilającej wymagana jest odpowiednia wartość mocy zwarcia, niezbędna do zapewnienia prawidłowego i szybkiego procesu wytopu oraz utrzymania parametrów jakościowych energii elektrycznej, a zwłaszcza zawartości wyższych harmonicznych oraz wahań napięcia w zakresie wartości dopuszczalnych, zależnych przede wszystkim od wartości napięcia sieci, do której instalacja zasilająca piec łukowy została przyłączona [2, 3].

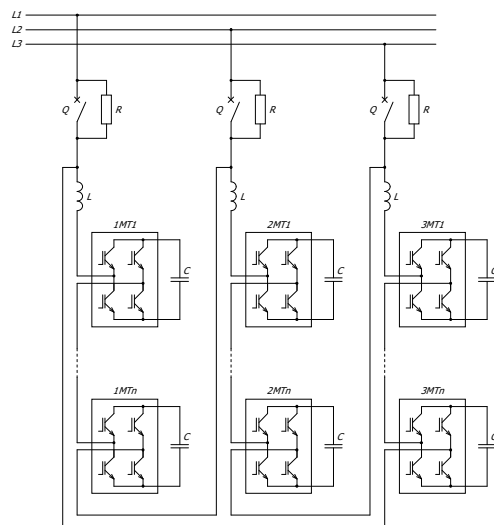
Do skutecznych metod ograniczenia negatywnych skutków pracy pieca łukowego zalicza się stosowanie: filtrów pasywnych L-C; filtrów pasywnych L-C wspomaganym pracą nadążnego kompensatora mocy biernej indukcyjnej TCR jako układu SVC; układów STATCOM [1-4].

Urządzenia te spełniają równocześnie rolę układu kompensacji mocy biernej dla częstotliwości podstawowej. Nieliniowa charakterystyka napięciowo-prądowa łuku powoduje powstawanie silnych harmonicznych napięcia i prądu w EAF. W tym celu stosowane są technologia elastycznych systemów do transmisji prądu przemiennego

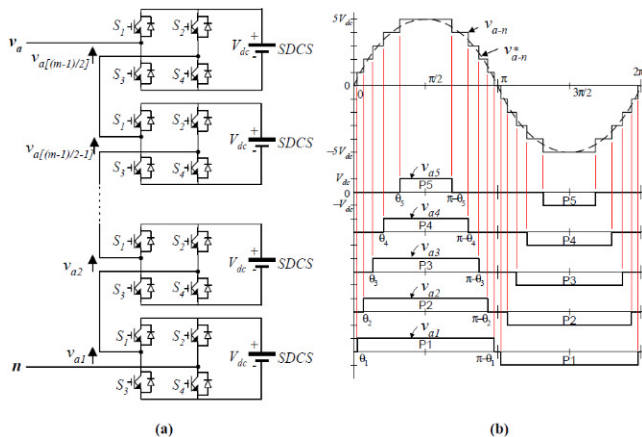
FACTS (ang. *Flexible AC Transmission System*) [1, 4], które ograniczają wahania napięcia oraz harmoniczne powodowane przez EAF. Najczęściej używanym urządzeniem FACTS w przypadku pieców łukowych jest kompensator SVC (ang. *Static Var Compensator*), który może zredukować wahania napięcia i harmoniczne do pewnego poziomu. Opóźnienia związane z pomiarem mocy biernej i zapłonami tyrystorów zmniejszają możliwości kompensacyjne SVC. Aby zapobiec tym opóźnieniom, można zastosować układy STATCOM (ang. *Static Synchronous Compensator*), pozwalające na uzyskanie współczynnika redukcji migotania światła P_{li} powyżej 5, a także skuteczne tłumienie wyższych harmonicznych.

Wielopoziomowe kompensatory MMC

Zasadniczym elementem filtra aktywnego SVG (STATCOM) jest jednofazowy moduł zbudowany z czterech łączników tranzystorowych IGBT o topologii połączeń typu H ($T1+T4$), obciążony baterią kondensatorów C. Sterowanie pracą tranzystorów mostka realizowane jest z wykorzystaniem metody PWM. Łącząc ze sobą n jednofazowych mostków mocy, w których elementami kluczującymi są tranzystory IGBT, uzyskuje się wielopoziomowy trójfazowy kompensator MMC (ang. *Modular Multilevel Converter VSC*), którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Natomiast na rysunku 2 pokazana została jednofazowa struktura 11-poziomowego inwertera kaskadowego wyposażonego w pięć mostków mocy ($s = 2$), co prowadzi do uzyskania jedenastu poziomów napięcia modulującego ($m = 2s+1$).



