

Prace doktorantów

Politechniki Lubelskiej – 2020



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
ul. Nadbystrzycka 38A
20-618 Lublin

Prace doktorantów

Politechniki Lubelskiej – 2020

redakcja
Róża Dzierżak
Żaklin Marii Grądz



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2020

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko
prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik
prof. dr hab. inż. Oleksandra Hotra
dr hab. inż. Piotr Miller, prof. uczelni
dr hab. inż. Andrzej Kotyra, prof. uczelni
dr hab. inż. Arkadiusz Gola
dr inż. Wojciech Cel
dr inż. Wojciech Surtel
dr inż. Mariusz Kłonica
dr inż. Oksana Boyko

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-431-8

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Spis treści

Ewelina Krawczak

Dynamiczny rozwój instalacji fotowoltaicznych w Polsce7

Jacek Ogrodniczek

Analiza statystyczna wyników pomiarów wytrzymałości wybranych połączeń adhezyjnych.....23

Jakub Gęca

Instalacja fotowoltaiczna zintegrowana z systemem ładowania pojazdów elektrycznych – studium przypadku41

Michał Rogala, Jakub Paśnik

Badanie wpływu układu warstw w kompozycie FRP na postać wyboczenia55

Karol Sidor

Poprawa efektywności energetycznej poprzez optymalną konfigurację sieci SN68

Magdalena Michalska

Systemy diagnostyki czerniaka oparte o selekcję cech86

Michał Lech

Analiza porównawcza zastosowania SF6 oraz próżni w nowoczesnej aparaturze łączeniowej SN100

Monika Mańko

Wykorzystanie właściwości elektrycznych tkanek w pomiarach biomedycznych metodą impedancji bioelektrycznej109

Piotr Wójcicki

Wybrane zagadnienia metod optycznego rozpoznawania znaków122

Piotr Hołyszko

Sterowanie zwrotnic trolejbusowej sieci trakcyjnej oparte o funkcjonalną generację indywidualnych kodów pojazdów135

Sławomir Durak

Bezprzerwowe zasilanie odbiorców z mobilnej stacji transformatorowej SN/nN współpracującej z agregatem prądotwórczym 149

Łukasz Furgala, Bartłomiej Skowronek

Symulacja działania algorytmów genetycznych obciążonych chorobami genetycznymi160

Dynamiczny rozwój instalacji fotowoltaicznych w Polsce

Streszczenie: *Nieustanny wzrost konsumpcji energii wraz z koniecznością ochrony przed zmianami klimatu zmusza naukowców i rządy na całym świecie do poszukiwania rozwiązań dotyczących produkcji czystej energii. Polska, podobnie jak inni członkowie Unii Europejskiej, powinna zwiększyć udział energii z odnawialnych źródeł. Z tego powodu, w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój rynku fotowoltaicznego w Polsce. Artykuł przedstawia dyskusję dotyczącą tego rozwoju wraz z warunkami klimatycznymi i podstawami legislacyjnymi.*

Słowa kluczowe: instalacje fotowoltaiczne, instalacje PV, rynek fotowoltaiczny, rozwój PV

Dynamic development of photovoltaic installations in Poland

Abstract: *Continuously rising energy consumption together with the necessity of climate changes prevention force scientists and governments of all over the World to look for solutions to clean energy production. Poland, similarly to many other members of European Union, should increase the share of energy from renewable sources. For this reason, a dynamically growing photovoltaic market has been observed in Poland for only few years. The paper discusses this development together with climate conditions and legislation backgrounds.*

Keywords: photovoltaic installation, PV installation, photovoltaic market, PV development

1. Wstęp

Obecnie świat rozwija się bardzo dynamicznie. Ciągły rozwój w każdej dziedzinie przemysłu pociąga za sobą zwiększające się zapotrzebowanie na energię elektryczną. Każdego roku w Polsce zużywane jest coraz więcej energii ustanawiając tym samym nowe rekordy. Energia elektryczna zużywana jest przede wszystkim na grzanie i chłodzenie pomieszczeń w domach prywatnych, biurach oraz wielkopowierzchniowych obiektach handlowych. Jednakże ten trend nie występuje jedynie na terenie Polski. Jest on dostrzegalny na całym świecie. W 2019 roku zanotowano znaczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, największy w ostatnim dwudziestoleciu, wynoszący 3,7% [1]. Bardzo duże zapotrzebowanie na energię elektryczną od kilku lat zauważane jest w sezonie letnim z uwagi na konieczność klimatyzowania pomieszczeń w celu

*e.krawczak@pollub.pl, Katedra Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska

utrzymania komfortu cieplnego osób w nich przebywających. Postępujące zmiany klimatu powodują coraz to wyższe średnie temperatury dobowe, czy też sezonowe [2]. Wytwarzanie energii elektrycznej, z paliw kopalnych, tj. węgla, ropy naftowej czy gazu ziemnego prowadzi do uwalniania do atmosfery znacznych ilości gazów cieplarnianych (ang. *greenhouse gases*; *GHG*). Spalanie paliw kopalnych jest wciąż najbardziej popularnym sposobem produkcji energii w Polsce. Ma on jednak negatywny wpływ na jakość powietrza oraz środowiska naturalnego. Wśród gazów emitowanych do atmosfery możemy wyróżnić ditlenek węgla (CO_2), ditlenek siarki (SO_2), tlenki azotu (NO_x) czy też pył całkowity. Obecnie paliwa kopalne są głównym substratem nie tylko do produkcji energii, ale również w przemyśle transportowym. Odpowiadają one za około 75% antropogenicznej emisji ditlenku węgla do atmosfery [3]. Pomimo iż, emisja gazów cieplarnianych jest znacząca to w 2019 roku zaobserwowano wzrost emisji jedynie o 0,5% w stosunku do roku poprzedniego. Jest to wartość mniejsza niż średnia ostatniego dziesięciolecia. Było to spowodowane zastąpieniem w tzw. miksie energetycznym węgla przez gaz ziemny oraz wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (OZE). Warto wspomnieć, iż rok 2018 był okresem, w którym nastąpił znaczny (2,1%) wzrost emisji GHG [1]. Jak określił Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (ang. *The Intergovernmental Panel on Climate Change*; IPCC) do 2050 roku gospodarka Unii Europejskiej powinna stać się CO_2 neutralna. Zakłada to redukcję emisji szkodliwych gazów do atmosfery do poziomu praktycznie zerowego oraz zbilansowaną gospodarkę emisjami. Realizacja takiego planu powinna opierać się na wspólnych działaniach krajów członkowskich UE związanych z poprawą efektywności energetycznej, przemysłem, transportem oraz systemami produkcyjnymi o obiegach zamkniętych. Dodatkowo ważnym aspektem jest wychwytywanie i składowanie ditlenku węgla, np. przy pomocy sekwestracji [4]. Coraz więcej pojawia się badań naukowców z całego Świata dotyczących polityki w zakresie zmian klimatycznych oraz produkcji energii z paliw kopalnych [5–7]. Głównym celem społeczeństwa powinno stać się zmniejszenie spalania paliw kopalnych. Od wielu lat, rządy wielu krajów starają się osiągnąć ten cel poprzez promowanie efektywności energetycznej, technologii niskoemisyjnych, wprowadzania opłat za nadmierną emisję ditlenku węgla oraz innych środków mających na celu zmniejszenie popytu na paliwa kopalne. Wdrażanie zielonych, czystych technologii przyczynia się do zrównoważonego rozwoju, który stanowi o bezpieczeństwie energetycznym podmiotów realizujących ten projekt. Należy pamiętać, iż paliwa kopalne uznawane są za nieodnawialne źródła energii i ich nadmierna eksploatacja może przyczynić się do całkowitego ich wykorzystania w bardzo krótkim okresie czasu. Ochrona dostępnych, nieodnawialnych źródeł i ich zrównoważone wykorzystanie, a z drugiej strony znalezienie wydajnego źródła energii elektrycznej jest bardzo ważne. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii jako „surowca” do produkcji energii elektrycznej może stanowić rozwiązanie dla wspomnianych powyżej problemów, z którymi przyszło się

zмагаć obecnym pokoleniom. Wśród źródeł odnawialnych na uwagę zasługuje fotowoltaika, która daje możliwość nieemisyjnej produkcji energii elektrycznej z energii słonecznej. To właśnie fotowoltaika została uznana za jeden z filarów planu dekarbonizacji dostaw energii w Unii Europejskiej, a jej rola została podkreślona w dokumencie Komisji Europejskiej „*A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*” z 28 listopada 2018 roku [8]. Coraz to większe wykorzystanie fotowoltaiki na Świecie związane jest przede wszystkim z licznymi dofinansowaniami zarówno dla prosumentów, jak i dla przedsiębiorców. Nie bez znaczenia są również dokumenty legislacyjne wspierające udział odnawialnych źródeł energii (OZE) do produkcji energii elektrycznej. Wśród nich najważniejszym dokumentem regulującym wykorzystanie OZE jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych na obszarze Unii Europejskiej (UE) [9]. W Polsce jednym z najważniejszych dokumentów jest Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii z późniejszymi zmianami (Dz. U. 2015 poz. 478) [10]. Dokument ten nie tylko definiuje podstawowe pojęcia w zakresie odnawialnych źródeł energii, takie jak biogaz, biomasa, magazyn energii czy też mikroinstalacja, ale również określa zasady i warunki wykonywania działalności dotyczące wytwarzania energii elektrycznej z energii słonecznej czy też biogazu rolniczego. Warto również wspomnieć o Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE, która określa udział energii wyprodukowanej z odnawialnych źródeł energii w energii końcowej w 2020 roku.

Wspomniane powyżej czynniki przyczyniają się do zwiększonego zainteresowania naukowców tematyką związaną z odnawialnymi źródłami energii, oraz do prowadzenia badań naukowych mających na celu doskonalenie technologii fotowoltaicznych, systemów fotowoltaicznych oraz nowych sposobów na wykorzystanie fotowoltaiki, np. w budownictwie jako elementów zintegrowanych z fasadami budynków.

2. Uwarunkowania helioenergetyczne Polski

Możliwości wykorzystania energii słonecznej zależą od wartości nasłonecznienia i uśłonecznienia na danym obszarze. Ważna jest również zmienność napromieniowania w poszczególnych latach. Ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni kuli ziemskiej różni się w zależności od szerokości geograficznej. Współrzędne geograficzne Polski wynoszą 14°07' E – 24°09' E oraz 49°00' N – 54°50' N. W Polsce istnieją dobre warunki do wykorzystania energii słonecznej przy dostosowaniu typu systemów i właściwości urządzeń

wykorzystujących tę energię. Zasoby słoneczne Polski są dobre, w miesiącach letnich, tj. kwiecień – wrzesień czas operacji słonecznych wynosi 16 h/d i to właśnie na ten okres przypada 80% całkowitej sumy nasłonecznienia w ciągu roku. Natomiast w pozostałych miesiącach, październik – marzec, czas operacji słonecznych zmniejsza się do 8 h/d. Usłonecznienie w Polsce osiąga różne wartości w zależności od regionu Polski. Wartość nasłonecznienia dla Polski waha się w zakresie 950 – 1250 kWh/m²/rok. Warunki nasłonecznienia można przyrównać do krajów znajdujących się na podobnej szerokości geograficznej. Średnie usłonecznienie Polski wynosi 1600 h/a. W okresie wiosenno – letnim warunki atmosferyczne na terytorium Polski są zbliżone do Niemiec, środkowej i północnej Francji oraz są o wiele korzystniejsze niż w Wielkiej Brytanii czy też w krajach Skandynawskich. Promieniowanie słoneczne docierające na obszar Polski charakteryzuje się dużym udziałem promieniowania dyfuzyjnego. Średnio w skali rocznej około 45–50% energii docierającej do powierzchni Ziemi w Warszawie to promieniowanie dyfuzyjne, w okresie zimowym, od listopada do lutego waha się od 70–80%.

W Polsce według klasyfikacji Koeppen–Geiger [11] można wyróżnić dwie strefy: Cfb (ang. *Temperate oceanic climate*) oraz Dfb (ang. *Warm-summer humid continental climate*). Pierwsza strefa charakteryzuje się ciepłym, umiarkowanym, wilgotnym klimatem z najcieplejszym miesiącem o średniej temperaturze poniżej 22°C. Klimat Dfb występujący w rejonach górskich, na wschodzie i południowym-wschodzie z kolei jest określany jako wilgotny z opadami śniegu. W Polsce zimy są mroźne, bardzo często z temperaturami poniżej zera oraz z opadami śniegu. Z kolei pogoda późnym latem i jesienią kształtowana jest przez suche, subtropikalne, kontynentalne masy powietrza. W Polsce występują cztery pory roku z pełnym zakresem temperatur. Temperatura zimą waha się od -6° C do 0°C, a średnia temperatura latem wynosi 11°C ÷ 23°C. Ze względu na prawdopodobne zmiany klimatyczne temperatura w czerwcu 2019 roku była wyższa o 5,4°C od średniej z lat 1981–2010.

3. Rynek fotowoltaiczny w Polsce

Rynek fotowoltaiki w Polsce jest stosunkowo młody. Na podstawie danych Instytutu Energetyki Odnawialnej (IEO) [12] szacuje się, że w 2003 roku łączna zainstalowana moc w fotowoltaice wynosiła 0,1 MWp. Z każdym kolejnym rokiem odnotowywany był przyrost zainstalowanej mocy, w 2010 roku było to 1,1 MW. Na początku przeważały inwestycje czynione przez przedsiębiorstwa, bardzo mały odsetek stanowili inwestorzy prywatni [13]. Pierwsza farma fotowoltaiczna powstała w Polsce w 2011 roku pod Tarnowem, na terenie gminy Wierzchosławice, w województwie małopolskim. Farma posiada zainstalowaną moc 1 MWp i zbudowana jest z 4 445 modułów fotowoltaicznych. Budowa farmy rozpoczęła się w czerwcu 2011 roku, a zakończyła we wrześniu tego samego roku.

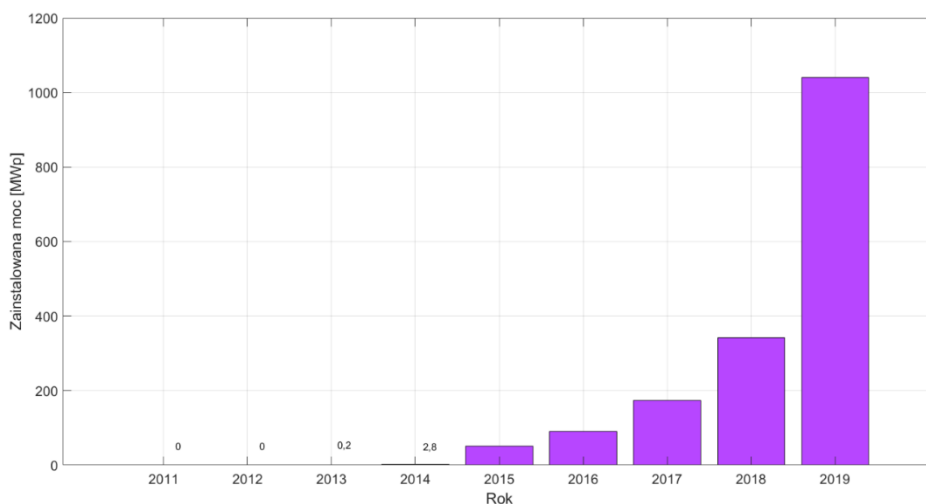
Energia wyprodukowana przez farmę jest bezpośrednio kierowana do sieci przesyłowej [14]. Była to pierwsza, tak duża, pionierska inwestycja w fotowoltaikę w Polsce. W pierwszym roku pracy, uzysk energetyczny z farmy wyniósł 1000 MWh. Wartość ta była większa od planowej średniej wartości produkcji określonej na poziomie 850–950 MWh. Kolejną dużą inwestycją na terenie Polski była elektrownia fotowoltaiczna w Rudzie Śląskiej, województwo śląskie. Instalację o łącznej powierzchni pola modułów fotowoltaicznych ponad 2 000 m² zlokalizowano na dachu zbiornika wody pitnej. Elektrownia PV składa się z 1 296 sztuk modułów monokrystalicznych o łącznej zainstalowanej mocy 311 kWp. Inwestycja ta była również bardzo istotna z punktu widzenia ekologicznego czyli redukcji emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Województwo śląskie posiada stosunkowo małą powierzchnię jednak jest ono silnie zurbanizowane. Głównymi przyczynami złego stanu powietrza w tym województwie jest emisja z indywidualnych gospodarstw domowych (ok. 55%), emisja przemysłowa i emisja z transportu [15]. Zastosowanie elektrowni fotowoltaicznej pozwoliło na redukcję emisji ditlenku węgla o 222 tony rocznie oraz pozostałych gazów cieplarnianych. Jeżeli chodzi o indywidualne instalacje, na koniec roku 2013 w Polsce było zainstalowane 1,75 MWp mocy w kilkunastu mikroinstalacjach [16]. W listopadzie 2014 roku została otworzona kolejna farma fotowoltaiczna, tym razem w województwie lubelskim, w miejscowości Bordziłówka. Instalacja wykonana jest z modułów polikrystalicznych ułożonych wertykalnie o całkowitej zainstalowanej mocy 1,4 MWp. Produkowana energia elektryczna przesyłana jest do sieci elektroenergetycznej. Wielkość instalacji została tak dobrana, aby wytwarzana energia mogła pokryć roczne zapotrzebowanie energetyczne na cele publiczne gmin wchodzących w skład „Energia Dolina Zielawy” [17]. Farma ta powstała z inicjatywy pięciu sąsiadujących gmin, które utworzyły porozumienie „Energia Dolina Zielawy” w celu wspólnej inwestycji w źródła odnawialne. Na Rys. 1. przedstawiona jest farma fotowoltaiczna w Dolinie Zielawy.

Po dwóch latach budowy, w 2015 roku do użytku został oddany kompleks farm fotowoltaicznych „Podlasie SOLAR PARK”. Całkowita, łączna moc to 3,85 MWp, która zainstalowana jest na czterech farmach w miejscowościach Lipsk, Jedwabne, Kolno oraz Zagroby Zakrzewo (województwo podlaskie). Wśród wyżej wymienionych największą moc posiada farma w Kolnie (1,8 MWp).



Rys. 1. Farma fotowoltaiczna w Dolinie Zielawy, gmina Bordziłówka; źródło własne

Rynek mikroinstalacji w Polsce zaczął rozwijać się w 2013 roku, gdzie zostało zainstalowane 0,2 MWp. Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie o odnawialnych źródłach energii [10] mikroinstalacja jest to każda instalacja OZE, której łączna zainstalowana moc jest nie większa niż 50 kW i która przyłączona jest do sieci przesyłowej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV. Wejście wyżej wspomnianej ustawy w życie spowodowało znaczny przyrost zainstalowanej mocy. Było to związane z wprowadzeniem pojęcia „prosument” i uruchomieniem programu wsparcia finansowego dla inwestorów w sektorze energetyki słonecznej. W 2015 roku moc zainstalowana w fotowoltaice w mikroinstalacjach wynosiła już 50,7 MWp, co oznacza, że nastąpił prawie dwudziestokrotny wzrost w stosunku do roku poprzedniego (2,8 MWp). Na Rys. 2. przedstawiono łączną zainstalowaną moc w sektorze mikroinstalacji na przestrzeni lat 2011–2019.



Rys. 2. Zainstalowana moc w sektorze mikroinstalacji w latach 2011–2019 [18]

Największe zainteresowanie mikroinstalacjami nastąpiło w 2019 roku, wtedy też zostały przyłączone instalacje o łącznej mocy 1,05 GWp. Biorąc pod uwagę również małe i duże systemy fotowoltaiczne całkowita moc przyłączona do sieci w 2019 roku wyniosła 1,29 GWp. Moc ta została podłączona w 105 953 instalacjach, wśród nich najwięcej, ponieważ aż 41 792 mikroinstalacji zostało przyłączonych w grupie PGE, co stanowi 38,9%. Drugim w kolejności operatorem sieci dystrybucyjnej (OSD) jest Tauron – 30 435 przyłączonych mikroinstalacji (29,6%), a następnie Energa – 17 820 (16,6%). Najmniej instalacji zostało podłączonych do OSD Innogy (1,4%) [18]. Wy tłumaczeniem tego, może być fakt iż grupa Innogy działa przede wszystkim na terenie Warszawy, stolicy Polski. Pomimo iż jest to największe miasto w Polsce pod względem zarówno powierzchni, jak i ludności to z jednej strony cechuje się ono powojenną zabudową, z drugiej strony występuje również bardzo gęsta, nowoczesna zabudowa wielorodzinna z licznymi wysokimi biurowcami. Taka architektura nie sprzyja budowaniu instalacji fotowoltaicznych. Pomimo, iż rok 2019 dla fotowoltaiki był rokiem przełomowym, to już wiadomo, że bieżący rok 2020 będzie również rekordowy. Jak podaje Instytut Energetyki Odnawialnej [19], w maju 2020 zainstalowano łącznie 1,95 GWp mocy za pomocą instalacji i systemów fotowoltaicznych. W dalszym ciągu wśród systemów PV prym wiodą mikroinstalacje, w które inwestują zarówno prosumenci indywidualni jak i biznesowi. W czerwcu 2019 roku została wprowadzona nowelizacja ustawy o OZE, która rozszerzyła definicję „prosumenta energii odnawialnej”. Do tej pory prosumentem mogła być osoba fizyczna, która była producentem i konsumentem energii elektrycznej jednocześnie. Uaktualnienie tej definicji pozwoliło, aby

prosumentem był również przedsiębiorca. Warunkiem koniecznym jest, aby uzysk energetyczny był wykorzystywany na własne potrzeby lub odsprzedawany, jednak sprzedaż energii elektrycznej nie może stanowić podstawy działania gospodarczego przedsiębiorcy. Zmiana ta stworzyła niebywałą szansę na inwestowanie w odnawialne źródła energii nie tylko osobom prywatnym, ale również przedsiębiorcom. Bycie prosumentem pozwala na korzystanie z uproszczonego systemu rozliczania energii. Dodatkowo na przełomie 2018–2019 został uruchomiony system aukcyjny (dotyczący dużych instalacji PV), programów wsparcia finansowego, m.in. „Mój Prąd”, a także dotacji unijnych. Powiązać to można niewątpliwie z rosnącym zainteresowaniem i przyrostem mocy przyłączeniowej na przełomie 2019 oraz 2020 roku. Z uwagi na bardzo duży przyrost mocy, w 2019 roku Polska osiągnęła 5 miejsce wśród krajów europejskich – polski rynek fotowoltaiczny pomimo iż jest bardzo mały, to prężnie się rozwija. Instytut Energetyki Odnawialnej szacuje, iż przy utrzymaniu obecnego tempa rozwoju, na koniec roku 2020 Polska może uzyskać wynik ok. 2,5 GW mocy przyłączeniowej. Ponadto szacuje się, że do 2025 roku Polska może osiągnąć poziom 7,8 GWp łącznej zainstalowanej mocy w fotowoltaice. Taki wynik pozwoliłby spełnić założenia Krajowego Planu na rzecz Energii i Klimatu do 2030 r. Pomimo iż, w obecnej sytuacji, inwestycje czynione są przede wszystkim w sektorze mikro i małych instalacji, to już w kolejnych latach (2021–2022) można spodziewać się wielu instalacji naziemnych elektrowni fotowoltaicznych. Z uwagi na obowiązujący system aukcji na energię wyprodukowaną z odnawialnych źródeł energii, wiele nowych instalacji fotowoltaicznych o mocy powyżej oraz poniżej 1 MW zostało już zakontraktowanych.

4. Polskie zaplecze naukowe

Uwaga naukowców na całym świecie skupiona jest na rozwoju fotowoltaiki w każdym możliwym aspekcie, począwszy od aspektu technologicznego, skończywszy na poprawie wydajności dużych systemów fotowoltaicznych. Wiele polskich naukowców koncentruje się na analizie pracy instalacji i systemów fotowoltaicznych. W pracy Woroniak et al. [20] przedstawiono kompleksową analizę uzysków energetycznych, ekologiczną i ekonomiczną systemu fotowoltaicznego w Parku Wodnym w Ełku, województwo warmińsko-mazurskie. Cztery pojedyncze instalacje fotowoltaiczne składające się łącznie z 264 sztuk modułów fotowoltaicznych tworzą system odnawialnych źródeł energii. Instalacje zostały umieszczone na stalowych konstrukcjach tworząc tym samym elementy zacieniające parking przed Parkiem. Z przeprowadzonych analiz, jak również z realnych pomiarów wynika, iż użycie systemów wykorzystujących energię słoneczną do produkcji energii elektryczną jest uzasadnione i sprawdza się znakomicie w tego typu ośrodkach. Dodatkowo

inwestycja ta podniosła świadomość społeczną i pokazała nowe możliwości wykorzystanie OZE na obiektach użyteczności publicznej z wykorzystaniem wolnostojących instalacji fotowoltaicznych. Grupa naukowa Knutel et al. [21] badała efektywność ekonomiczną instalacji fotowoltaicznych sieciowych oraz z magazynem energii dla studium przypadku zlokalizowanego w Polsce. Analizy pokazały, iż najlepszym rozwiązaniem z punktu widzenia ekonomicznego jest stosowanie rozwiązań bez wodorowego magazynu energii. Wykorzystanie magazynu energii jednak mogłoby rozwiązać problem nierównomierności dostaw energii elektrycznej oraz zapewnić zasilanie gospodarstw domowych podczas zwiększonych poborów energii w okresie letnim. Prowadzone są również badania dotyczące technicznych aspektów działania instalacji fotowoltaicznych. Systemy PV narażone są na szkodliwe działanie warunków zewnętrznych, w tym m.in. oddziaływanie kurzu. W pracy [22] zbadano wpływ cząstek kurzu osadzających się na powierzchni modułów na ilość energii produkowanej. Badania potwierdziły negatywny wpływ kurzu na wydajność pracującej instalacji w Gdańsku. Badania wykazały liniową zależność pomiędzy grubością osadzonej warstwy zanieczyszczeń, a spadkiem ilości produkowanej energii elektrycznej. Brano pod uwagę również kąt nachylenia modułów fotowoltaicznych oraz naturalne sposoby czyszczenia powierzchni modułów, takie jak opady deszczu czy też oddziaływanie wiatru.

5. Podsumowanie

Rynek fotowoltaiki w Polsce, mimo iż jest młody to bardzo prężnie się rozwija. Obecnie Polska zajmuje piąte miejsce wśród krajów Unii Europejskiej pod względem nowych mocy przyłączeniowych. Polska zaczyna powoli wykorzystywać swój ogromny potencjał, który posiada z uwagi na bardzo korzystne położenie geograficzne i sprzyjające warunki helioenergetyczne. Przy utrzymaniu obecnych trendów oraz finansowych systemów wsparcia Polska ma szansę dalej tak prężnie się rozwijać utrzymując wysoką pozycję wśród krajów europejskich. Jednakże dzięki inwestycjom w czystą energię można zaobserwować również znaczącą redukcję emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, dzięki czemu społeczeństwo jest w stanie przeciwdziałać postępującym zmianom klimatu. Zielona energia przyczynia się zarówno do lokalnej, jak i globalnej poprawy jakości środowiska naturalnego oraz zmniejszonego wykorzystania paliw kopalnych. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, a w szczególności fotowoltaiki wydaje się być idealnym rozwiązaniem zarówno problemu związanego z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, jak i problemów ekologicznych.

Literatura

- [1] Raport: *BP Statistical Review of World Energy*, 2020.
- [2] Ruiz I., Faria S. H., Neumann M. B., *Climate change perception: Driving forces and their interactions*, *Environmental Science & Policy* 108, 112–120, 2020.
- [3] Raport: *An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, 2019.
- [4] Qi H., Zhao Y., Zhao X., Yang T., Dang Q., Wu J., Lv P., Wang H., Wei Z., *Effect of manganese dioxide on the formation of humin during different agricultural organic wastes compostable environments: It is meaningful carbon sequestration*, *Bioresource Technology* 299:122596, 2020.
- [5] Eichner T., Pethig R., *Self-enforcing environmental agreements and trade in fossil energy deposits*, *Journal of Environmental Economics and Management* 85, 1–20, 2017.
- [6] Day C., Day G., *Climate change, fossil fuel prices and depletion: The rationale for a falling export tax*, *Economic Modelling* 63, 153–160, 2017.
- [7] Zeppini P., van den Bergh J. C. J. M., *Global competition dynamics of fossil fuels and renewable energy under climate policies and peak oil: A behavioural model*, *Energy Policy* 136, 110907, 2020.
- [8] Raport: *A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*, Brussels, 2018.
- [9] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE (Dz.U. L 140 z 5.6.2009)*.
- [10] *Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. (Dz. U. 2015 poz. 478)*
- [11] Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A., *Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification*, *Hydrology and Earth System Sciences* 11(5), 1633–1644, 2007.
- [12] <https://ieo.pl/pl/>, dostęp: 10 czerwca 2020.
- [13] Bolesta J., *Fotowoltaika – sektor w latach 2013–2014*, *Czysta Energia* 10, 2014.
- [14] Wasa M., *Pierwsza w Polsce farma PV o mocy 1 MW*, *Magazyn Fotowoltaika* 3(1), 2011.
- [15] Dziubanek G., Spychała A., Marchwińska-Wyrwał E., Rusin M., Hajok I., Ćwieląg-Drabek M., Piekut A., *Long-term exposure to urban air*

- pollution and the relationship with life expectancy in cohort of 3.5 million people in Silesia*, Science of The Total Environment 580, 1–8, 2017.
- [16] <http://www.ure.gov.pl>, (dostęp 12 czerwca 2020).
 - [17] Zdyb A., Gulkowski S., *Performance Assessment of Four Different Photovoltaic Technologies in Poland*, Energies 13(1), 196, 2020.
 - [18] Raport: Rynek Mikroinstalacji Fotowoltaicznych – Polska 2019, Stowarzyszenie Branży Fotowoltaicznej, 2020.
 - [19] Raport: Rynek fotowoltaiki w Polsce 2020, Instytut Energetyki Odnawialnej, 2020.
 - [20] Piotrowska–Woroniak J., Woroniak G., Załuska W., *Energy production from PV and carbon reduction in great lakes region of Masuria Poland: A case study of water park in Elk*, Renewable Energy 83, 1315–1325, 2015.
 - [21] Knutel B., Pierzyńska A., Dębowski M., Bukowski P., Dyjakon A., *Assessment of Energy Storage from Photovoltaic Installations in Poland Using Batteries or Hydrogen*, Energies 13(15), 4023, 2020.
 - [22] Klugmann-Radziemska E., *Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland*, Renewable Energy 78, 418–426, 2015.

Analiza statystyczna wyników pomiarów wytrzymałości wybranych połączeń adhezyjnych

Streszczenie: Rozdział przedstawia analizę statystyczną wyników badania wytrzymałościowego połączeń klejowych wykorzystujących połączenia doczołowe, zakładkowe i nakładkowe. Materiałem łączonym była stal konstrukcyjna S235JR. Masę klejową stanowił klej dwuskładnikowy K2 Metal Bond oparty na żywicy epoksydowej. Każdy rodzaj połączenia klejowego składał się z 5 próbek poddanych badaniu. Do obliczeń statystycznych posłużono się programem Statistica oraz wykorzystano testy statystyczne Shapiro-Wilka i t-studenta.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, wytrzymałość, statystyka

Statistical analysis of strength measurements results of selected adhesive joints

Abstract: The chapter presents statistical analysis of the results of strength tests of adhesive joints: butt joints, single lap joints and single strap joints. The material to be connected in the study was S235JR structural steel. To combine materials a 2-component adhesive K2 Metal Bond based on epoxy resin was used. Each type of adhesive connection consisted of 5 samples subject to tests. The program Statistica which uses Shapiro-Wilk and t-student tests was used for statistical calculations.

Keywords: adhesive joints, strength, statistics

1. Wprowadzenie

Wykorzystanie połączeń klejowych obecnie znajduje szerokie zastosowanie zarówno w przemyśle, jak i podczas napraw doraźnych w gospodarstwie domowym. W wielu przypadkach klejenie, jako sposób łączenia elementów, jest korzystne ze względu na jednostkowe koszty oraz brak potrzeby zastosowania wielu specjalnych urządzeń podczas wykonywania połączenia.

Połączenia klejowe należą do grupy połączeń nierozłącznych. Grupa ta zawiera również takie połączenia, jak połączenia spawane, lutowane, zgrzewane czy nitowane. To, co wyróżnia połączenie klejowe spośród pozostałych połączeń nierozłącznych, to łączenie elementów bez ich niszczenia, a także równomierne rozłożenie naprężeń w spoinie łączonych elementów [1]. Dodatkowo klej cechuje wszechstronność zastosowania. Jedną z głównych przyczyn stałego udoskonalania i wdrażania połączeń klejowych do masowej produkcji jest

⁽¹⁾jacek.ogrodniczek@pollub.edu.pl, ⁽²⁾a.rudawska@pollub.pl Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

możliwość łączenia materiałów różnoimiennych [2]. Klej nałożony na powierzchnie łączone pełni również funkcję uszczelniacza, co w przypadku metali jest bardzo ważne, ponieważ pozwala na ochronę przed korozją [3].

Połączenia klejowe posiadają również wady. Jedną z nich jest trudność w oszacowaniu wytrzymałości połączenia klejowego. Połączenia klejowe poddawane są głównie zniszczeniu doraźnemu, co charakteryzuje się obciążeniem statycznym. Czynniki wpływające na wytrzymałość połączenia klejowego to: sposób przygotowania powierzchni łączonych, dobór odpowiedniego kleju, warunki atmosferyczne podczas nakładania i utwardzania kleju. Dodatkowo ważnym elementem podczas wykonywania połączeń klejowych jest oszacowanie czasu pracy połączenia jak również otaczające połączenie warunki atmosferyczne. Ma to na celu zmniejszyć starzenie kleju [4].

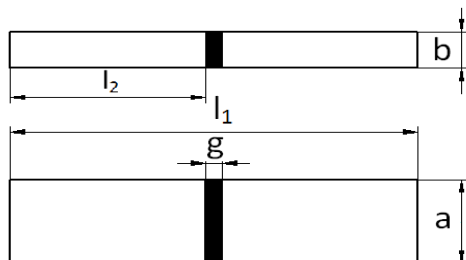
Połączenia klejowe w przemyśle poddawane są wszystkim niezbędnym operacjom zapewniającym jak najwyższą jakość połączenia. Producenci samochodów czy samolotów nie mogą pozwolić na jakiegokolwiek błędy podczas procesu klejenia, ponieważ to przekłada się na bezpieczeństwo użytkownika [5]. Jednakże klej często jest wykorzystywany przy drobnych naprawach w warunkach "polowych" gdzie nie jest możliwe zastosowanie specjalnych urządzeń, takich jak automat spawalniczy. W warunkach tych trudno również jest przygotować odpowiednio powierzchnie materiałów do łączenia. Zwykle podczas napraw doraźnych stosuje się metody mechaniczne lub tylko oczyszcza się powierzchnię z zatluszczeń [6].

Celem tej pracy było porównanie pod względem statystycznym wytrzymałości trzech różnych połączeń klejowych, których powierzchnie elementów przed łączeniem tylko odtłuszczono. Połączenia te wykonane zostały jednakowym klejem epoksydowym z przeznaczeniem do łączenia metali. Analizę statystyczną wytrzymałości połączeń klejowych przeprowadzono z wykorzystaniem programu statystycznego Statistica.

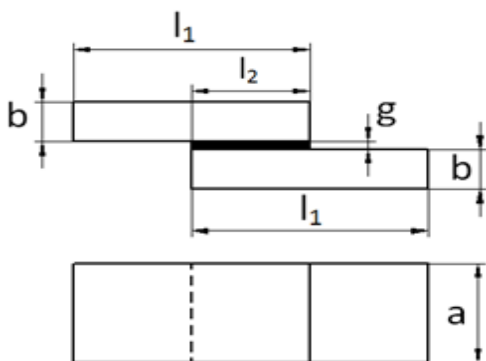
2. Metodyka badań

2.1. Opis wykorzystanych materiałów i wykonanych połączeń

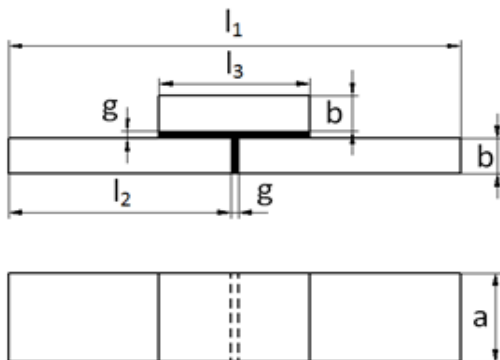
Przedmiotem badania były 3 rodzaje połączeń klejowych: połączenie doczołowe (D), połączenie zakładkowe (Z) oraz połączenie nakładkowe (N). Materiałem łączonym była stal niestopowa konstrukcyjna S235JR [7]. Charakterystyczną właściwością dla tej stali jest wysoka odporność na zmienne obciążenia. Dla wszystkich trzech rodzajów połączeń przygotowano zostało po 5 próbek. Wymiary utworzonych połączeń klejowych przedstawiono na rysunkach 1–3.



Rys. 1. Połączenie klejowe doczołowe (D), $l_1=101$ mm, $l_2=50$ mm, $g=1$ mm, $a=20$ mm, $b=5$ mm



Rys. 2. Połączenie klejowe zakładkowe (Z), $l_1=100$ mm, $l_2=50$ mm, $g=1$ mm, $a=20$ mm, $b=5$ mm



Rys. 3. Połączenie klejowe nakładkowe (N), $l_1= 201$ mm, $l_2=100$ mm, $l_3=50$ mm, $g=1$ mm, $a=20$ mm, $b=5$ mm

2.2. Warunki wykonania połączeń klejowych

Powierzchnie elementów materiałów tworzących połączenia klejowe, przed złączeniem dokładnie oczyszczono. W tym celu posłużono się odtłuszczaczem Loctite 7063. Odtłuszczacz nałożono na powierzchnie próbek stalowych, a następnie owe powierzchnie wytarto dokładnie ręcznikiem, aby zebrać zanieczyszczenia usunięte przez odtłuszczacz.

Do wykonania połączeń zastosowano klej K2 METAL BOND. Jest to klej epoksydowy dwuskładnikowy, składający się z żywicy epoksydowej powstałej na bazie reakcji bisferolu A z epichlorodryną oraz utwardzacza będącego mieszaniną metakrylanu metylu, kwasu akrylowego oraz dodecanethiolu. Klej utwardza się po 10 minutach, pozwalając na ruch złączonych elementów. Pełne utwardzenie uzyskuje po 24 godzinach. Utwardzona sztywna, metaliczna masa, posiada zdolność do dalszej obróbki takiej jak gwintowanie czy wiercenie.