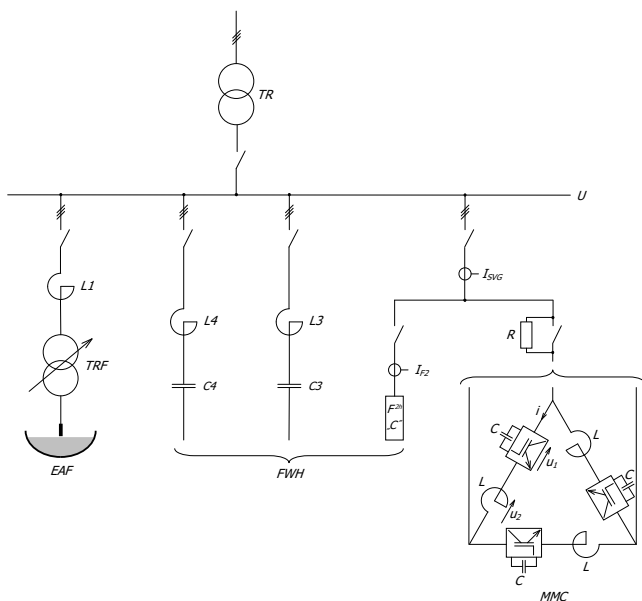
Rys. 1. Topologia połączeń układu MMC



Rys. 2. Jednofazowa struktura wielopoziomowego inwertera kaskadowego z mostkiem typu H: a) schemat obwodu; b) przebiegi i sposób przełączania 11-poziomowego inwertera kaskadowego [4, 5]

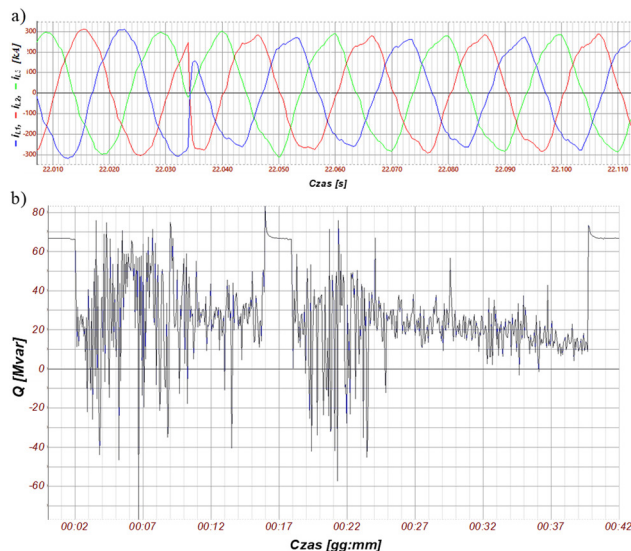
Współpraca układu MMC z piecem łukowym AC

Z uwagi na występowanie łuku elektrycznego o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej piec łukowy AC jest odbiornikiem silnie zakłócającym sieć zasilającą, poprzez generację harmonicznych prądów fazowych o szerokim spektrum widma. Dla takich odbiorów szczególnie zalecana jest współpraca z energoelektronicznymi układami MMC oraz pasywnymi filtrami wyższych harmonicznych FWH, co przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat instalacji pieca łukowego AC wraz z zespołem filtrów wyższych harmonicznych (FWH) oraz układem MMC

Na rysunku 4 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów zarejestrowane w układzie zasilania pieca łukowego AC z układem MMC.



Rys. 4. Wyniki pomiarów zarejestrowane w torze zasilania układu MMC: a) wartości chwilowe prądów; b) wartości mocy biernej w trakcie cyklu wytopu stali

Podsumowanie i wnioski

Wdrożenie układu SVG zapewniło skuteczną redukcję wahań napięcia: wartości wskaźnika P_{it} zmniejszyły się z poziomu 1,9-2,0 do 0,65, ograniczając jednocześnie stopień odkształcenia napięć w punkcie wspólnego przyłączenia wyrażany miarą wartości wskaźnika THD U z 1,2% do 0,7%, a także pozwoliło na sztywne utrzymanie napięcia na szynach SN rozdzielni oraz ograniczenie asymetrii napięć.