Przed nałożeniem kleju, przygotowana została masa klejowa. Żywica epoksydowa oraz utwardzacz wymieszano ręcznie za pomocą szpatułki w stosunku 1:1, aż do uzyskania przez masę klejową jednolitego koloru. Temperatura i wilgotność podczas przygotowywania oraz nakładania kleju wynosiły kolejno $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ oraz $23\% \pm 2\%$. Ze względu na szybkość wiązania kleju, operację przygotowania kleju powtarzano dla każdej grupy połączeń klejowych. Klej nakładano ręcznie na powierzchnie klejowe. Do badania przygotowano po 5 próbek każdego rodzaju połączenia klejowego.

Wszystkie próbki wykonanych połączeń klejowych utwardzano na zimno w temperaturze pokojowej wynoszącej około 21°C przez okres 24 godzin. Podczas utwardzania zastosowano na połączeniach nacisk o wartości 0,02 MPa.

Po utwardzeniu połączeń klejowych, próbki poddano badaniu wytrzymałościowemu na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150. W badaniu wykorzystano dwie podstawowe metody obciążania połączeń klejowych. W przypadku próbek klejowych połączeń doczołowych, próbki były poddane działaniu siły odrywającej [8]. Pozostałe połączenia klejowe, połączenie zakładkowe oraz nakładkowe, badano poprzez wpływ wytrzymałości na ścinanie [9].

Otrzymane wartości wytrzymałości badanych połączeń klejowych, poddano analizie statystycznej. Analiza polegała na wyznaczeniu rozkładu normalnego uzyskanych wyników połączeń klejowych za pomocą testu statystycznego Shapiro-Wilka. Następnie uzyskane wyniki połączeń klejowych porównano pod względem średniej testem t-studenta. Do uzyskania wyników testów, posłużono się programem statystycznym Statistica.

3. Wyniki badań

3.1. Wyniki parametrów statystyki opisowej

W Tab. 1 przedstawiono parametry statystyki opisowej uzyskanych wyników wytrzymałościowych, na podstawie których dokonano dalszej analizy statystycznej.

Tab. 1. Parametry statystyki opisowej; opracowanie własne

Połączenia	Parametry statystyki opisowej								
	Średnia [MPa]	Mediana [MPa]	Moda	Liczność mody	Rozstęp [MPa]	Wariancja [MPa]	Odch.stand. [MPa]	Skośność	Kurtoza
Doczołowe (D)	7,796	9,11	Wiel.		4,27	2,776	1,666	0,271	-0,621
Zakładkowe (Z)	2,322	2,41	Wiel.		1,06	0,155	0,394	-1,527	3,251
Nakładkowe (N)	1,930	1,93	Wiel.		0,84	0,104	0,322	0,332	-0,291

Wyznaczone parametry statystyki opisowej wyników wytrzymałości połączeń klejowych wykonano dla trzech badanych połączeń. Wyniki parametrów statystyki opisowej przedstawiono w Tab 1. Do wyznaczenia tych parametrów posłużono się wzorami, które badają próbę z populacji. Oznacza to, że uzyskane

wyniki nie są obarczone błędem ze względu na zastosowanie estymatorów nieoznaczonych. Na każdą próbę składało się 5 próbek badanego połączenia klejowego.

W badaniu analizowano 9 parametrów statystyki opisowej. Każdy z tych parametrów umożliwia weryfikację badanych wartości oraz określa różnice pomiędzy wartościami w danej próbie. Głównymi parametrami w tej analizie, które zostały wykorzystane do wykonania testów statystycznych były: średnia wartość, wariancja oraz odchylenie standardowe.

Analizując wyniki statystyki opisowej wartości wytrzymałości połączeń klejowych widoczne jest, że połączenia zakładkowe i nakładkowe uzyskują zbliżone wartości. Różnica pomiędzy średnimi wartościami tych połączeń wynosi 16,88%. W przypadku wariancji oraz odchylenia standardowego porównywanych połączeń, różnica procentowa równa jest kolejno 32,90% i 18,27%. Jednakże widoczna jest rozbieżność wyników dla parametru skośności i kurtozy. Parametr skośności jest miarą symetrii bądź asymetrii rozkładu normalnego uzyskanego z badanych wartości, zaś kurtoza przedstawia rozrzut badanych wartości względem średniej [10]. Klejowe połączenie zakładkowe jest lewostronnie asymetryczne, co świadczy o ujemnym wyniku parametru skośności. Połączenie to uzyskało również dodatni wynik parametru kurtozy. Oznacza to, że wartości większości badanych wyników wytrzymałości zbliżone są do średniej wytrzymałości połączenia. W przypadku połączenia nakładkowego, skośność jest zbliżona do zera, co stanowi o symetrii wykresu rozkładu normalności. Parametr kurtozy tego połączenia uzyskał wynik ujemny, na podstawie którego można stwierdzić znaczną rozbieżność badanych wyników względem parametru średniej wytrzymałości.

Badaniu próbie wytrzymałościowej poddano jedynie po 5 próbek połączeń klejowych zakładkowych i nakładkowych. Jest to tylko próba z populacji, co może być przyczyną rozbieżności względem tych połączeń. Zwiększenie liczby próbek podczas prób wytrzymałościowych mogłoby zwiększyć podobieństwo tych połączeń.

Połączenie doczołowe, analizowane w tym badaniu, znacznie odbiega uzyskanymi wynikami od porównywanych parametrów statystyki opisowej, pozostałych rodzajów połączeń klejowych. Różnica procentowa średniej wartości połączenia doczołowego względem połączenia zakładkowego i nakładkowego wyniosła kolejno 73,60% i 78,05%. Świadczy to o tym, że porównywane połączenia zakładkowe i nakładkowe poddane analizie statystyki opisowej, nie są statystycznie podobne do połączenia doczołowego. Również uzyskane wyniki wariancji i odchylenia standardowego połączenia doczołowego, odbiegają od wartości tych parametrów dla pozostałych dwóch rodzajów połączeń klejowych. Różnica wariancji połączenia doczołowego względem połączenia nakładkowego i zakładkowego wynosi kolejno 94,42% i 96,25% zaś dla odchylenia standardowego odpowiednio 76,35% i 80,67%.

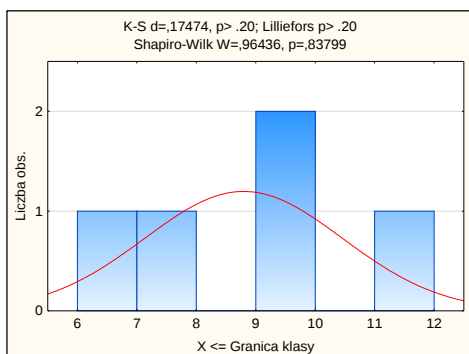
Połączenie doczołowe ma rozkład symetryczny, ze względu na wynik parametru skośności zbliżony do zera. Na podstawie kurtozy, której wynik jest ujemny, stwierdzono, że w przypadku tego połączenia, występuje rozrzut uzyskanych wyników wytrzymałości względem średniej wartości wytrzymałości tego połączenia.

W dalszej części analizy statystycznej posłużono się statystyką matematyczną opartą na testach statystycznych. Testy jakie wykonano to test Shapiro-Wilka, pozwalający wyznaczyć rozkład normalny oraz test t-studenta, który umożliwia określić istotność statystyczną poprzez porównanie średnich wartości badanych wyników.

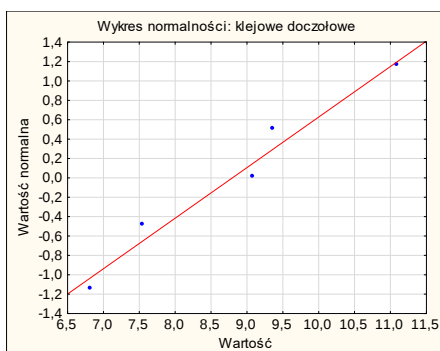
3.2. Analiza statystyczna wyników wytrzymałości badanych połączeń klejowych

Wyniki otrzymane podczas badania wytrzymałościowego połączeń klejowych poddano dalszej analizie statystycznej, która miała za zadanie ocenić, czy otrzymane wartości wykazują statystycznie istotne różnice na przyjętym poziomie ufności $\alpha=0,05$. Taka różnica pomiędzy otrzymanymi wartościami wytrzymałości połączeń klejowych oznaczałaby, że różnica ta jest istotna statystycznie, a uzyskane wyniki nie są do siebie podobne.

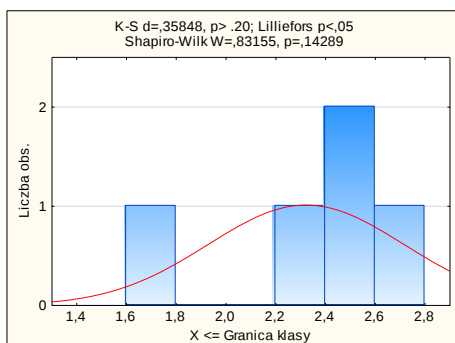
W celu wykonania testu porównania pomiędzy uzyskanymi wartościami, analizę rozpoczęto od sprawdzenia rozkładu normalności uzyskanych wyników wytrzymałości badanych połączeń klejowych. Do wyznaczenia rozkładów normalności posłużono się testem Shapiro-Wilka. Test ten stosowany jest podczas badań, w których ilość badanych elementów znajduje się w przedziale od 3 do 50 [11]. W teście Shapiro-Wilka zostały postawione 2 hipotezy. Hipoteza H_0 przyjmuje, że badane wyniki wytrzymałości połączeń klejowych uzyskują rozkład normalny, zaś hipoteza H_1 zakłada brak rozkładu normalnego badanych prób. Na rysunkach 4 – 9 przedstawiono histogramy wytrzymałości oraz wykresy rozkładu normalnego dla wszystkich badanych połączeń klejowych.



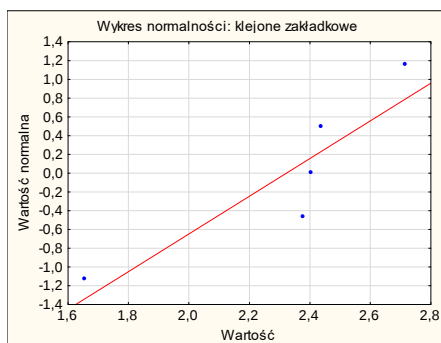
Rys. 4. Histogram wytrzymałości klejowych połączeń doczołowych (D)



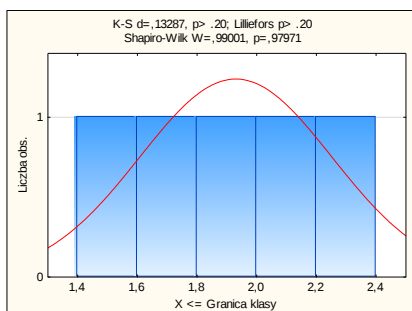
Rys. 5. Wykres rozkładu normalności klejowych połączeń doczołowych (D)



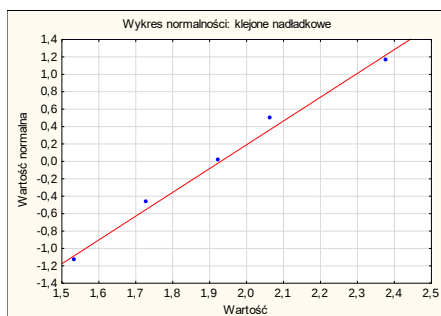
Rys. 6. Histogram wytrzymałości klejowych połączeń zakładkowych (Z)



Rys. 7. Wykres rozkładu normalności klejowych połączeń zakładkowych (Z)



Rys. 8. Histogram wytrzymałości klejowych połączeń nakładkowych (N)



Rys. 9. Wykres rozkładu normalności klejowych połączeń nakładkowych (N)

Tab. 2. Wyniki testu rozkładu normalnego wartości wytrzymałości badanych połączeń klejowych; opracowanie własne

Założenia	H₀: Badana próba jest rozkładu			
	H₁: Badana próba nie jest rozkładu normalnego			
	α=0,05			
Połączenie	W	W*	p	Wynik
Doczołowe (D)	0,964	0,762	0,838	p>α, nie ma podstaw do odrzucenia H ₀
Zakładkowe (Z)	0,832	0,762	0,143	p>α, nie ma podstaw do odrzucenia H ₀
Nakładkowe (N)	0,990	0,762	0,980	p>α, nie ma podstaw do odrzucenia H ₀

W Tab. 2 przedstawiono wyniki uzyskane poprzez przeprowadzenie testu Shapiro-Wilka. Wartość statystyki testu, która została obliczona, oznaczono jako W, zaś wartość statystyki testu odczytana z tabeli statystycznej jako W*.

Odczytana z tabeli statystycznej wartość W*, dla połączenia doczołowego, zakładkowego i nakładkowego, przy parametrach $n=5$ i $\alpha=0,05$ wyniosła $W^*=0,762$. Wyznaczona testem statystycznym Shapiro-Wilka wartość W, dla każdego połączenia jest większa niż wartość W* odczytana z tabeli. Oznacza to, że badane połączenia spełniają założenia hipotezy H_0 [12].

O braku podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 i przyjęciu założenia o uzyskanym rozkładzie normalnym badanych prób świadczy również wartość p, która określa wartość poziomu prawdopodobieństwa statystyki testu. Aby stwierdzić słuszność założenie hipotezy zerowej, wartość poziomu prawdopodobieństwa statystyki testu p musi być większa od poziomu prawdopodobieństwa α [13]. W badaniu wykazano, że każde połączenie spełnia nierówność $p > \alpha$, co pozwala określić, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 , a badane wyniki połączeń klejowych uzyskują rozkład normalny.

Przyjęcie hipotezy H_0 w teście statystycznym Shapiro-Wilka pozwala na wykonanie kolejnego testu statystycznego z wykorzystaniem badanych wartości wytrzymałości połączeń klejowych. Za pomocą testu t-studenta, którego wyniki przedstawiono w Tab 3, porównane zostały średnie wartości badanych połączeń klejowych. Test ten przyjmuje hipotezę H_0 określającą, że porównywane średnie wartości wytrzymałości połączeń klejowych, są sobie równe.

Tab. 3. Wyniki testu t-studenta porównywanych połączeń klejowych; opracowanie własne

Próby	Hipoteza	t _{odczyt.}	t _{oblicz.}	Wynik
D-Z	$H_0: \bar{X}_D = \bar{X}_Z$	2,31	8,45	8,45 € $(-\infty; -2,31 > U < 2,31; \infty)$ Odrzucenie hipotezy H_0 $H_1: \bar{X}_D \neq \bar{X}_Z$
D-N	$H_0: \bar{X}_D = \bar{X}_N$	2,31	9,05	9,05 € $(-\infty; -2,31 > U < 2,31; \infty)$ Odrzucenie hipotezy H_0 $H_1: \bar{X}_D \neq \bar{X}_N$
Z-N	$H_0: \bar{X}_Z = \bar{X}_N$	2,31	1,72	1,72 € $(-\infty; -2,31 > U < 2,31; \infty)$ Brak podstaw do odrzucenia hipotezy H_0

Test t-studenta pozwala na porównanie wartości średnich dwóch badanych obiektów. Rozkład tego testu jest symetryczny względem prostej $x=0$, a kształt gęstości funkcji zbliżony jest do kształtu rozkładu normalnego. Wynik t obliczony testem t-studenta, na podstawie którego określa się przyjęcie hipotezy o równości średnich, powinien mieścić się w przedziale pomiędzy dwustronnymi wartościami krytycznymi t odczytanymi z tabeli statystycznej dla testu t-studenta [14].

Porównywanymi obiektami są próbki połączeń klejowych różniących się konstrukcją i sposobem działania obciążenia zewnętrznego połączenia klejowego. Testem statystycznym porównano średnie wartości wytrzymałości połączeń klejowych. Wykonano następujące próby porównawcze : połączenie doczołowe i zakładkowe (D-Z), połączenie doczołowe i nakładkowe (D-N) oraz połączenie zakładkowe i nakładkowe (Z-N). W Tab. 3 przedstawiono otrzymane wyniki testu statystycznego t-studenta. Poziom istotności testu α przyjęto na poziomie $\alpha=0,05$. Dla każdej z prób wartość t odczytana z tabeli, przy parametrach $n=8$ i $\alpha=0,05$, wyniosła $t_{\text{odczyt.}}=2,31$.

Hipoteza H_0 zakłada, że porównywane średnie wyniki wytrzymałości połączeń klejowych są sobie równe. Wśród przeprowadzonych prób porównawczych wyników wytrzymałości połączeń klejowych, dla prób D-Z i D-N przyjęto hipotezę alternatywną, która odrzuca możliwość podobieństwa średnich i świadczy o znaczącej różnicy średnich wyników wytrzymałości. Wartości t dla prób D-Z i D-N przyjmują wartości $t_{\text{oblicz. D-Z}}=8,45$ oraz $t_{\text{oblicz. D-N}}=8,45$. Oba wyniki obliczone testem t-studenta nie znajdują się w przedziale pomiędzy krytycznymi wartościami t odczytanymi z tabeli, będącymi odbiciem symetrycznym wartości $t_{\text{odczyt.}}$ względem prostej $x=0$.

Brak podstaw odrzucenia hipotezy H_0 otrzymano dla próby Z-N. Wynik testu statystycznego t-studenta dla tej próby porównawczej wyniósł $t_{\text{oblicz. Z-N}}=1,72$. Oznacza to, że wartość $t_{\text{oblicz. Z-N}}$ znajduje się w przedziale pomiędzy wartościami krytycznymi t odczytanymi z tabeli statystycznej. Otrzymany wynik testu statystycznego potwierdza, że badane średnie wartości wytrzymałości połączeń klejowych zakładkowych oraz nakładkowych są równe statystycznie.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Badaniu statystycznemu poddano połączenia klejowe: doczołowe, zakładkowe i nakładkowe. Przeprowadzona próba wytrzymałościowa badanych połączeń dotyczyła warunków warsztatowych, w których nie ma dostępu do urządzeń pozwalających na wykonanie dokładnego i wytrzymałego połączenia. Zastosowany klej epoksydowy, o krótkim czasie wiązania, pozwala na szybką doraźną naprawę pękniętych elementów. Przygotowanie powierzchni oparte na odtłuszczeniu powierzchni z zanieczyszczeń takich jak tłuszcz czy olej jest podstawowym sposobem przygotowania powierzchni. Przy braku dostępnych narzędzi pozwalających rozwinąć powierzchnię klejoną, oczyszczenie powierzchni za pomocą odtłuszczacza często jest jedynym możliwym sposobem na przygotowanie powierzchni do klejenia.

Na podstawie wyników analizy statystycznej wartości wytrzymałości połączeń klejowych można sformułować wnioski:

- Porównując wyniki analizy statystycznej wartości wytrzymałości połączeń klejowych zakładkowych i nakładkowych, uzyskanych na podstawie testu

t-studenta, można stwierdzić, że zostały spełnione założenia hipotezy o równości średnich. Wartości wytrzymałości tych połączeń są statystycznie równe. Wykonanie większej liczby prób wytrzymałościowych połączeń zakładkowych oraz nakładkowych, mogłoby zwiększyć podobieństwo średnich wartości wytrzymałości widocznych w Tab. 1,

- Analiza wyników testu statystycznego t-studenta dla połączenia doczołowego i nakładkowego oraz połączenia doczołowego i zakładkowego wykazała, że oba wykonane porównania połączeń klejowych nie spełniają założenia hipotezy o równości średnich. Świadczy to o tym, że połączenie doczołowe znacznie różni się od połączeń zakładkowych i nakładkowych,
- Najwyższą średnią wartość wytrzymałości uzyskało połączenie doczołowe. Wartość ta wynosi 8,80 MPa,
- Uzyskane podczas badania wyniki wytrzymałości połączeń klejowych są niewielkie [15]. Klej, który był wykorzystany podczas badania, powinien znaleźć zastosowanie przy naprawach doraźnych, gdzie nie będzie narażony na duże obciążenia,
- W celu uzyskania większej wartości wytrzymałości połączeń klejowych, z wykorzystaniem kleju stosowanego w badaniu, należałoby zwiększyć rozwinięcie powierzchni przygotowywanej do klejenia np. poprzez schropowacenie powierzchni papierem ściernym.

Literatura

- [1] Rudawska A., *Przygotowanie powierzchni do klejenia wybranych materiałów konstrukcyjnych*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2017.
- [2] Rudawska A., Ogrodniczek J., Miturska I., Doluk E., *The strength of polymer materials' adhesive joints, applied in the automotive industry*, Technologia i Automatyzacja Montażu 4, 18–24, 2019.
- [3] Ebnesajjad S., *Adhesives technology handbook*, Norwich William, Andrew Inc., 2008.
- [4] Rośkowicz M., *Wybrane problemy długotrwałej eksploatacji połączeń klejowych*, Problemy Eksploatacji 3, 91–105, 2006
- [5] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W., *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1997.
- [6] Godzimirski J., Komorek A., Smal T., *Badania właściwości wytrzymałościowych tworzyw adhezyjnych*, Problemy Eksploatacji 1, 157–165, 2007.

- [7] PN-EN 10025-2:2005: *Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.*
- [8] PN-EN 15870:2009E – *Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie połączeń czółowych.*
- [9] PN-EN 1465: 2009 - *Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.*
- [10] Wasilewska E., *Statystyka opisowa od podstaw*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2011
- [11] Sobczyk M., *Statystyka*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1997.
- [12] Rabiej M., *Analizy statystyczne z programami Statistica i Excel*, Gliwice Wydawnictwo Helion, 2018.
- [13] Koronacki J., Mielniczuk J., *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Warszawa, Wydawnictwo WNT, 2009
- [14] Wasilewska E., *Statystyka matematyczna w praktyce*, Warszawa, Wydawnictwo Difin SA, 2015.
- [15] Miturska I., Rudawska A., *Statystyczna interpretacja wyników pomiarów wytrzymałości połączeń adhezyjnych wybranych materiałów konstrukcyjnych*, *Mechanik* 11, 1620–1623, 2016.

Instalacja fotowoltaiczna zintegrowana z systemem ładowania pojazdów elektrycznych – studium przypadku

Streszczenie: Światowe dążenia do redukcji emisji gazów cieplarnianych i zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii sprawiają, że popularność ekologicznych rozwiązań rośnie. W niniejszej pracy, na bazie przeglądu rozwiązań dostępnych na rynku, dobrano poszczególne elementy układu ładowania pojazdów elektrycznych zasilanego z instalacji fotowoltaicznej wyposażonej w magazyn energii. Następnie przeanalizowano bilans energetyczny w konfiguracji on-grid i off-grid. Na podstawie przeprowadzonych badań wnioskować można, że projektowany system może przynieść wiele korzyści zarówno dla przedsiębiorstwa, jak i sieci elektroenergetycznej.

Słowa kluczowe: systemy fotowoltaiczne, pojazdy elektryczne, sieci inteligentne, zarządzanie energią, energia odnawialna

Photovoltaic system integrated with electric vehicle charger – case study

Abstract: Global efforts to reduce greenhouse gases emission and increase penetration of renewable sources make green solutions increasingly popular. In this work, vehicle charging system powered by photovoltaic installation and energy storage was studied. On the basis of an available solutions review, each component was selected. Next, the energy balance of the on-grid and off-grid configuration was analysed. The conducted research led to the conclusion that the designed system can bring many benefits for both the company and the power grid.

Keywords: photovoltaic systems, electric vehicles, smart grids, energy management, renewable energy

1. Wstęp

Zgodnie z dyrektywą [1], Unia Europejska planuje osiągnąć 32- procentowy udział energii z OZE (odnawialnych źródeł energii) w całkowitym bilansie energetycznym. Ponadto zakłada się ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o minimum 40% w porównaniu z rokiem 1990. Założenia te sprawiają, że wymagania odnośnie zachowania odpowiednich współczynników wobec krajów członkowskich zaostrzają się, choć na przestrzeni ostatnich lat widoczny jest również znaczny wzrost dotacji sprzyjających zakładaniu elektrowni

*j.geca@pollub.pl, Szkoła Doktorska w Politechnice Lubelskiej, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

odnawialnych. Od roku 2000 ceny modułów PV (ang. *photovoltaic*) znacząco zmalały (nawet kilkukrotnie), a technologie ich produkcji rozwinęły się gwarantując zmniejszoną degradację ogniów w funkcji czasu. Ponadto, biorąc pod uwagę spodziewany wzrost cen energii elektrycznej w Polsce, można stwierdzić, iż zakładanie instalacji fotowoltaicznych, szczególnie w przypadku firm, jest coraz bardziej opłacalne. Na chwilę obecną, zgodnie z ustawą o OZE z dnia 20 lutego 2015r. [2] prosumenci rozliczani są na zasadzie opustów. Sprzedawca ma dokonywać rozliczeń ilości energii elektrycznej wprowadzonej przez prosumenta do sieci wobec ilości energii pobieranej z tej sieci w stosunku: 1 do 0,7 (dla mikroinstalacji o łącznej mocy elektrycznej zainstalowanej z przedziału 10kW–40kW) lub 1 do 0,8 (dla instalacji o mocy poniżej 10kW) w ciągu roku. Dodatkowo, ustawa zakłada, że nadwyżka energii elektrycznej wprowadzonej do sieci stanie się własnością dystrybutora. Warto dodać, że biorąc pod uwagę wymienione powyżej założenia dotyczące redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz udziału OZE, w sposób naturalny przychodzą na myśl zarówno instalacje fotowoltaiczne jak również samochody elektryczne (ang. *EV– electric vehicle*). Oczywiście jest, że pojazd posiadający w pełni elektryczny układ napędowy, który wykorzystuje energię z baterii, charakteryzuje się zerową lokalną emisją spalin. Jeśli jednak uwzględnia się pochodzenie energii, którą ładowana jest bateria pojazdu to okazują się, że nawet ten z pozoru ekologiczny środek transportu przyczynia się do pośredniej emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Ma to miejsce w przypadku, gdy energia w systemie elektroenergetycznym wykorzystywana do naładowania akumulatora pochodzi z elektrowni konwencjonalnych, które spalają paliwa kopalne. Z tego też powodu, rozważania na temat ładowania pojazdów elektrycznych z odnawialnych źródeł energii stają się coraz bardziej popularne wśród naukowców na całym świecie[3].

Autorzy w [4,5] przeanalizowali systemy typowo miejskie, zakładające montaż instalacji PV na dachach garaży wyposażonych w układy ładowania EV. Należy mieć jednak na uwadze, że szczególnie w Polsce, na terenach silnie zurbanizowanych, dominują parkingi podziemne, które wykluczają tego typu rozwiązania. W [6,7] wykonano badania fotowoltaicznych instalacji ładowania pojazdów elektrycznych w sektorze prywatnym oraz dla obszaru mieszkalnego stanowiącego mikrosieć. Badania przedstawione w [8] dowodzą, że zastosowanie magazynu energii (ang. *ES–energy storage*) współpracującego z instalacją fotowoltaiczną umożliwia znaczne ograniczenie fluktuacji mocy na wyjściu przekształtnika, nawet w miejscach o dużej zmienności nasłonecznienia. Bardzo ważnym aspektem jest zatem optymalizacja pracy opisywanych systemów, zarówno z dodatkowymi zasobnikami energii [9], jak również bez nich [10,11]. Artykuł [12] podejmuje ponadto zagadnienie strategii sterowania opartej na pomiarze napięcia na szynie prądu stałego.

Problem ładowania pojazdów elektrycznych jest również ściśle związany z koncepcją V2G (ang. *vehicle-to-grid*), która zakłada możliwość wspomagania sieci elektroenergetycznej, w momencie dużego obciążenia, przez energię

z baterii samochodów elektrycznych [13]. Zastosowanie tejże koncepcji w systemie ładowania EV zasilanym z paneli fotowoltaicznych zostało przedstawione w [14]. Pozwala to na inteligentne zarządzanie energią poprzez EMS (ang. *energy management system*) [15], który można stosować w sieci prosumenckiej wyposażonej w inteligentny licznik energii. Powstaje zatem pytanie, jaki wpływ na żywotność baterii mają operacje związane z pobieraniem i oddawaniem energii do sieci? Badania wykonane w [16] wskazują, że przepływ energii przy V2G ma niewielki wpływ na żywotność baterii, jednak czynności mające charakter przerywany prowadzą do szybszej utraty pojemności i należy ich unikać. Optymalizacja tychże procesów powinna zatem uwzględniać koszty degradacji baterii, co przeanalizowano w [17]. W literaturze znaleźć można także wiele opracowań badających aspekty techniczne pracy przekształtników i dobór odpowiedniej topologii [18,19].

Niniejsze opracowanie stanowi studium przypadku bilansu energetycznego systemu ładowania pojazdów elektrycznych zasilanego z instalacji fotowoltaicznej z dodatkowym buforem w postaci magazynu energii. Motywacją do przeprowadzenia badań był artykuł [20]. Jako region wybrano miasto Lublin w Polsce oraz uwzględniono odmienną specyfikę przedsiębiorstwa dla którego dedykowany jest system. Analiza wykonana została przy użyciu oprogramowania PVsyst [21].

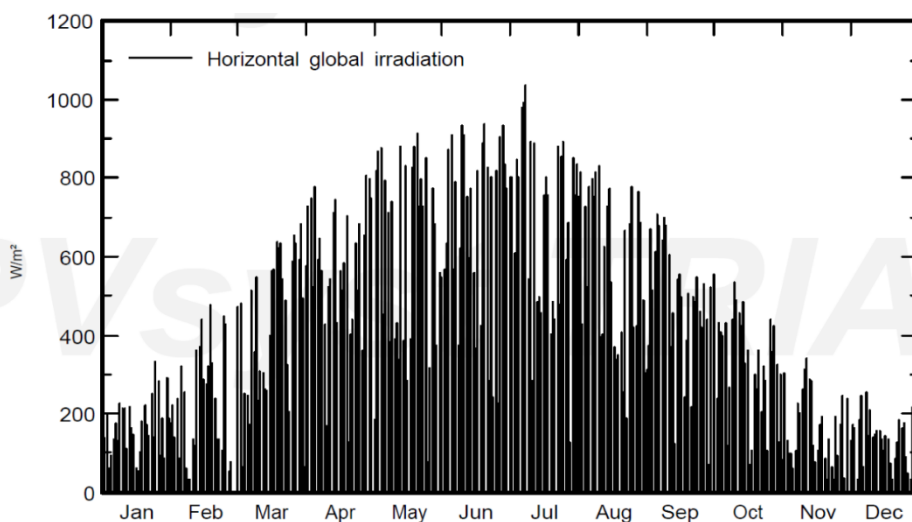
2. Budowa systemu i założenia symulacji

Badana instalacja dedykowana jest dla przedsiębiorstwa kurierskiego z siedzibą na terenie miasta Lublin. Zakład posiada sortownię paczek pracującą w godzinach nocnych oraz flotę pojazdów dostawczych kursujących w dzień. Z tych powodów, wymagane jest aby ładowanie pojazdów odbywało się w nocy, jednak z innego źródła niż sieć zasilająca, w celu zachowania ograniczonego zapotrzebowania na moc w godzinach pracy sortowni. Dodatkowo, zakłada się, że rozwój firmy może wymagać stopniowego zwiększania liczby pojazdów elektrycznych, toteż projektowana instalacja winna mieć charakter modułowy. Na Rys. 1 przedstawiony został model instalacji złożonej z czterech modułów. Istotą systemu jest ładowanie magazynów energii z paneli fotowoltaicznych w ciągu dnia, aby zgromadzoną energię wykorzystać później do ładowania baterii samochodów elektrycznych po ich powrocie do bazy.



Rys. 1. Model badanej instalacji; opracowanie własne

Modelowanie instalacji rozpoczęto od wczytania bazy danych nasłonecznienia Meteororm dla wybranej lokalizacji. Dane generowane są na podstawie pomiarów ze stacji meteorologicznych, satelitarnych oraz z wykorzystaniem odpowiednich technik interpolacji. Roczny wykres nasłonecznienia w tym rejonie przedstawiony został na Rys. 2. Jak widać, w rejonie Lublina występują dosyć dobre warunki do stosowania elektrowni fotowoltaicznych. Nasłonecznienie osiąga wartości nawet powyżej 1000 W/m^2 , natomiast przez zdecydowaną większość roku przekracza 500 W/m^2 . Warto zwrócić uwagę na to, że wykres uwzględnia nawet pochmurne letnie dni, kiedy to nasłonecznienie jest niewielkie.



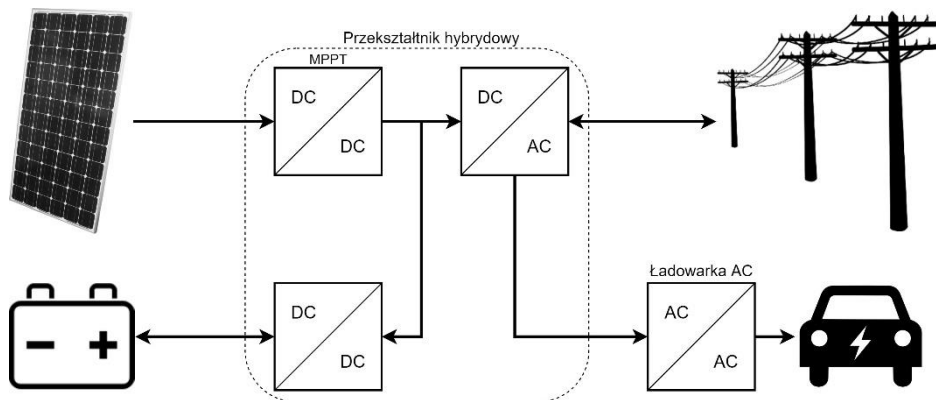
Rys. 2. Dienne nasłonecznienie w skali roku; Oprogramowanie PVsyst

Tab. 1. Parametry elementów instalacji

Panele PV	Moc STC	kWp	5,76				
	Napięcie MPP	V	434				
	Prąd MPP	A	12				
	Układ	—	8s2p (26m ²)				
	Gwarancja mocy	%	98 po pierwszym roku 0,25/rok do 25 lat				
Magazyn energii	Energia baterii samochodu elektrycznego	kWh	22,5	33,0	35,8	40,0	41,4
	Całkowita energia	kWh	22,9	33,6	36,0	43,3	43,3
	Napięcie znamionowe	V	410	414	414	396	396
	Typ	—	LFP	NMC	NMC	LFP	LFP
	Układ	—	128s 20p	8s2p	112s 3p	120s 48p	120s 48p
Przekształtnik hybrydowy	Maks. moc wejściowa PV	kW	9				
	Zakres napięć MPP	V	200–950				
	Maks. prąd wejściowy PV	A	25				
	Moc znamionowa AC	kW	6				
	Prąd znamionowy AC	A	8,7				
	Napięcie znamionowe AC/Częstotliwość	V	3f 400/50				
	Dopuszczalny zakres napięć magazynu energii	V	150–600				
	Maksymalny prąd ładowania/rozładowania	A	25/25				
	Maksymalna sprawność	%	98,2				
Stacja ładowania EV	Moc znamionowa	kW	6				
	Typ złącza	—	TYPE 1/TYPE 2				

Pojedynczy moduł instalacji składa się z wiaty postojowej pokrytej panelami fotowoltaicznymi o powierzchni około 26m², magazynu energii o pojemności większej lub równej pojemności baterii samochodu elektrycznego, hybrydowego przekształtnika fotowoltaicznego i stacji ładowania pojazdów elektrycznych. Autorzy w [22] sugerują powierzchnię 25m² jako miejsce parkingowe ze stacją ładowania dla jednego pojazdu elektrycznego, jednak w tym przypadku dodana jest również powierzchnia fragmentu kontenera, w którym ulokowane są magazyny energii oraz przekształtniki. Najważniejsze parametry poszczególnych elementów znajdują się w Tab. 1. Z uwagi na ograniczoną przestrzeń, panele fotowoltaiczne dobrane zostały w sposób umożliwiający maksymalizację uzysku energii z danej powierzchni. Ponadto założono, że instalacja zorientowana jest na południe, a panele montowane są pod kątem 30 stopni. Nie jest to co prawda optymalny kąt nachylenia dla badanej lokalizacji, jednak uwzględniając konieczność budowy odpowiedniej wiaty postojowej lub stosowania dodatkowych konstrukcji wsporczych, okazuje się on bardziej ekonomicznym

rozwiązaniem. Układ połączeń ogniw dostosowany został do zakresów prądowych i napięciowych przekształtnika. Bardzo ważne kryterium stanowi również gwarancja zachowania mocy, która informuje o przewidywanym przez producenta tempie degradacji struktury krystalicznej ogniwa. Parametry magazynów energii wybranych do przeprowadzenia symulacji są ściśle związane z bateriami EV. Na bazie przeglądu dostępnych w Polsce dostawczych pojazdów elektrycznych wybrano pięć typowych wariantów pojemności energetycznej baterii i na ich podstawie dokonano doboru magazynów. Badania zakładają, że każdy z samochodów powinien mieć możliwość pokonania pełnego dystansu deklarowanego przez producenta jako zasięg, toteż ilość energii zgromadzonej w ES musi być co najmniej równa energii baterii, aby naładować ją do pełna. Istotnym aspektem doboru magazynu energii jest również budowa i rodzaj ogniw. W przypadku badanej instalacji przeanalizowano warianty zestawów dostępnych na rynku. Wśród nich, dużą popularnością cieszą się magazyny energii w obudowie typu „rack”, które umożliwiają swobodną rozbudowę poprzez dodawanie kolejnych modułów szeregowo lub równoległe, przy czym każdy z nich ma napięcia około 50V i gromadzi energię z zakresu 1–2kWh. Następnie zamodelowano różne warianty magazynu poprzez narzędzia dostępne w programie PVsyst. Znamionowe napięcie modułu dostosowano do zakresu napięć przekształtnika, aby możliwe było wygenerowanie sinusoidalnego, trójfazowego napięcia przemiennego o wartości skutecznej 400V na wyjściu. Warto zwrócić uwagę na sam przekształtnik, którego schemat ideowy wraz z pozostałymi elementami systemu, przedstawiony został na Rys. 3. Nazywany jest on hybrydowym, ponieważ łączy w sobie konwerter DC/DC z algorytmem śledzenia maksymalnego punktu mocy (ang. *MPPT–maximum power point tracker*), dwustronną ładowarkę prądu stałego połączoną z układem magazynu energii oraz falownik posiadający dwa wyjścia AC. Pierwsze z nich podłączone jest do sieci zasilającej i umożliwia dwustronny przepływ energii, natomiast drugie połączone jest z samochodową ładowarką prądu przemiennego. Moc wyjściowa AC jest niewielka, a specyfika pracy firmy nie wymaga szybkiego ładowania prądem stałym, ponieważ auta mogą być podłączone do systemu przez całą nocną zmianę, czyli 8h. Oznacza to, że nawet w przypadku największej baterii o pojemności 41,1kWh, moc ładowania będzie wystarczająca.