Adaptacyjna praca układu SVG poprzez bardzo szybką zmianę z charakteru pojemnościowego na indukcyjny powoduje utrzymanie wartości średniej miesięcznego współczynnika $\text{tg } \phi$ na poziomie 0,15.

LITERATURA

- [1] Jagiela K., Gala M., Rak J., Kepinski M., Szewczyk K., Analysis of Electric Energy Quality in Arc Furnace System with Follow-up SVC Compensation, 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation EPQU 2009, IEEE Conference Proceeding, 15-17 Sept. 2009, 1-5
- [2] Lange A., Pasko M., Wybrane metody poprawy jakości energii elektrycznej za pomocą układów LC, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015
- [3] Wciślik M., Metoda estymacji parametrów toru elektrycznego urządzenia łukowego dla potrzeb sterowania procesem elektrostalowniczym, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej Elektryka 1992, 28
- [4] Kashani M.G., Babaei S., Bhattacharya S., SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement, 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems 2013, p.7, DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785641
- [5] Tolbert L.M., Peng F.Z., Multilevel Converters as a Utility Interface for Renewable Energy Systems, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 15-20, 2000, Seattle, Washington, 1271-1274

Autorzy: dr inż. Marek Gala, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marek.gala@pcz.pl; dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, Częstochowski Oddział SEP, ul. Kopernika 16/18, 42-217 Częstochowa, E-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com

Kompensacja mocy biernej w wybranym zakładzie przemysłowym – studium przypadku

Streszczenie. Kompensacja mocy biernej jest działaniem, które może znacząco ograniczyć niekorzystne zjawiska związane z przesyłem energii elektrycznej oraz wpisuje się w obecny trend oszczędzania i racjonalizowania jej zużycia. W artykule przedstawiono wyniki analizy poboru energii biernej indukcyjnej w dwóch rozdzielniach przemysłowych. Przedstawiono analizę pod kątem wielkości poboru energii czynnej i biernej, jak również kosztów ponoszonych z tego tytułu opłat. W dalszej części przedstawiono analizę skuteczności działania układu kompensującego oraz ekonomiczną ocenę instalacji.

Abstract. Reactive power compensation is an action that can significantly reduce the unfavorable phenomena associated with the transmission of electricity and is part of the current trend of saving and rationalizing its consumption. The article presents the results of the analysis of inductive reactive energy consumption in two industrial facilities. An analysis is presented in terms of the amount of active and reactive energy consumption as well as the costs of fees incurred in this regard. The following section presents an analysis of the effectiveness of the compensation system and the economic assessment of the installation. (**Reactive power compensation in a selected industrial plant – a case study**)

Wstęp

W związku z aktualnymi wydarzeniami na świecie oraz dynamiczną sytuacją polityczną zagadnienia związane z optymalizacją kosztów energii elektrycznej stają się coraz bardziej istotne. Zakłady przemysłowe zmagają się obecnie z rosnącymi kosztami produkcji, dlatego zagadnienia kompensacji mocy biernej w zakładach przemysłowych nabierają znaczenia.

Poprawne zarządzanie mocą bierną w sieci zakładowej przynosi wymierne korzyści techniczne i ekonomiczne dla samego zakładu przemysłowego. Właściwe zbilansowanie mocy biernej zapewnia możliwość optymalizacji instalacji poprzez: redukcję przekrojów żył roboczych kabli, uniknięcie przewymiarowania urządzeń, redukcję spadku napięcia w sieci zakładowej, wzrost dostępnej mocy czynnej na skutek redukcji strat mocy w transformatorach i liniach zasilających, możliwość korzystania z aparatów na mniejsze prądy znamionowe, redukcję kosztów energii elektrycznej. Pomimo że zagadnieniem kompensacji mocy biernej poświęcono wiele miejsca w krajowej literaturze przedmiotowej [1-4], to należy stwierdzić, że zagadnienia te wymagają dalszej analizy i bieżącej aktualizacji. Kompensacja bowiem oprócz ograniczenia niekorzystnych zjawisk występujących w sieci przemysłowej wpisuje się w obecny trend efektywnego użytkowania energii elektrycznej oraz konieczności jej oszczędzania [5, 6].