Rys. 3. Schemat ideowy systemu; opracowanie własne

Istotnym aspektem analizy układu ładowania pojazdów elektrycznych zasilanego z paneli fotowoltaicznych jest stworzenie inteligentnego systemu zarządzania energią EMS [23], który umożliwi funkcjonowanie w sieci inteligentnej (*ang. smart grid*). Układy mikrogeneracji wyposażone w magazyny energii mogą spełniać wiele zadań wspomagających sieć takich jak kompensacja mocy biernej [24], czy równoważenie dobowej krzywej zapotrzebowania na moc. Warto nadmienić, iż projektowana instalacja nie wymaga stosowania ładowarek dwustronnych EV, ponieważ usługa V2G może zostać zastąpiona usługą S2G (*ang. storage-to-grid*). Na podstawie rozważań dotyczących pracy zbliżonego układu opisanego w [25] dokonano analizy trybów pracy systemu.

Ładowanie magazynu energii z paneli PV.

Sytuacja ta występuje gdy warunki umożliwiają pełne naładowanie magazynu jedynie przy użyciu energii produkowanej przez elektrownię fotowoltaiczną.

Ładowanie magazynu częściowo z paneli PV i częściowo z sieci.

Występuje, gdy wymagana ilość energii potrzebna do naładowania magazynu jest większa od możliwej do uzyskania ze źródła odnawialnego. W tym przypadku, jeżeli nasłonecznienie jest niewielkie (napięcie na panelach PV spada poniżej zakresu napięć MPP przekształtnika), następuje odłączenie źródła fotowoltaicznego i ładowanie energią z sieci elektroenergetycznej.

Ładowanie magazynu z sieci elektroenergetycznej.

Warunki atmosferyczne mogą uniemożliwić produkcję energii przez panele PV, dlatego też istnieje możliwość ładowania magazynu energii z sieci elektroenergetycznej. Dodatkową zaletą tego rozwiązania może być równoważenie zapotrzebowania na moc w dolinie dziennej, nawet przy dobrym nasłonecznieniu.

Usługa S2G.

Jest to dla opisywanej instalacji usługa analogiczna do V2G. Pozwala ona na wspomaganie systemu elektroenergetycznego na żądanie operatora. Stan ten występować może również w nocy, gdy bateria samochodu elektrycznego jest w pełni naładowana.

Oddawanie energii ze źródła odnawialnego do sieci.

Jeżeli w układzie występuje nadwyżka energii produkowanej przez panele PV lub gdy sieć zasilająca zgłosi zapotrzebowanie, następuje jej oddawanie z całkowitym pominięciem ES.

Ładowanie pojazdu elektrycznego z magazynu energii.

W godzinach nocnych, po powrocie floty pojazdów dostawczych na teren zakładu, rozpoczyna się proces ich ładowania. W przypadku wystarczającej ilości energii w magazynie, bateria samochodu ładowania jest w pełni z tego źródła.

Ładowanie pojazdu elektrycznego częściowo z ES, a częściowo z sieci.

Jeżeli w systemie występuje deficyt energii, jej braki potrzebne do pełnego naładowania pojazdu elektrycznego, pobierane są z systemu elektroenergetycznego.

Przekazywanie energii pomiędzy pojazdami (ang. V2V–*vehicle-to-vehicle*).

Ważnym aspektem zarządzania energią jest odpowiednie planowanie jej zużycia przez pojazdy elektryczne, czyli uprzednie wyznaczanie trasy przejazdu. Dzięki temu, deficyt energii dla jednego z pojazdów można zaspokoić nadwyżką z innych, unikając jednocześnie konieczności pobierania jej z sieci.

Jednym ze stanów zabronionych systemu jest ładowanie pojazdu elektrycznego bezpośrednio z sieci, ponieważ w nocy, zapotrzebowanie na moc całego zakładu jest duże (z powodu działania sortowni paczek) i nie może przekroczyć określonej wartości. Opisane wyżej tryby funkcjonowania odnoszą się do wariantu instalacji połączonej z siecią, natomiast w dalszej części pracy porównano bilans energii z instalacją autonomiczną (tzw. standalone).

3. Wyniki

W Tab. 2 przedstawiono bilans energii dla różnych wariantów pojemności baterii samochodu elektrycznego w instalacji samodzielnej (ang. *off-grid*). Z powodu braku połączenia z siecią, wszelki nadmiar energii, który nie może być magazynowany, jest tracony. Widoczne jest, że ilość marnowanej energii zmniejsza się wraz ze wzrostem pojemności magazynu z około 1385 kWh do

33kWh. Pokazuje to również wzrost wartości współczynnika PR– performance ratio (stosunek energii produkowanej do możliwej do wyprodukowania przy STC ang. *standard test conditions*) z 67,3% do ponad 84%. Większa bateria samochodu elektrycznego wymaga jednakże zwiększonego zapotrzebowania (E_Load w tabeli) przy założeniu, że będzie w pełni ładowana i rozładowywana. Powoduje to wówczas wzrost ilości brakującej energii w systemie, który uwidacznia się szczególnie w okresie zimowym przy niewielkim nasłonecznieniu.

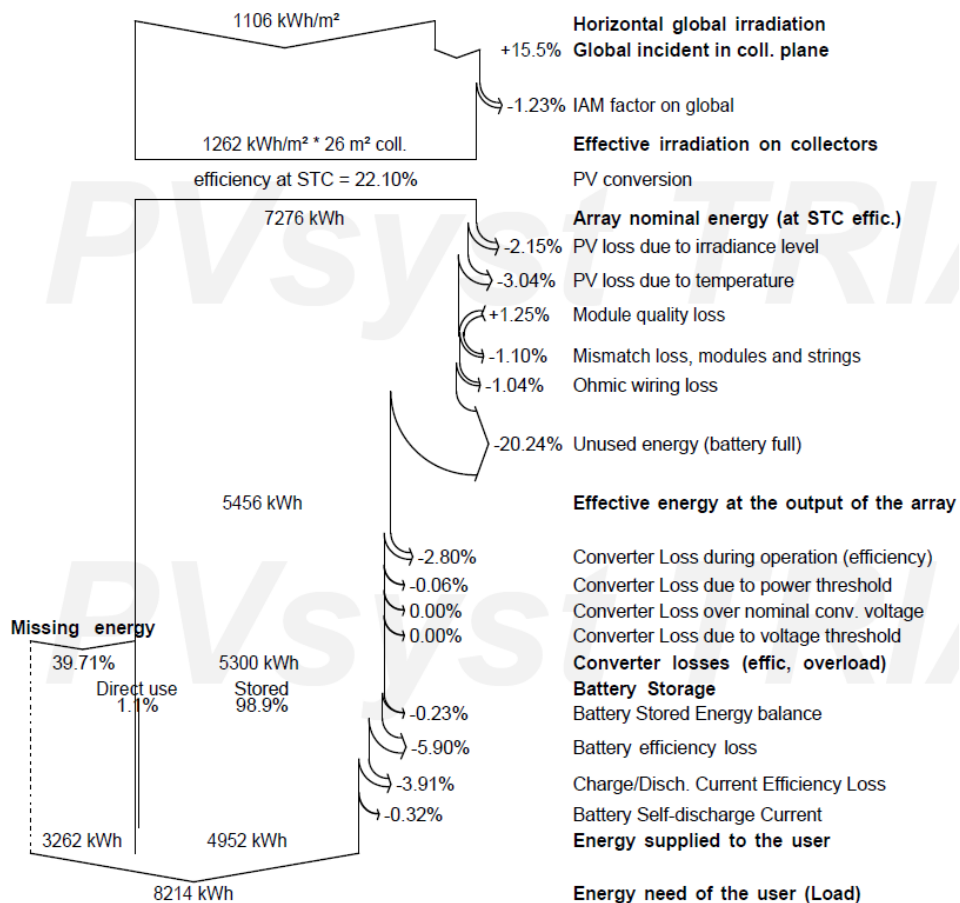
Tab. 2. Bilans energii dla instalacji off-grid

E_Bat	E_Avail	E_Unused	E_Miss	E_User	E_Load	PR
kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
22,5	6684,7	1384,40	3261,5	4952,4	8214	67,30
33,0	6661,0	358,80	6175,4	5869,6	12045	79,76
35,8	6657,3	219,81	7083,2	5983,8	13067	81,31
40,0	6652,0	39,07	8362,0	6238,1	14600	84,77
41,4	6651,7	32,79	8872,0	6238,7	15111	84,78

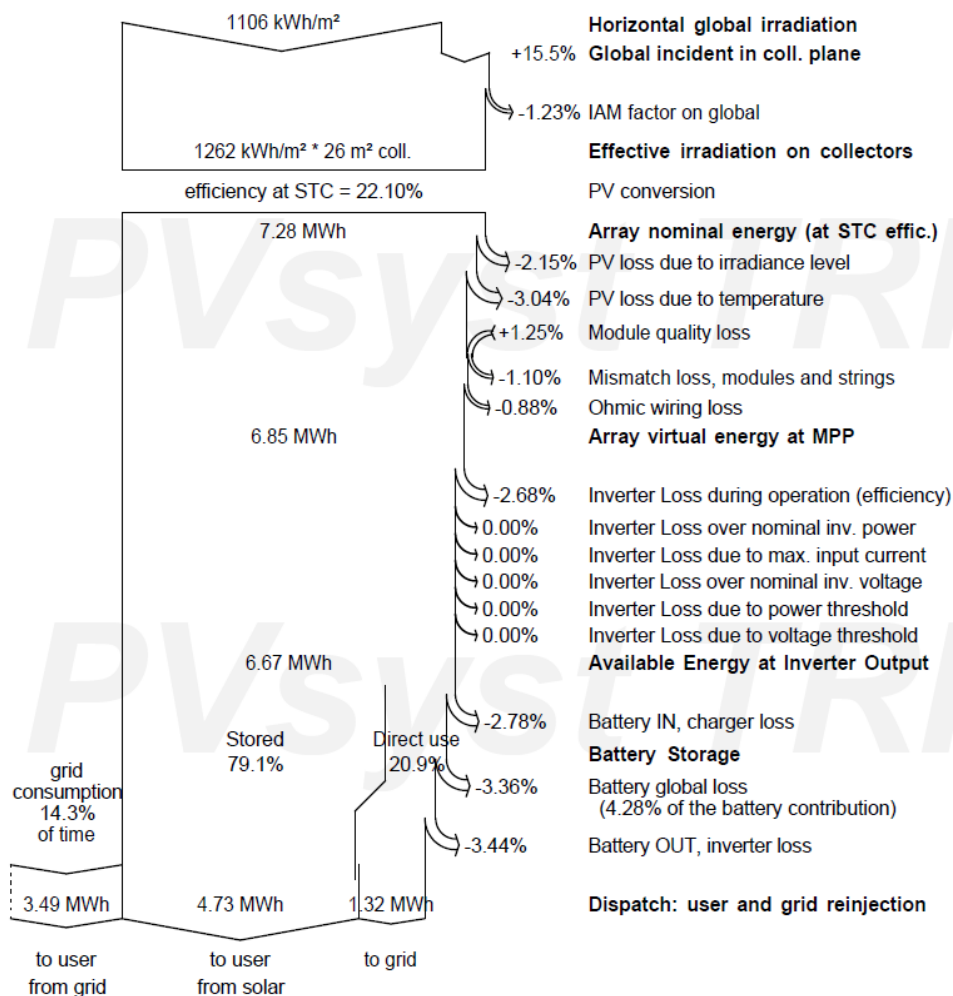
Tab. 3. Bilans energii dla instalacji on-grid

E_Bat	E_Array	E_User	E_Solar	E_Grid	E_Fr_Grid	PR
kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
22,5	6851	8214	4728	1321	3486	82,20
33,0	6851	12045	5768	325	6277	82,80
35,8	6851	13067	5875	180	7192	82,28
40,0	6851	14600	5980	1	8620	81,27
41,4	6851	15111	5978	0	9133	81,24

Zestawienie wyników symulacji dla różnych pojemności baterii pojazdu elektrycznego w instalacji połączonej z siecią (ang. *on-grid*) znajduje się w Tab. 3. W przeciwieństwie do systemu standalone, energia nie jest tracona, ponieważ zawsze istnieje możliwość oddania jej nadmiaru do sieci. Stąd też PR przekracza 81% w każdym przypadku. Wzrost pojemności baterii auta powoduje zwiększone zapotrzebowanie na energię (E_User) od 8214kWh do 15111kWh w skali roku. Ilość energii wymagana do pełnego naładowania pojazdu dostarczana jest z paneli PV oraz, w przypadku niedoborów, z sieci elektroenergetycznej. Warto zwrócić uwagę, że zarówno dla instalacji on-grid, jak i off-grid, energia uzyskiwana z paneli PV różni się dla poszczególnych przypadków, pomimo tej samej bazy danych meteorologicznych. Wynika to z faktu, że zmienia się obciążenie przekształtnika DC/DC ze śledzeniem MPP, co wpływa na produkowaną energię.



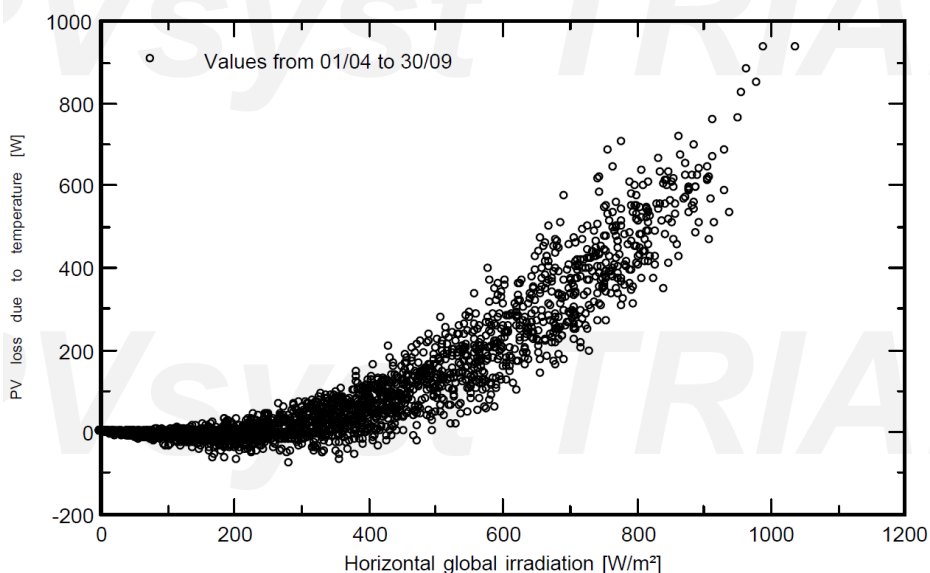
Rys. 4. Diagram strat instalacji off-grid dla baterii 22,5kWh; Oprogramowanie Pvsyst



Rys. 5. Diagram strat instalacji on-grid dla baterii 22,5kWh; Oprogramowanie Pvsyst

Rys. 4 przedstawia diagram strat instalacji autonomicznej dla pojemności baterii pojazdu równej 22,5kWh. Największy udział mają wspomniane już wcześniej straty wynikające z pełnego naładowania magazynu. Co więcej, ubytki związane z przeładowywaniem baterii oraz ze sprawnością ogniów tworzących moduły magazynu stanowią łącznie około 10% pozostałej energii. W systemie on-grid nadwyżka oddawana jest do sieci (Rys. 5). Energia tracona, zależna od wykonania ES jest porównywalna do systemu standalone, jednak istotną różnicę można dostrzec w stratach wynikających z pracy przekształtników. Dla systemu off-grid wynoszą one około 156kWh, natomiast w on-grid 183,6kWh. Różnica ta wynika przede wszystkim z konieczności dodatkowego przetwarzania energii

przy oddawaniu jej do sieci zasilającej. Kolejnym istotnym składnikiem strat są ubytki wynikające z nagrzewania się struktury krystalicznej paneli PV, które dla obu instalacji mają taki sam udział procentowy. Wielkość strat termicznych rośnie w przybliżeniu eksponencjalnie ze wzrostem nasłonecznienia powodując przesuwanie się maksymalnego punktu mocy. Wartości ujemne widoczne na Rys. 6 są spowodowane tym, że parametry paneli PV podawane są dla warunków STC (na ogół 25°C oraz 1000W/m²) i dla mniejszych temperatur zachodzi zjawisko chłodzenia paneli (przy dobrym nasłonecznieniu ich temperatura nie podnosi się powyżej STC).



Rys. 6. Wykres zależności strat termicznych proponowanego układu od nasłonecznienia;
Oprogramowanie Pvsyst

4. Wnioski

W niniejszym opracowaniu dokonano analizy energetycznej instalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z układem ładowania pojazdów elektrycznych i magazynem energii. System dedykowany jest dla przedsiębiorstwa o pewnej specyfice pracy, jednak rozważania na jego temat umożliwiają sformułowanie zarówno ogólnych warunków funkcjonowania tego typu instalacji, jak również szczegółowych założeń systemu zarządzania energią. W pracy wykorzystano bazę danych meteorologicznych Meteonorm, która wskazuje, że na terenie Lublina występują stosunkowo dobre warunki do pozyskiwania energii ze źródeł fotowoltaicznych. Przy uwzględnieniu założeń instalacji oraz na bazie przeglądu rozwiązań dostępnych na rynku, dobrano poszczególne elementy składowe

systemu takie jak panele PV, magazyn energii, przekształtnik hybrydowy, stacja ładowania EV. Przedstawiono również szczegółową analizę trybów pracy układu stanowiącą podstawę do opracowania systemu inteligentnego zarządzania energią. Okazało się, że niewątpliwą zaletą konfiguracji połączonej z siecią jest fakt, że magazyn energii umożliwia wspomaganie systemu elektroenergetycznego praktycznie w dowolnym momencie, a jedyne ograniczenie stanowi ilość energii potrzebna pojazdom do przejechania wyznaczonej trasy danego dnia. Następnie, z wykorzystaniem oprogramowania PVsyst, zbadano bilans energii dla kilku wariantów pojemności baterii samochodów elektrycznych przy pracy autonomicznej instalacji oraz połączeniu z siecią. W konfiguracji off-grid produkowana energia stanowi 41%–60% całkowitej energii potrzebnej do naładowania pojazdu elektrycznego jednak w przypadku baterii o pojemności 22,5kWh aż 20% energii zostało niewykorzystane z powodu pełnego naładowania. Stąd też, wartość współczynnika PR w tym przypadku spadła poniżej 70%. Nadmiar energii oddawany jest do sieci w przypadku instalacji on-grid, w której energia produkowana stanowi 39,5%–57,5% zapotrzebowania pojazdu elektrycznego. Należy również dodać, że w obu przypadkach przyjęto pokonywanie maksymalnego, dziennego dystansu przewidzianego przez producenta jako zasięg auta. Przeprowadzono także analizę udziału poszczególnych rodzajów start w całkowitym bilansie energetycznym. W obu przypadkach, pomijając niewykorzystaną energię w instalacji off-grid, największą część stanowiły ubytki związane ze sprawnością ogniw tworzących moduły magazynu energii oraz z ich ładowaniem i rozładowywaniem. Starty wynikające z pracy przekształtnika są większe w przypadku systemu on-grid, ponieważ oddawanie energii do sieci wymaga dodatkowych operacji konwersji energii przez to urządzenie. Odkryto również, że znaczące są starty termiczne, których wartość zależy eksponencjalnie od nasłonecznienia.

Na podstawie rozważań zawartych w pracy można wnioskować, że najlepszym rozwiązaniem w analizowanym przypadku będzie instalacja połączona z siecią lub, w przypadku braku zgody operatora systemu elektroenergetycznego na podłączenie, autonomiczna. Warunkiem jest znalezienie optymalnego kompromisu pomiędzy energią marnowaną w okresie letnim, a deficytową w zimie. Wykazano zatem opłacalność energetyczną proponowanego układu, choć pełna ewaluacja projektu wymaga rozpatrzenia dodatkowo aspektu finansowego, ekologicznego (związanego z przewidywaną redukcją emisji gazów cieplarnianych do atmosfery) oraz związanego ze wspomaganie systemu elektroenergetycznego (realizacją usług dla operatora). W przyszłości, możliwa będzie również implementacja uczenia maszynowego do systemu zarządzania energią, podobnie jak autorzy w [26].

Literatura

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, Dz. Urz. UE L 328/82 z 21.12.2018 r.
- [2] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. z 2015r., poz. 478
- [3] Shepero M., Munkhammar J., Widen J., Bishop J. D. K., Bostrom T., *Modeling of photovoltaic power generation and electric vehicles charging on city-scale: A review*, Renewable & Sustainable Energy Reviews 89, 61–71, 2018.
- [4] Brenna M., Dolara A., Foiadelli F., Leva S., Longo M., *Urban Scale Photovoltaic Charging Stations for Electric Vehicles*, Ieee Transactions on Sustainable Energy 5, 1234–1241, 2014.
- [5] Tulpule P. J., Marano V., Yurkovich S., Rizzoni G., *Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station*, Applied Energy 108, 323–332, 2013.
- [6] van der Kam M., van Sark W., *Smart charging of electric vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid; a case study*, Applied Energy 152, 20–30, 2015.
- [7] Gurkaynak Y., Khaligh A., *Control and Power Management of a Grid Connected Residential Photovoltaic System with Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Load*, Apec: 2009 Ieee Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1- 4, 2086–2091, 2009.
- [8] Traube J., Lu F. L., Maksimovic D., *Electric vehicle DC charger integrated within a photovoltaic power system*, Ieee. in 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 352–358, 2012.
- [9] Eldeeb H. H., Faddel S., Mohammed O. A., *Multi-Objective Optimization Technique for the Operation of Grid tied PV Powered EV Charging Station*, Electric Power Systems Research 164, 201–211, 2018.
- [10] Ghofrani M., Arabali A., Ghayekhloo M., *Optimal charging/discharging of grid-enabled electric vehicles for predictability enhancement of PV generation*, Electric Power Systems Research 117, 134–142, 2014.
- [11] Zhang W. G., Ge W. J., Huang M., Jiang J. C., *Optimal Day-Time Charging Strategies for Electric Vehicles considering Photovoltaic Power System and Distribution Grid Constraints*, Mathematical Problems in Engineering 9, 2015.
- [12] Goli P., Shireen W., *PV powered smart charging station for PHEVs*, Renewable Energy 66, 280–287, 2014.
- [13] Kempton W., Tomic J., *Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy*, Journal of Power Sources 144, 280–294, 2005.

- [14] Ul-Haq A., Cecati C., Al-Ammar E. A., *Modeling of a Photovoltaic-Powered Electric Vehicle Charging Station with Vehicle-to-Grid Implementation*, *Energies* 10, 20, 2017.
- [15] Wu X. H., Hu X. S., Moura S., Yin X. F., Pickert V., *Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array*, *Journal of Power Sources* 333, 203–212, 2016.
- [16] Peterson S. B., Apt J., Whitacre J. F., *Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization*, *Journal of Power Sources* 195, 2385–2392, 2010.
- [17] Badawy M. O., Sozer Y. L., *Power Flow Management of a Grid Tied PV-Battery System for Electric Vehicles Charging*, *Ieee Transactions on Industry Applications* 53, 1347–1357, 2017.
- [18] Zieliński Z., Tokovarov M., *Simulation and comparison of selected fast charger topologies*, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 7, 2017.
- [19] Nejabatkhah F., Li Y. W., *Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid*, *Ieee Transactions on Power Electronics* 30, 7072–7089, 2015.
- [20] Grande L. S. A., Yahyaoui I., Gomez S. A., *Energetic, economic and environmental viability of off-grid PV-BESS for charging electric vehicles: Case study of Spain*, *Sustainable Cities and Society* 37, 519–529, 2018.
- [21] <https://www.pvsyst.com>, (13.05.2020r.).
- [22] Carli G., Williamson S. S., *Technical Considerations on Power Conversion for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Battery Charging in Photovoltaic Installations*, *Ieee Transactions on Power Electronics* 28, 5784–5792, 2013.
- [23] Wi Y. M., Lee J. U., Joo S. K., *Electric Vehicle Charging Method for Smart Homes/Buildings with a Photovoltaic System*, *Ieee Transactions on Consumer Electronics* 59, 323–328, 2013.
- [24] Hung D. Q., Dong Z. Y., Trinh H., *Determining the size of PHEV charging stations powered by commercial grid-integrated PV systems considering reactive power support*, *Applied Energy* 183, 160–169, 2016.
- [25] Bhatti A. R., Salam Z., Aziz M., Yee K. P., *A critical review of electric vehicle charging using solar photovoltaic* *International Journal of Energy Research* 40, 439–461, 2016.
- [26] van der Meer D., Mouli G. R. C., Mouli G. M. E., Elizondo L. R., Bauer P., *Energy Management System With PV Power Forecast to Optimally Charge EVs at the Workplace*, *Ieee Transactions on Industrial Informatics* 14, 311–320, 2018.

Badanie wpływu układu warstw w kompozycie FRP na postać wyboczenia

Streszczenie: Artykuł przedstawia analizę numeryczną cienkościennego profilu kompozytowego poddanego osiowemu ściskaniu. Profil wykonany został z kompozytu węglowego w osnowie polimerowej o różnych układach włókien. Za pomocą oprogramowania Abaqus wyznaczone zostały postacie wyboczenia. Pozyskane wartości własne w późniejszych badaniach posłużą do zaburzenia profilu podczas badania jego zniszczenia.

Słowa kluczowe: profil cienkościenny, postać wyboczenia, częstości własne

Study of the influence of the layer configuration in the FRP composite on the buckling mode

Abstract: The article presents a numerical analysis of a thin-walled composite profile subjected to axial compression. The profile is made of carbon composite in a polymeric matrix with different fiber configurations. Using Abaqus software the buckling forms were determined. The eigenvalues obtained in subsequent tests will be used to disturb the profile during its failure study.

Keywords: thin-walled structure, buckle mode, eigenvalues

1. Wstęp

Struktury cienkościenne znajdują powszechne zastosowanie w przemyśle samochodowym. Wykorzystywane są do pochłaniania energii podczas zderzenia. Konstrukcje tego typu nazywane Crash-box'ami pozwalają ochronić elementy nośne pojazdu podczas kolizji przy prędkościach nawet do 20 km/h. Profile z uwagi na swoją wydajność energetyczną mogą przyjmować różne przekroje poprzeczne tj. kwadratowe, okrągłe, sześciokątne [1,2]. Mechanizm zgniotu tego typu profili opisany został w wielu publikacjach międzynarodowych [3,4]. Jednym z najważniejszych czynników decydujących o przebiegu analizy jest postać wyboczenia (pierwsza częstość drgań) jaką przyjmuje słup [5]. Wielkość fałd występujących na ścianach bocznych profilu jest zależna od szerokości profilu oraz grubości ściany bocznej. Ilość pochłoniętej energii jest zależna od ilości przegubów plastycznych [6,7]. W zależności od kształtu słupa mogą wystąpić dwa rodzaje wyboczenia: lokalne oraz globalne [8]. W przypadku

*⁽¹⁾micchal.rogala@pollub.edu.pl, ⁽²⁾jabub.pasnik@pollub.edu.pl, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

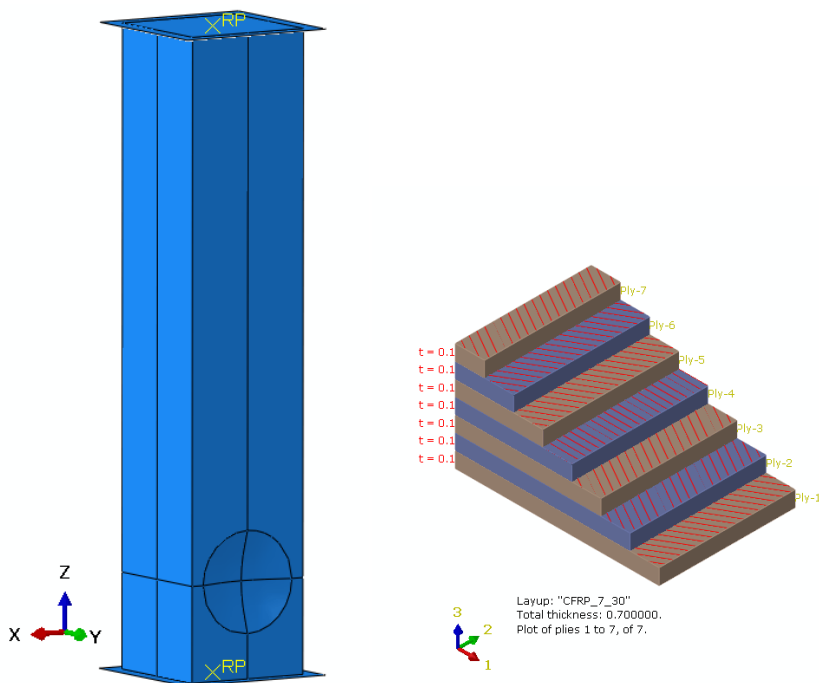
lokalnych przegubów plastycznych profil cienkościenny z każdym kolejnym odkształceniem absorbuje coraz większą ilość energii [9]. Jeśli podczas zgniotu nastąpi wyboczenie globalne, struktura przelamuje się, a jej potencjał energetyczny jest zmarnowany [10]. Przeguby plastyczne w zależności od kąta rozwarcia pomiędzy ścianami bocznymi mogą nastąpić w sposób symetryczny (0° – 120°) lub asymetryczny ($<120^{\circ}$) [11]. Obecnie dużym zainteresowaniem cieszą się struktury kompozytowe [12,13]. Dzieje się tak ze względu na specyficzne, niespotykane w konwencjonalnych materiałach właściwości. Główną zaletą materiałów kompozytowych na osnowie polimerowej, które są złożeniem dwóch lub więcej materiałów o skrajnie różnych właściwościach, jest duża sztywność elementu w odniesieniu do masy. Dzieje się tak dzięki bardzo wytrzymałym włóknom (np. włóknom węglowym) które nadają dużą sztywność oraz żywicy, która przesączając zbrojenie jest swoistym spoiwem dla włókien, nadaje również materiałowi wytrzymałości w kierunku poprzecznym w stosunku do kierunku ułożenia włókien. Kompozyty można szeregować ze względu na materiał osnowy (np. kompozyty na osnowie metalowej, ceramicznej czy polimerowej), materiał zbrojenia (np. kompozyty zbrojone długimi lub krótkimi włóknami czy zbrojone cząstkami) czy charakter umocnienia. W tej pracy analizie poddane zostały kompozyty laminatowe. Są to kompozyty na osnowie polimerowej (matrycę stanowi żywica epoksydowa) i są wzmocnione włóknami. Włókna mogą występować w formie długich włókien o ściśle określonym położeniu lub ciętych kawałków wymieszanych z żywicą [14]. Rozpatrywane modele stanowiły belki kompozytowe wzmocniane włóknami szklanymi oraz węglowymi. W przypadku profili wykonanych z materiałów kompozytowych o charakterystyce ortotropowej występowanie przegubów plastycznych oraz ich położenie w dużym stopniu zależne jest od ilości warstw oraz ułożenia włókien [15,16]. Podczas zgniotu profili tj. ceownik, zetownik, profil kwadratowy, propagacja zniszczenia następuje najczęściej w miejscu występowania karbu [17,18]. Wraz z rozwojem branży motoryzacyjnej zwiększały się obostrzenia dotyczące bezpieczeństwa biernego. Zarówno auta produkowane w Unii Europejskiej jak i w Stanach Zjednoczonych miały stawiane coraz ostrzejsze wymagania odnośnie przeciążeń panujących podczas zgniotu. Podczas analizy zgniotu charakterystycznymi wielkościami jest maksymalna siła zgniatająca (PCF), średnia siła zgniatająca (MCF) [19]. By spełnić wymagania stawiane absorberom energii inżynierowie zaczęli stosować zniekształcenia konstrukcji profilu cienkościennego poprzez zastosowanie inicjatora zgniotu (triggera). Przyjmuje on kształt nagniecenia na ścianie bocznej lub krawędzi bocznej lub wycięcia na ściankach [20,21]. Inicjatora zgniotu ma dwa główne zastosowania, rozpoczęcie występowania przegubów plastycznych oraz obniżenie wartości maksymalnej siły zgniatającej wykrywanej najczęściej na początku zgniotu [22,23].

2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań był profil o przekroju kwadratowym wykonany z kompozytu laminatowego (Rys. 1). Wymiary przekroju poprzecznego to 40x40 mm, a jego wysokość to 200mm. Kolumna posiada inicjator zgniotu w kształcie wklęsłej powierzchni sferycznej przedstawionej na poniższym rysunku. Wymiary triggera to: 32 mm średnicy, wklęsłość na 3,6 mm, położenie środka inicjatora od podstawy to 30 mm. Grubość jednej warstwy to 0,1 mm, w zależności od ilości warstw ścianki profili posiadały grubość całkowitą 0,7 mm (7 warstw), 0,9 mm (9 warstw) oraz 1,8 mm (18 warstw).

Model numeryczny analizowanej próbki został wykonany w środowisku obliczeń metodą elementów skończonych Abaqus. Materiał wykorzystany w obliczeniach numerycznych to kompozyt na osnowie polimerowej wzmocniony długimi włóknami szklanymi oraz węglowymi. Przyjęto ortotropowy model materiału, który jest realizowany w programie Abaqus poprzez wybór podopcji *Lamina* w module wykorzystywanym do definiowania danych materiałowych. Dla wybranego typu materiału wymagane było podanie następujących danych: moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) w kierunku włókien E_1 oraz w kierunku prostopadłym do włókien E_2 , współczynnik Poissona (tzw. większy) ν_{12} oraz trzy moduły odkształcalności postaciowej (moduły Kirchoffa) G_{12} , G_{13} oraz G_{23} . Dla kompozytu węglowego podane wyżej parametry mają wartości: $E_1 = 112,1$ GPa, $E_2 = 7,4$ GPa, $\nu_{12} = 0,27$, $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 3,338$ GPa natomiast dla kompozytu szklanego: $E_1 = 43,5$ GPa, $E_2 = 9$ GPa, $\nu_{12} = 0,336$, $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 3,2$ GPa. Wszystkie dane materiałowe zostały wyznaczone przez autorów w rezultacie badań eksperymentalnych przez nich przeprowadzonych.

W badaniach zastosowano 3 układy warstw w badanym modelu. Pierwszy układ był układem prostym, niesprężonym o następującym układzie warstw: $[\theta/-\theta/-\theta/0/\theta/\theta/-\theta]$, układ o 7 warstwach kompozytu. W następnych dwóch układach występowało sprzężenie mechaniczne, pierwszy to układ o sprzężeniu giętno – wzdłużnym BE (z ang. *bending – extension*) o następującej kolejności warstw $[\theta/-\theta/0/-\theta/0/\theta/90/\theta/-\theta]$, 9 warstw oraz układ o sprzężeniu giętno-skrętnym BT (z ang. *bending – twisting*) gdzie kolejność warstw jest następująca $[\theta/0/\theta/0/0/-\theta/0/-\theta/-\theta/-\theta/0/0/0/\theta/\theta]$ z 18 warstwami w próbce [14]. Oznaczenie θ w sekwencji ułożenia warstw kompozytu odpowiada kątowi orientacji włókien w konkretnej warstwie i dla opisywanej analizy zawierał się w zbiorze $\theta = \{30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$.



Rys. 1. Badana próbka wraz z wizualizacją układu warstw modelu CFRP_7_30; opracowanie własne

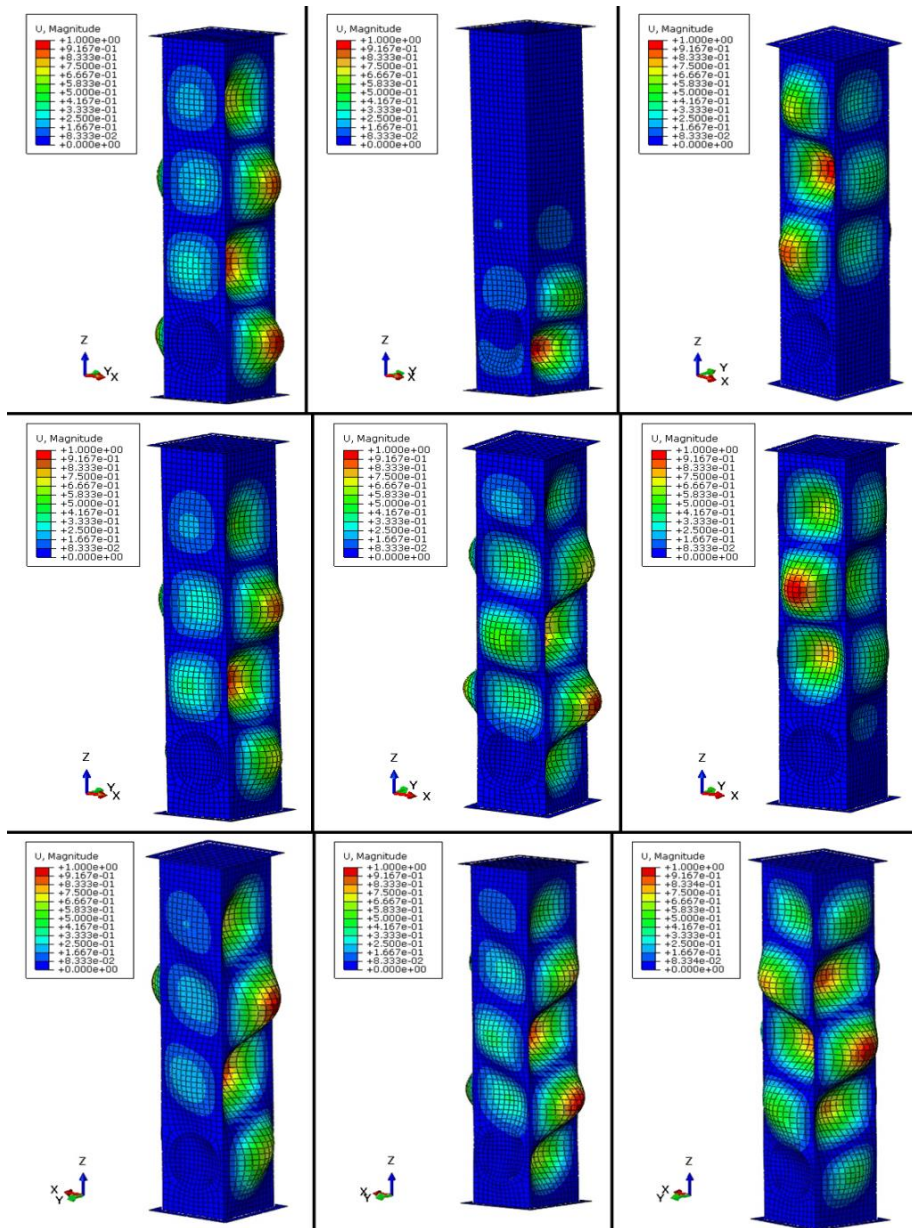
3. Metodyka modelowania MES

Z uwagi na charakter zagadnienia jako typ analizy numerycznej wybrano opcję *Buckle* w zakładce *Linear Perturbation* co pozwoliło na wyznaczenie postaci drgań własnych oraz ich częstotliwości. Operacja ta jest również wykorzystywana jako wstęp do analizy zgniotu modeli próbek, co jest przewidziane przez autorów jako cel kolejnych badań. Zważywszy na geometrię próbki oraz na prostotę modelowania wybrano elementy typu powłokowego (*ang. Shell elements*). Rozważana próbka jest profilem o przekroju kwadratowym ze stałą grubością ścianki na całej długości. W takiej sytuacji bardzo dobrze sprawdzają się elementy powłokowe, gdyż ich implementacja nie sprawia większych problemów, co więcej umożliwiają one zmianę materiału próbki, grubości ścianki czy ilości warstw bez konieczności redefiniowania siatki elementów skończonych. Przedstawione podejście istotnie poprawia wydajność obliczeń w przypadku zastosowaniu modeli złożonych z różnych materiałów lub różnej ilości warstw, jak to ma miejsce w rozważanym przypadku. Model numeryczny składa się z dwóch części oraz trzech instancji. Podstawę stanowi profil o przekroju kwadratowym na który składa się 8077 elementów powłokowych ze

zredukowanym całkowaniem S4R o wielkości ok. 2 mm każdy. Do profilu na obu końcach jest przyłożona płyta zamodelowana jako element trójwymiarowy nieodkształcalny typu discrete rigid. Powyższa instancja składa się ze 100 elementów o wymiarze ok. 5 mm każdy, są to elementy typu R3D4 – czworokąt z czterema węzłami. Zadaniem nieodkształcalnych płyt jest przypisanie warunków brzegowych. Dolna płyta służąca jako podstawa ma zablokowane wszystkie stopnie translacyjne jak i rotacyjne. Ponadto jest ona przymocowana do profilu cienkościennego za pomocą relacji Tie. Górna płyta posiadała zablokowane dwa stopnie translacyjne oraz trzy stopnie rotacyjne tak, aby odzwierciedlić działanie bijaka, a zamodelowane warunki brzegowe mogły posłużyć w dalszych analizach przy badaniu zakrytycznym profilu kompozytowego. Do punktu referencyjnego przypisanego do górnej płyty przyłożona została siła jednostkowa. Dzięki jej zastosowaniu uzyskujemy odkształcony profil, którego postać może zostać zaimplementowana do analizy dynamicznej.