Również w przypadku elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych zbyt duży przesył mocy biernej powoduje szereg niekorzystnych zjawisk, takich jak m.in. zwiększone spadki napięć w transformatorach i liniach zasilających, co generuje dla Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD) dodatkowe koszty. Zagadnienia te poruszono m.in. w pracach [7, 8]. Tematyka kompensacji mocy biernej jest również analizowana w doniesieniu do europejskich systemów przesyłowych [9, 10].

W artykule przedstawiono analizę techniczną oraz ekonomiczną dla dwóch instalacji kompensacji mocy biernej zainstalowanych na szynach rozdzielnic niskiego napięcia (określanych dalej jako A i B) badanego zakładu przemysłowego.

Koszty energii biernej

Obecne przepisy [11] regulują dopuszczalny pobór mocy biernej z systemu elektroenergetycznego poprzez wartość współczynnika $\text{tg } \varphi_0$. Dla większości odbiorców energii elektrycznej rozliczających się z ponadnormatywnego poboru nie może ona być większa niż 0,4. Przekroczenie tej wartości powoduje naliczenie dodatkowych opłat za pobór ponadnormatywnej energii biernej określonej w taryfie.

W celu zmniejszenia poboru mocy biernej indukcyjnej z systemu elektroenergetycznego stosuje się na ogół układy kompensacji mocy biernej, składające się z kilku stopni baterii kondensatorów załączanych/wyłączanych według odpowiedniego algorytmu regulatora. Należy dodać, iż obowiązujące rozporządzenia oraz taryfy opłat za energię OSD [11-13] obligują użytkowników końcowych do płacenia za ponadnormatywny pobór energii biernej, natomiast nie wymuszają stosowania układów powodujących zmniejszenie jej poboru.

Ponadumowny pobór energii biernej indukcyjnej przez użytkownika oznacza ilość energii biernej, która odpowiada: współczynnikowi mocy $\text{tg } \varphi$ wyższemu od umownego, stanowiącemu nadwyżkę energii biernej indukcyjnej [11]. Wysokość opłat za nadwyżkę energii biernej pobranej ponad ilość wynikającą ze współczynnika $\text{tg } \varphi_0$ w okresie rozliczeniowym wyznacza się zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad O_b = k \cdot C_{rk} \left(\sqrt{\frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{1 + \text{tg}^2 \varphi_0}} - 1 \right) A$$

gdzie: O_b – opłata za nadwyżkę energii biernej wyrażona w zł, k – wartość ustalana w taryfie (krotność ceny C_{rk}), C_{rk} – cena energii elektrycznej obowiązująca w dniu zatwierdzenia taryfy wyrażona w zł/MWh lub zł/kWh, $\text{tg } \varphi$ – współczynnik mocy wynikający z pobranej energii biernej, $\text{tg } \varphi_0$ – umowny współczynnik mocy, A – energia czynna pobrana całodobowo lub w strefie czasowej, w której jest prowadzona kontrola poboru energii biernej, wyrażona w MWh lub w kWh.

Analiza techniczna układu kompensacji mocy biernej

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów mocy czynnej i biernej, $\text{tg } \varphi$ oraz wybranych innych parametrów jakości energii elektrycznej na szynach rozdzielni niskiego napięcia dwóch niezależnych układów (zasilanych z różnych Głównych Punktów Zasilających) zakładu przemysłowego w południowej Polsce. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dobrano dwie baterie kondensatorów: dla rozdzielni A o mocy 325 kvar oraz dla rozdzielni B o mocy 725 kvar.

Analizę skuteczności zastosowanej kompensacji przeprowadzono na podstawie pomiarów weryfikacyjnych mocy biernej oraz $\text{tg } \varphi$ wykonanych po zainstalowaniu baterii kondensatorów w rozdzielni A i rozdzielni B analizowanego zakładu przemysłowego. W trakcie badań zweryfikowano poprawność doboru poszczególnych urządzeń i rozwiązań do panujących na obiekcie warunków zasilania oraz jakości energii w sieci zakładowej. Po analizie dotyczącej prac projektowych oceniono poprawność wykonania baterii kondensatorów. Oceny dokonano na podstawie oględzin

technicznych, jak również pomiarów termograficznych pracujących baterii.

Analiza ekonomiczna wdrożenia kompensacji mocy biernej

Głównym celem analizy ekonomicznej dotyczącej kompensacji mocy biernej w rozdzielni A oraz w rozdzielni B analizowanego zakładu jest ocena opłacalności inwestycji i efektywności energetycznej omawianych instalacji. Na podstawie faktur za energię z okresu przed kompensacją przeprowadzono analizę, która pozwoliła ocenić, czy inwestycja się zwróci oraz po jakim czasie.

Z punktu widzenia analizy ekonomicznej istotny jest całkowity koszt przedsięwzięcia, a więc kwota za wszystkie prace związane z realizacją inwestycji – projekt, prefabrykacja baterii kondensatorów, przebudowa pól rozdzielnic nN, wykonanie tras kablowych, pomiary, nadzór itd. Całkowite koszty I_0 poniesione w związku z realizacją omawianych baterii kondensatorów przedstawiono w tabeli 1. Biorąc pod uwagę miesięczne koszty energii indukcyjnej, których zakład przemysłowy nie musi już ponosić, oraz koszty inwestycji związane z instalacją baterii kondensatorów wraz z układami regulacji poniesionymi na początku pierwszego miesiąca, wartość bieżącą netto (NPV – Net Present Value) projektu można obliczyć jako [14]:

$$(2) \quad NPV = \sum_{t=1}^n CF_t / (1+r)^t - I_0$$

gdzie: CF_t – przepływy gotówkowe (netto) w okresach t eksploatacji inwestycji związane z miesięcznymi nieponiesionymi kosztami za ponadumowny pobór energii biernej, I_0 – koszt inwestycji poniesiony w pierwszym miesiącu analizy, r – roczna stopa dyskonta przyjęta do obliczeń na poziomie 20%.

Wskaźnik NPV pomaga ocenić ekonomiczną wykonalność, jak również efektywność projektu. Obliczono również okres zwrotu z inwestycji, który określa okres, jaki jest konieczny, aby nakłady poniesione na realizację określonego przedsięwzięcia inwestycyjnego zostały w pełni pokryte korzyściami netto wygenerowanymi przez tę inwestycję [14].

W tabeli 1 zestawiono wyniki analizy finansowej inwestycji instalacji kompensacji mocy biernej dla obu rozdzielni.

Tabela 1. Finansowa analiza zainstalowania kompensacji baterii mocy biernych w rozdzielniach A i B

Rozdzielnia	A	B
I_0 – całkowity koszt instalacji układu kompensacji mocy biernej netto [zł]	64 600	74 900
Moc zainstalowanych baterii kompensujących [kvar]	325	725
Liczba analizowanych okresów rozliczeniowych [miesiące]	24	24
NPV [zł]	9345	217 434
Czas zwrotu z inwestycji [miesiące]	~21	~6

Przeprowadzona analiza finansowa umożliwia sformułowanie wniosków dotyczących ekonomicznej zasadności zainstalowania baterii kondensatorów w konkretnych badanych przypadkach. Instalacja kompensacji mocy biernej zabudowana w rozdzielni A okazała się stosunkowo mało rentowna, ale uzasadniona z ekonomicznego punktu widzenia. Koszty poniesione na baterię kondensatorów 325 kvar zwrócą się w perspektywie około 21 miesięcy. Taki wynik jest rezultatem niekorzystnego stosunku poniesionych kosztów instalacji do uzyskanych oszczędności – opłaty za ponadnormatywny pobór energii biernej były stosunkowo nieduże. Instalacja kompensacji

mocy biernej w stacji rozdzielni B okazała się efektywna, a cała inwestycja powinna zwrócić się po ok. 6 miesiącach po uruchomieniu układu.

Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

- decyzja o instalacji układu kompensacji mocy biernej, jeżeli nie jest podyktowana wyłącznie względami technicznymi, powinna być poprzedzona analizą ekonomiczną,
- opłacalność instalacji baterii kondensatorów zależy w dużym stopniu od konkretnego przypadku oraz warunków technicznych panujących w miejscu przyłączania układu,
- częścią całkowitych kosztów układu kompensacji mocy biernej są koszty stałe wynikające z konieczności przeprowadzenia takich prac jak analiza parametrów sieci lub czynności projektowe. Stałe koszty wpływają niekorzystnie na rentowność inwestycji w układy kompensujące małych mocach znamionowych,
- można mówić o uproszczonej zależności, że im większa jest ilość mocy biernej do skompensowania w danym miejscu oraz, co za tym idzie, wyższe opłaty za energię, tym większa opłacalność inwestycji i korzystniejsza stopa zwrotu.