4. Wyniki analizy numerycznej

Postaci wyboczenia przedstawione poniżej pozwalają zaobserwować potencjał struktury na odkształcenie podczas dynamicznej próby ściskającej. W zależności od ilości warstw oraz orientacji włókien modele numeryczne uzyskują różne wartości własne. Rys. 1 oraz Rys. 2 przedstawiają po 9 wizualizacji analizowanego zagadnienia własnego. Pierwszy wiersz przedstawia modele o 7 warstwach laminatu, drugi o 9 warstwach, zaś trzeci o 18. Ponadto w wierszu pierwszym znajdują się modele o prostym układzie warstw oznaczonym literą S (*ang. Smooth*). Drugi wiersz przedstawia układ BE (*ang. bending-extension*), zaś trzeci warstwy laminatu o układzie BT (*ang. bending-twisting*). Kolumny odpowiadają orientacji włókien, czyli kątowi θ odpowiednio 30°, 45° oraz 60°. Budowa modelu materiałowego została dokładniej opisana w rozdziale drugim. Mody przedstawione na poniższym rysunku pokazują, że modele z 18 warstwami włókien węglowych uzyskują wklęsłe oraz wypukłe powierzchnie ustawione pod kątem. Asymetryczna postać podczas analizy zakrytycznej obciążałaby znacząco jedną krawędź, przez co wytrzymałość słupa byłaby obniżona. Układ warstw wpływa także na ilość wytworzonych półfal, od dwóch do nawet pięciu.



Rys. 2. Postacie wyboczenia dla różnych układów warstw kompozytu węglowego; opracowanie własne

Zestawiając postacie wyboczenia z częstotliwościami drgań przedstawionych w Tab. 1 widać wyraźny wpływ grubości ściany, czyli ilości warstw na osiągnięte wartości. Modele uzyskują częstotliwości z zakresu 4000 do 75000 [Hz]. Tak szerokie spektrum jest związane z danymi materiałowymi kompozytu węglowego oraz sztywnością profilu, która jest zmienna wraz z kątem pochylenia włókien.

Tab. 1. Zestawienie częstotliwości drgań własnych dla kompozytu węglowego; opracowanie własne

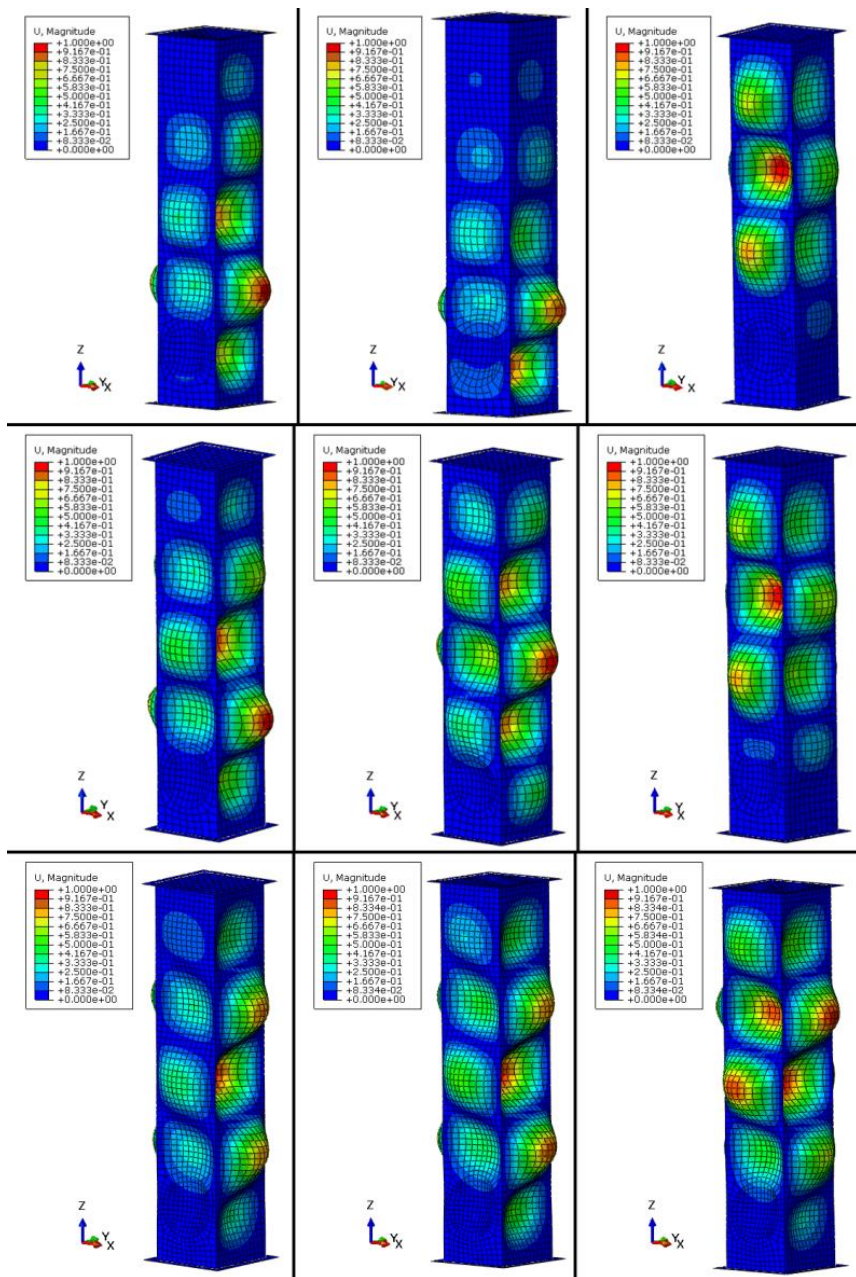
Modele	Częstotliwości drgań własnych [Hz]		
	30°	45°	60°
CFRP-7	4387,7	5766,3	5411,5
CFRP-9	9659,9	9863,3	11437
CFRP-18	50593	63779	74353

Drugą bazą modeli były profile cienkościenne wykonane z włókien szklanych w osnowie żywicy polimerowej. Włókno szklane w odróżnieniu od węglowego zwiększa plastyczność konstrukcji cienkościennej przez co częstotliwości drgań własnych przedstawione w Tab. 2 są niższe nawet o 50%. Modele wykazują podobną zależność wartości własnych od grubości ścianki profilu. Ponadto postaci z uwagi na swoją mniejszą sztywność wytwarzają więcej fałd, od trzech nawet do pięć. W zdecydowanej większości modeli jest to pięć półfal na długości profilu.

Zestawiając ze sobą modele o 18 warstwach dla materiału kompozytowego z włóknem węglowym oraz szklanym zauważamy podobne zachowanie profili podczas analizy wyboczeniowej. Wytworzone półfale uwydatniają się pod kątem co jest związane z kątem pochylenia włókien. Modele o 18 warstwach laminatu w układzie BT (Bending – twisting) uzyskują kilkukrotnie wyższe częstotliwości niż modele o układzie BE lub S.

Tab. 2. Zestawienie częstotliwości drgań własnych dla kompozytu szklanego; opracowanie własne

Modele	Częstotliwości drgań własnych [Hz]		
	30°	45°	60°
GFRP-7	2410,7	2929,6	2776,9
GFRP-9	5219,8	5339,7	5778
GFRP-18	33517	38318	40398



Rys. 3. Postacie wybożenia dla różnych układów warstw kompozytu szklanego; opracowanie własne

5. Wnioski

Powyższe opracowanie dotyczy energoabsorberów o przekroju kwadratowym. Profil cienkościenny posiadał inicjator zgniotu, który wpływał na postacie wyboczenia. Zastosowano materiał kompozytowy w postaci laminatu szklano-epoksydowego oraz węglowo – epoksydowego. Profil został poddany analizie numerycznej w postaci wyznaczenia zagadnienia własnego. Wyniki zostały przedstawione w formie wizualizacji postaci wyboczenia otrzymanych z analizy metodą elementów skończonych. Analizowane modele numeryczne wykorzystujące jako materiał kompozyt węglowy uzyskały wartości częstości własnych w zakresie 4300 – 75000 Hz. Dla próbek o układzie prostym otrzymano znacznie mniejsze częstości niż miało to miejsce w próbkach ze sprzężeniami. W modelach z układami BE oraz BT zachodziła następująca zależność: im większa wartość kąta orientacji włókien w obrębie sprzężenia tym większa częstość drgań własnych. W przeciwieństwie do próbek sprzężonych, w próbie prostej przy kącie 60° otrzymana częstość była mniejsza niż dla kąta 45° . Należy zauważyć, że częstości własne dla modeli ze sprzężeniem giętno-skrętnym osiągają wartości zbliżone lub nawet większe od częstości uzyskiwanych w klasycznych modelach energoabsorberów wykonanych z aluminium. Częstości pozostałych modeli są znacząco niższe. Identyczny układ próbek zastosowano przy kompozycie szklano – epoksydowym. Zakres częstości to 2400 – 40000 Hz co jest wynikiem znacząco mniejszym w porównaniu do próbek węglowych. Można zauważyć podobne zależności do tych występujących w kompozycie węglowo – epoksydowym. Próbki proste (S) oraz te ze sprzężeniem BE uzyskały częstości istotnie mniejsze od próbek ze sprzężeniem BT. Podobnie jak wyżej możemy zauważyć zależność pomiędzy kątem θ a częstością drgań własnych. Pomimo dużo większych częstości dla profili ze sprzężeniem BT, wartości są niższe niż przy klasycznych profilach cienkościennych wykonanych z aluminium.

Możemy zauważyć korelację pomiędzy graficzną reprezentacją postaci wyboczenia a częstościami drgań własnych. Szczególnie wyróżnia się tutaj model z włóknem węglowym o układzie prostym i kącie $\theta = 45^\circ$. Jak można zauważyć Rys. 2, na postać drgań składają się tylko dwie półfale co wyraźnie odróżnia tę próbę od pozostałych. W próbkach S oraz BE dla kąta $\theta = 60^\circ$ profil nie wykazuje odkształcenia w obrębie inicjatora zgniotu. Sytuacja ta dotyczy zarówno modelu z włóknem węglowym jak i szklanym. Ponadto profile z układem sprzężonym giętno – skrętnym wykazują duży wpływ sprzężenia na kształt postaci. Każda z półfal jest przekoszona w stosunku do wysokości profilu.

Naturalnym następstwem opisanych wyżej badań jest analiza zgniotu rozważanej próbki. Autorzy planują przeprowadzenie analizy zakrytycznej profili cienkościennych oraz badanie zniszczenia struktury kompozytowej jako kolejny cel badań naukowych. Pozwoli to określić czy materiały kompozytowe, coraz chętniej stosowane w budowie maszyn i konstrukcji,

Literatura

- [1] Pirmohammad S, Esmaeili Marzdashti S. *Crashworthiness optimization of combined straight-tapered tubes using genetic algorithm and neural networks*, Thin-Walled Struct. 127, 318–32, 2018.
- [2] Meran AP. *Solidity effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes having various cross-sectional shapes*, Int J Crashworthiness. 21(2),135–47, 2016.
- [3] Jones N, dos Reis HLM. *On the dynamic buckling of a simple elastic-plastic model*, Int J Solids Struct. 16(11), 969–89, 1980.
- [4] Kopczyński A, Rusiński E. *Passive safety. Energy absorption by thin-walled profiles*, Wrocław: Publishing House of the Wrocław University of Technology 2010, 2010.
- [5] Rogala M, Gajewski J, Ferdynus M. *Numerical analysis of the thin-walled structure with different trigger locations under axial load*, IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 710, 012028, 2019.
- [6] Reddy TJ, Rao Y V.D., Narayanamurthy V. *Thin-walled structural configurations for enhanced crashworthiness*, Int J Crashworthiness. 23(1), 57–73, 2018.
- [7] Kotełko M, Ferdynus M, Jankowski J. *Energy absorbing effectiveness–Different approaches*, Acta Mech Autom. 12(1), 54–9, 2018.
- [8] Alkhatib SE, Matar MS, Tarlochan F, Laban O, Mohamed AS, Alqwasmi N. *Deformation modes and crashworthiness energy absorption of sinusoidally corrugated tubes manufactured by direct metal laser sintering*, Eng Struct. 201, 109838, 2019.
- [9] Xu F, Zhang X, Zhang H. *A review on functionally graded structures and materials for energy absorption*, Engineering Structures, 2018.
- [10] Kubiak T. *Static and dynamic buckling of thin-walled plate structures*, Vol. 9783319006, Static and Dynamic Buckling of Thin-Walled Plate Structures, 1–188, 2013.
- [11] Jones N. *Structural Impact*, Journal of Chemical Information and Modeling, Cambridge University Press 53, 1689–1699, 1990.
- [12] Paśnik J, Samborski S, Rzeczkowski J. *Application of the CZM Technique to Delamination Analysis of Coupled Laminate Beams*, IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 416, 012075, 2018.
- [13] Samborski S, Rzeczkowski J, Paśnik J. *A study on delamination onset and propagation in CFRP beam specimens with mechanical coupling*, In: Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications. CRC Press, 602–5, 2019.
- [14] Samborski S. *Numerical analysis of the DCB test configuration applicability to mechanically coupled Fiber Reinforced Laminated Composite beams*, Compos Struct. 152, 477–87, 2016.
- [15] Debski H, Rozyło P, Teter A. *Buckling and limit states of thin-walled*

- composite columns under eccentric load*, Thin-Walled Struct. 149, 106627, 2020.
- [16] Różyło P, Debski H. *Effect of eccentric loading on the stability and load-carrying capacity of thin-walled composite profiles with top-hat section*, Compos Struct. 245(April):112388, 2020.
 - [17] Różyło P. *Stateczność i stany graniczne ściskanych cienkościennych profili kompozytowych*, 2019. 2019.
 - [18] Wysmulski P, Debski H, Falkowicz K. *Stability analysis of laminate profiles under eccentric load*, Compos Struct. 238, 111944, 2020.
 - [19] Ferdynus M, Rogala M. *Numerical Crush Analysis of Thin-Walled Aluminium Columns with Square Cross-Section and a Partial Foam Filling*, Adv Sci Technol Res J. 13(3), 144–51, 2019.
 - [20] Ferdynus M, Kotełko M, Urbaniak M. *Crashworthiness performance of thin-walled prismatic tubes with corner dents under axial impact–Numerical and experimental study*, Thin-Walled Struct. 144, 2019.
 - [21] Ravi Sankar H, Parameswaran V. *Effect of circular perforations on the progressive collapse of circular cylinders under axial impact*, Int J Impact Eng. 122, 346–62, 2018.
 - [22] Pang T, Zheng G, Fang J, Ruan D, Sun G. *Energy absorption mechanism of axially-varying thickness (AVT) multicell thin-walled structures under out-of-plane loading*, Eng Struct. 196, 109130, 2019.
 - [23] Wang Z, Jin X, Li Q, Sun G. *On crashworthiness design of hybrid metal-composite structures*, Int J Mech Sci. 2020.
 - [24] Samborski S, Valvo PS. *Numerical and analytical modeling of the end-loaded split (ELS) test specimens made of multi-directional coupled composite laminates*, AIP Conf Proc. 1922, 2018.

Poprawa efektywności energetycznej poprzez optymalną konfigurację sieci SN

Streszczenie: Efektywność energetyczna jest ważnym zagadnieniem w dziedzinie elektroenergetyki. Poprawa efektywności energetycznej jest wymogiem stawianym przez politykę energetyczną państwa. Zalecane jest ciągle dążenie do zwiększenia efektywności energetycznej na każdym etapie działalności przemysłu elektroenergetycznego. W artykule przedstawiono proces optymalizacji konfiguracji sieci SN, jako jeden ze sposobów na poprawę efektywności energetycznej. Przeprowadzono badania optymalizacyjne, których celem była poprawa efektywności energetycznej w sieci dystrybucyjnej średniego napięcia współpracującej z generacją rozproszoną.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, optymalizacja, rekonfiguracja sieci, minimalizacja strat mocy, sieć średniego napięcia

Improving energy efficiency through optimal SN network configuration

Abstract: Energy efficiency is an important issue in the field of power engineering. Improving energy efficiency is a requirement set by the state's energy policy. It is recommended to constantly strive to increase energy efficiency at every stage of the electricity industry's activity. The article presents the process of optimizing the MV network configuration as one of the ways to improve energy efficiency. Optimization tests were carried out, the aim of which was to improve energy efficiency in the medium voltage distribution network cooperating with the distributed generation.