LITERATURA

- [1] Strzałka-Gołuszka K., Gołuszka M., Strzałka J., Aspekty techniczne i ekonomiczne kompensacji mocy biernej w obiektach użyteczności publicznej, Grupa Medium, Warszawa (2018)
- [2] Bielecki S., Skoczkowski T., Potrzeba zmian rozliczeń za moc bierną, *Rynek Energii*, 4 (2015), nr 119, 21-26
- [3] Bielecki S., Problematyka rozliczeń za użytkowanie mocy biernej, *Energetyka*, 11 (2015)
- [4] Ciura S., Opłaty dystrybucyjne związane z poborem mocy biernej przez odbiorców, *Energia Elektryczna*, 2 (2011)
- [5] Kornatka M., Efektywność kompensacji mocy biernej – studium przypadku, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12 (2022)
- [6] Fryc E., Kochel Z., Krakowiak J., Ziarno R., Możliwości poprawy efektywności wykorzystania energii elektrycznej czynnej i biernej, *Elektroenergetyka – współczesność i rozwój*, 1-2 (2012)
- [7] Bielecki S., Aspekty użytkowania i zarządzania mocą bierną w energetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2019)
- [8] Szpyra W., Wpływ mocy biernej na straty w sieci. Energetyczny równoważnik mocy biernej, IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Straty Energii Elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych”, Wisła, (2008), 59-69
- [9] ENTSO-E Overview of Transmission Tariffs in Europe: Synthesis 2020, (2022)
- [10] Kurkowski M., Popławski T., Mirowski J., Energia bierna a przepisy Unii Europejskiej, *Rynek Energii*, 111, (2014), 2
- [11] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 29 listopada 2022 r. w sprawie sposobu kształtowania i kalkulacji taryf oraz sposobu rozliczeń w obrocie energią elektryczną (Dz.U. 2022 poz. 2505)
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623 z późniejszymi zmianami)
- [13] Taryfa dla energii elektrycznej w zakresie dystrybucji energii elektrycznej TAURON Dystrybucja S.A. na rok 2023, TAURON Dystrybucja S.A., Kraków, (2023)
- [14] Małecki P., Rosiek K., Żaba-Nieroda R., Metody oceny projektów gospodarczych, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, Kraków (2019)

Autor: dr hab. inż. Mirosław Kornatka, prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: miroslaw.kornatka@pcz.pl

Analiza parametrów eksploatacyjnych opraw oświetleniowych LED ze źródłami bezsoczewkowymi – plastic free

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę pracy opraw oświetleniowych LED ze źródłami wyposażonymi w soczewki oraz bezsoczewkowe z odbłyśnikami aluminiowymi. Omówiono zagadnienia związane z żywotnością opraw LED.

Abstract. The article presents an analysis of the work of LED luminaires with sources equipped with lenses and lensless ones with aluminum reflectors. Issues related to the lifetime of LED luminaires were discussed. (Analysis of operating parameters of LED luminaires with lensless sources – plastic free).

Wstęp

Systemy optyczne opraw drogowych LED dzielą się na trzy podstawowe rodzaje. Pierwszy z nich to system ze zintegrowanymi soczewkami. Takie układy optyczne opraw LED charakteryzują się konkretnymi, ustalonymi kątami wiązki światła. Drugim rodzajem układów optycznych LED są systemy składające się z soczewek, dyfuzorów lub odbłyśników. Od kilku lat wdrażane są też układy optyczne z odbłyśnikami z posrebrzanego aluminium. Wyroby wykonywane z plastiku (również w oprawach oświetleniowych) są, jak powszechnie wiadomo, szkodliwe dla zdrowia. Najbardziej szkodliwy jest tu mikroplastik, który powstaje m.in. w procesach szlifowania soczewek. Mikroplastik to zbiorowisko drobnych cząsteczek tworzyw sztucznych, np. w formie włókien czy granulek. Wśród tych materiałów wyróżnić można polipropylen oraz politereftalan etylenu. Jego szkodliwe działanie na organizm może być dwójakie: ze względu na skład może mieć działanie toksyczne (polichlorek winylu, polistyrenu czy żywice epoksydowe). W skład plastiku wchodzi też różne plastyfikatory i substancje – np. metale ciężkie czy związki endokrynnie czynne. Innym niekorzystnym działaniem mikroplastiku jest to, że na jego powierzchni mogą się osadzać inne zanieczyszczenia. Materiał ten może więc przenosić do organizmu bakterie, grzyby i patogeny. Mikroplastik może też być nośnikiem dla substancji, które są zagrożeniem dla człowieka – np. polichlorowanych bifenyli, bisfenolu, pestycydów.

Oprawy LED

Projektowanie opraw oświetleniowych z diodami LED wymaga zastosowania układów wieloźródłowych ze względu na małą moc pojedynczych diod. Ilość światła wytwarzanego przez pojedynczą diodę jest zbyt mała dla celów oświetleniowych [1]. Pojedyncze diody łączone są w większe struktury, nazywane modułami LED. Poszczególne diody są łączone ze sobą równolegle, kolejne gałęzie szeregowo. Z uwagi na to, że oprawa oświetleniowa jest oprawą wieloźródłową, niezbędne jest zaprojektowanie wyjątkowo trudnego układu fotooptycznego dla matrycy modułu diodowego. Bryła fotometryczna oprawy oświetlenia ulicznego jest bardzo specyficzna – inna w kierunku wzdłuż jezdni i inna w poprzek, bez symetrii obrotowej. W oprawach oświetleniowych LED rozsyły światłości uzyskuje się na kilka sposobów [2-4]:

- poprzez równomierne rozłożenie diod, o tej samej bryle fotometrycznej, na płaskiej powierzchni i montuje się na każdej diodzie soczewki odpowiednio formujące bryłę fotometryczną;
- diody o takim samym rozsyśle montuje się na specjalnie wygiętej (liniowo lub skokowo) powierzchni i montuje się na lub wokół każdej z diod uformowane odbłyśniki (reflektory), które kształtują bryłę fotometryczną;

- diody o tym samym rozsyśle montuje się na płaskiej powierzchni pod różnym kątem (bardzo trudne uzyskanie dokładności montażu).

Przykład stosowanych w oprawach LED rozwiązań przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Matryca LED bez soczewek [5]

Stosowanie odbłyśnikowych układów optycznych z posrebrzanego, uszlachetnionego aluminium ma oprócz gwarantowanego utrzymania bryły fotometrycznej w czasie również kilka innych zalet [5]. Światło ukierunkowane przez precyzyjnie sformowany reflektor generuje bardziej równomierną wiązkę przy jednoczesnym ograniczeniu nieprzyjemnego oślnienia, tak charakterystycznego dla soczewek, które punktowo kierują światło. Również w przeciwieństwie do rozwiązań soczewkowych, źródło znajduje się kilka centymetrów w głębi układu optycznego, a nie przy samej powierzchni szyby klosza, dzięki czemu nie ma bezpośredniego widoku punktowego, silnego źródła LED, a jedynie stosunkowo duża powierzchnia całego modułu optycznego.

LITERATURA

- Pieniążek S., Drogowe oprawy oświetleniowe ze źródłami światła LED – postęp w efektywności i jakości oświetlenia, XXXV KNT Gdańskie Dni Elektryki' 2010
- Wiśniewski A., Źródła światła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2010)
- Wiśniewski A., Źródła światła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2010)
- Żagan W., Oprawy oświetleniowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2012)
- Materiały firmowe AEC Illuminazione Italy

Autorzy: dr inż. Marek Kurkowski, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marek.kurkowski@pcz.pl; prof. dr hab. inż. Tomasz Popławski, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: tomasz.poplawski@pcz.pl; mgr Tomasz Matkowski, BTH Technolight, ul. Czarnieckiego 32, 42-218 Częstochowa, E-mail: tomasz.matkowski@technolight.pl

REDAKCJA
Zdzisława Tasarz

REDAKCJA TECHNICZNA
Robert Świerczewski

e-ISBN 978-83-7193-940-2

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej
Częstochowa 2023