Keywords: energy efficiency, optimization, network reconfiguration, minimization of power losses, medium voltage network

1. Wprowadzenie

Poprawa efektywności energetycznej jest jednym z kluczowych zagadnień w dziedzinie elektroenergetyki. Potrzeba zwiększania efektywności energetycznej wynika bezpośrednio z prawa krajowego i jest celem strategicznym i ekologicznym polityki energetycznej państwa. Kwestia efektywności energetycznej jest traktowana priorytetowo, bowiem postęp w tej dziedzinie ma duże znaczenie w realizacji wszystkich celów polityki energetycznej państwa i większości celów polityki ekologicznej i klimatycznej. Efektywność energetyczna jest złożonym procesem politycznym, gospodarczym i społecznym,

*karolsidor11@wp.pl, Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

stanowi bowiem jeden z głównych czynników rozwoju przedsiębiorczości i innowacyjności.

Efektywność energetyczna odnosi się do sprawności zarządzania energią oraz skuteczności jej wykorzystywania w związku z tym efektywność energetyczną możemy wyrazić następującym wzorem:

$$E_e = \frac{E_u}{E_d}$$

gdzie:

E_e – wskaźnik efektywności energetycznej,

E_u – energia użyteczna,

E_d – energia dostarczona.

Obowiązek zwiększania efektywności energetycznej wynika również z prawa unijnego, Polska, jako kraj członkowski zobowiązana jest również do realizacji unijnej polityki energetycznej. Podnosząc efektywność energetyczną przyczyniamy się do wzrostu bezpieczeństwa energetycznego kraju, zmniejszenia zapotrzebowania kraju na paliwa i energię a także zmniejszenia emisji zanieczyszczeń powietrza, przez co złagodzimy zmiany klimatyczne. Poprawa efektywności energetycznej zapewni zmniejszenie kosztów wytwarzania poprzez zmniejszenie zużycia energii pierwotnej, dlatego przedsiębiorstwa dystrybucyjne zobowiązane są do racjonalnego wykorzystywania energii elektrycznej. Obowiązki Operatorów Systemów Dystrybucyjnych w zakresie efektywności energetycznej specyfikuje ustawa z dnia 20 maja 2016 roku w sprawie efektywności energetycznej [1]. W ustawie tej wskazano wiele przedsięwzięć mających na celu poprawę efektywności energetycznej między innymi:

- izolacja instalacji przemysłowych,
- przebudowa instalacji wraz z urządzeniami technicznymi,
- odzysk energii w procesach przemysłowych,
- ograniczenie strat związanych z poborem energii biernej,
- ograniczenie strat w infrastrukturze sieciowej,
- ograniczenie strat w transformatorach energetycznych.

W praktyce poprawa efektywności energetycznej może być realizowana na różne sposoby między innymi poprzez wdrażanie przez Operatorów Systemów Dystrybucyjnych programów do ograniczania strat, a także poprzez zastosowanie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych do budowy przewodów elektroenergetycznych. Jednym ze sposobów na poprawę efektywności

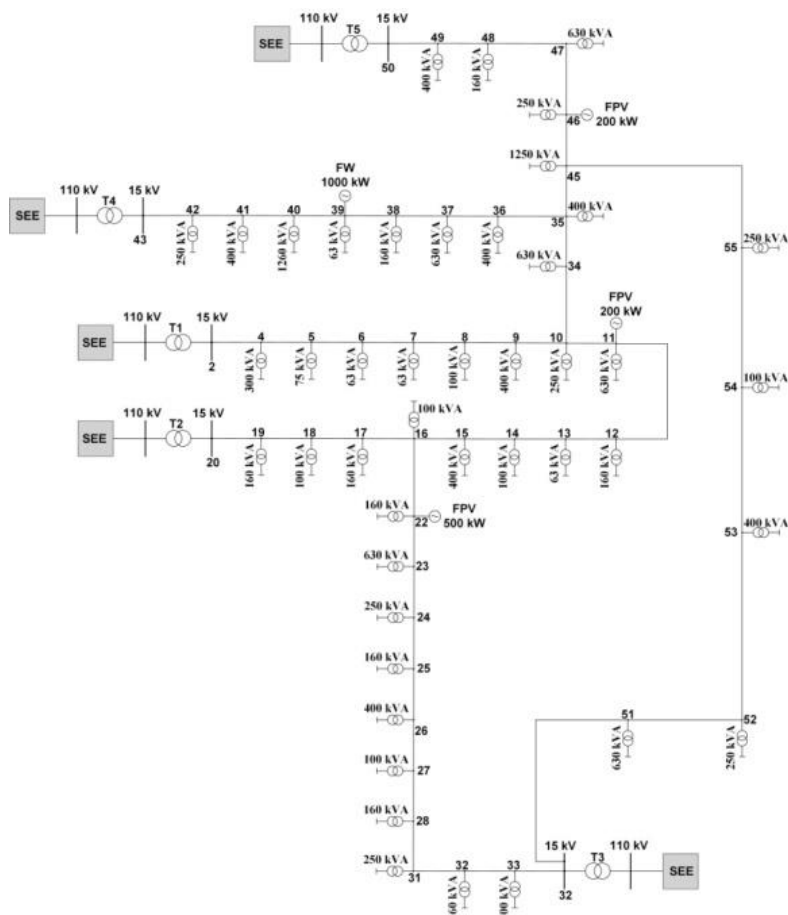
energetycznej jest optymalizacja konfiguracji sieci elektroenergetycznej, która stanowi temat tego artykułu [2].

2. Optymalizacja konfiguracji sieci

Tematyka optymalnej konfiguracji sieci elektroenergetycznej jest zagadnieniem, które dotychczas było szeroko opisywane w literaturze, jednakże problem optymalnej konfiguracji sieci staje się bardziej złożony w przypadku współpracy systemu elektroenergetycznego z generacją rozproszoną [3,4]. Zadanie optymalizacji konfiguracji sieci można traktować, jako optymalizację jedno lub wielokryterialną. W przypadku optymalizacji jednokryterialnej funkcją celu jest minimalizacja strat mocy lub energii. Możliwe jest również rozpatrywanie innych funkcji celu takich jak: redukcja przeciążeń czy poprawa profilów napięciowych linii zasilających, jednakże już sama minimalizacja strat energii przyczynia się do poprawy pracy sieci także według tych kryteriów. W przypadku minimalizacji strat mocy proces optymalizacji konfiguracji sieci polega na wyznaczeniu takiej lokalizacji punktów podziału sieci, tzw. „punktów rozcięć”, dla których straty mocy czynnej w sieci są najmniejsze [5]. W rozwiązywaniu zadań optymalizacji konfiguracji sieci średniego napięcia najczęściej wykorzystuje się specjalistyczne algorytmy meta-heurystyczne takie jak: algorytmy genetyczne, algorytmy symulowanego wyżarzania algorytmy rojowe i inne [6,7]. Dotychczas w procesie optymalizacji konfiguracji sieci nie rozważano wnikliwie przypadku współpracy systemu elektroenergetycznego z odnawialnymi źródłami energii. Obecność coraz większej liczby źródeł generacji rozproszonej w sieciach średniego napięcia powoduje dużą dynamikę zmian warunków pracy sieci. Nieprzewidywalny i zmienny charakter pracy odnawialnych źródeł energii wywiera duży wpływ na system elektroenergetyczny powodując zmiany w rozptywach mocy. Niestabilność produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii może stanowić poważny problem dla sieci elektroenergetycznych średniego napięcia charakteryzujących się licznymi rozgałęzieniami.

W związku z tym wyznaczenie optymalnej konfiguracji sieci średniego napięcia współpracującej z generacją rozproszoną staje się zagadnieniem bardziej skomplikowanym ze względu na zmiany generacji ze źródeł rozproszonych spowodowane zmianą nasłonecznienia lub wietrzności [8] a także niewystarczającym opomiarowaniem sieci średniego napięcia uniemożliwiającym pełne odwzorowanie zmian zapotrzebowania w głębi sieci. W niniejszym artykule przedstawiono proces optymalizacji konfiguracji sieci średniego napięcia współpracującej z odnawialnymi źródłami energii.

Badania optymalizacyjne przeprowadzono na zmodyfikowanym fragmencie rzeczywistej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia. Model sieci został odwzorowany w programie PowerWorld Simulator, który wykorzystano do obliczania rozptyłów mocy. Sieć przyjęta do badań zbudowana jest z 5 stacji GPZ 110/15 kV. W sieci zainstalowano transformatory o mocy 16 MVA każdy. W sieci występują głównie linie napowietrzne wykonane przewodami ALF 6–70 o łącznej długości ponad 100 km. W modelu odwzorowano 50 stacji SN/nn ponad 60 odcinków linii o łącznej długości około 100 km a także ponad 60 węzłów. Dodatkowo sieć współpracuje z generacją rozproszoną, do której należą trzy farmy fotowoltaiczne o następujących mocach: 200 kW, 400 kW oraz 600 kW a także farna wiatrowa o mocy 1 MW. Model sieci przyjęty do badań został przedstawiony na Rys. 1.



Rys. 1. Model sieci testowej przyjęty do badań; opracowanie własne

Celem optymalizacji konfiguracji sieci była poprawa efektywności energetycznej poprzez ograniczenie strat mocy w sieci. Problem optymalizacyjny polegał na ograniczeniu strat technicznych w sieci współpracującej z odnawialnymi źródłami energii [9].

Badania optymalizacyjne przeprowadzono dla 5 wybranych wariantów pracy sieci, które różnią się między sobą liczbą przyłączonych źródeł generacji rozproszonej. Zestawienie wariantów pracy sieci przedstawiono w tabeli poniżej.

Tab. 1. Zestawienie wariantów pracy sieci (X-źródło pracuje)

Opcja	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4	Wariant 5
Źródło FW 1MW	X	X	X	X	X
Źródło PV 200kW		X	X	X	X
Źródło PV 400kW			X	X	X
Źródło PV 600kW				X	X

W analizowanym fragmencie sieci dystrybucyjnej znajduje się 5 stałych punktów podziału sieci, które zlokalizowane są pomiędzy następującymi węzłami: 10–11, 17–18, 27–28, 34–35, 45–46

3. Algorytm optymalizacyjny

Proces optymalizacji konfiguracji sieci średniego napięcia dla modelu testowego przeprowadzono w środowisku MATLAB, w którym został napisany skrypt realizujący obliczenia optymalizacyjne z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego Cuckoo Search (przeszukiwanie kukułcze). Optymalizacja została wykonana z wykorzystaniem serwera automatyzacji (SimAuto) wbudowanego w oprogramowanie PowerWorld Simulator, w którym przygotowano model sieci do badań. SimAuto umożliwia rozszerzenie funkcjonalności programu PowerWorld Simulator i wykorzystanie algorytmu z dowolnego programu zewnętrznego, zezwalając jednocześnie na dostęp do danych, umożliwiając wykonywanie określonych funkcji a także wysyłanie wyników do symulatora lub dowolnego arkusza kalkulacyjnego.

W środowisku MATLAB został napisany skrypt, który poprzez serwer automatyzacji (SimAuto) współpracuje z oprogramowaniem PowerWorld Simulator realizując obliczenia optymalizacyjne.

Omawiany skrypt realizuje następujące czynności:

- połączenie z serwerem automatyzacji (SimAuto),
- wczytanie modelu testowego,
- obliczenie rozprężu mocy,
- modyfikacja danych,
- optymalizacja algorytmem Cuccko Search,
- zapis wyników.

Algorytm Cuccko Search jest metodą optymalizacji stochastycznej, który naśladuje zachowania pewnych gatunków kukulek pasożytniczych, które podrzucają swoje jaja do gniazd innych ptaków. Algorytm ten należy do meta heurystycznych algorytmów, charakteryzujących się dużą skutecznością w rozwiązywaniu złożonych problemów [10]. Schemat ogólny algorytmu Cuccko Search przedstawiono poniżej.

begin

Wylosuj początkową populację **n** gniazd

while ($x < \text{MaxLiczbaPokoleń}$)

Wybierz losowo kukulkę przez lot Levy'ego i oceń **f(x)**

Wybierz losową kukulkę spośród **n** kukulek (**f_j**)

if ($f_i > f_j$) **then**

Podstaw za j-tą nową wartość

Część p_a słabych gniazd opuszczono w celu zbudowania nowego

Zapamiętaj najlepsze gniazdo

Utwórz ranking osobników z populacji

end

end

Algorytm Cuccko Search opiera się na 4 regułach:

1. każda kukulka składa jajo w czasie w losowo wybranym gnieździe,
2. najlepsze gniazda (najlepsze rozwiązania) przechodzą do następnej iteracji,
3. liczba dostępnych gniazd jest zawsze stała,
4. rozpoznawanie obcego jaja odbywa się z prawdopodobieństwem $p_a=(0,1)$.

Algorytm Cuccko Search może zostać rozszerzony o mechanizm „lotów Leve’go”, czyli wykonywania skoków w oparciu o rozkład Leve’go. Strategia ta jest bardzo skuteczna w eksploracji dużych obszarów wyszukiwania. Wynika to głównie z wariancji „lotów Leve’go”, które mogą zmniejszyć liczbę iteracji algorytmu w porównaniu do standardowych kroków losowych. Wybór algorytmu Cuccko Search do rozwiązywania problemu optymalizacji konfiguracji sieci podyktowany był wysoką skutecznością, odpornością przeszukiwania przestrzeni rozwiązań a także badaniami, które sugerują, że algorytm ten może przewyższać inne popularne algorytmy. Ponadto algorytm Cuccko Search wykazuje dużą skuteczność w rozwiązywaniu problemów z dziedziny elektroenergetyki a także jest stosunkowo łatwy w implementacji.

W przeprowadzonych badaniach uwzględniono zmienność obciążenia stacji transformatorowych średniego napięcia a także losowość generacji z odnawialnych źródeł energii zainstalowanych w systemie. W badaniach założono, że zarówno generacja jak i odbiory podlegają rozkładowi normalnemu, przy czym moc generowana będzie się zmieniała w zakresie od 0 do 100% maksymalnej mocy natomiast moc odbierana będzie się zmieniała w zakresie od 10 do 100% mocy maksymalnej. W omawianym skrypcie z użyciem generatorów liczb losowych zrealizowano te założenia. Ponadto do badań przyjęto następujące założenia: zróżnicowany poziom obciążenia wszystkich odbiorów, zróżnicowany poziom mocy generatorów odnawialnych źródeł energii, podział sieci możliwy do zrealizowania we wszystkich jej odcinkach.

4. Wyniki badań

Przeprowadzono badania optymalizacyjne dla wybranych wariantów pracy sieci. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono dla każdego wariantu pracy sieci optymalną lokalizację punktów podziału. Zestawienie optymalnych lokalizacji punktów podziału sieci przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Zestawienie optymalnych lokalizacji punktów podziału sieci dla każdego z wariantów

Wariant pracy sieci	Lokalizacja 1	Lokalizacja 2	Lokalizacja 3	Lokalizacja 4	Lokalizacja a 5
Wariant 1	7–8	18–19	30–31	36–37	48–49
Wariant 2	8–9	14–15	30–31	36–37	48–49
Wariant 3	8–9	18–19	30–31	41–42	48–49
Wariant 4	8–9	17–18	30–31	37–38	48–49

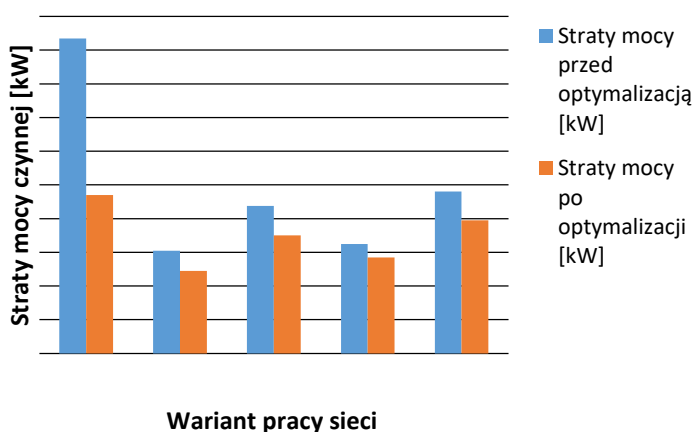
Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że lokalizacja optymalnych punktów podziału sieci zmienia się dynamicznie. Dla każdego z wariantów pracy sieci punkty podziału są różne od pierwotnie zakładanych. Przy czym można dostrzec, że nie wszystkie punkty podziału sieci ulegają dynamicznej zmianie. Jest to zależne od mocy źródła oraz miejsca jego przyłączenia do systemu. W analizowanym przykładzie lokalizacja 3 i 5 punktu podziału sieci praktycznie nie ulega zmianie może być to spowodowane tym, że w pobliżu tych miejsc podziału sieci nie znajduje się generacja rozproszona lub jej wpływ na to miejsce podziału sieci jest niewielki. Natomiast pozostałe miejsca podziału sieci w zależności od wariantu pracy sieci i warunków sieciowych dynamicznie zmieniają swoją lokalizację. W prezentowanym przykładzie to właśnie te punkty są strategicznymi miejscami, które należałoby kontrolować i dokonywać przełączeń w celu zapewnienia optymalnej konfiguracji sieci. Zapewnienie optymalnej konfiguracji sieci jest kluczowe w procesie zwiększania efektywności energetycznej. Przedstawione wyniki badań pokazują, w jaki sposób odnawialne źródła energii wpływają na system elektroenergetyczny. Współpraca odnawialnych źródeł energii z systemem elektroenergetycznym powoduje większą dynamikę zmian w rozpiętkach mocy, co wpływa znacząco na straty mocy w sieci a także może powodować zmianę lokalizacji optymalnych miejsc podziału sieci.

W Tab. 3 przedstawiono zestawienie strat mocy czynnej dla poszczególnych wariantów pracy sieci przed i po optymalizacji.

Tab. 3. Zestawienie strat mocy czynnej przed i po optymalizacji dla każdego z wariantów pracy sieci

Wariant pracy sieci	Straty mocy przed optymalizacją [kW]	Straty mocy po optymalizacji [kW]
Wariant 1	187	94
Wariant 2	61	49
Wariant 3	87,5	70
Wariant 4	65	57
Wariant 5	96	79

W przeprowadzonych badaniach dla każdego z wariantów pracy sieci dokonano kontroli strat mocy czynnej. W każdym analizowanym przypadku zastosowanie optymalizacji konfiguracji sieci pozwoliło na ograniczenie strat związanych z przesyłem energii elektrycznej. Największa różnica w stratach mocy wystąpiła w pierwszym wariantcie pracy sieci, gdzie przyłączono farmę wiatrową o mocy 1MW. W tym przypadku straty mocy po optymalizacji i zmianie lokalizacji punktów podziału sieci były niemalże dwukrotnie mniejsze. Na rysunku poniżej przedstawiono w sposób graficzny wyniki badań optymalizacyjnych.



Rys. 2. Wykres strat mocy dla poszczególnych wariantów pracy sieci; opracowanie własne

5. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników z przeprowadzonych badań optymalizacyjnych można stwierdzić, że proces optymalizacji konfiguracji sieci znacząco przyczynia się do ograniczenia strat mocy w sieci a tym samym powoduje poprawę efektywności energetycznej. Przeprowadzone badania potwierdzają, że stałe punkty podziału sieci nie są optymalnym rozwiązaniem. Zalecane jest, aby lokalizacja punktów podziału sieci zmieniała się dynamicznie celem ograniczenia strat związanych z przesyłem i dystrybucją energii elektrycznej. W analizowanym fragmencie sieci dystrybucyjnej średniego napięcia zastosowanie optymalizacji punktów rozcięć pozwoliło na ograniczenie strat nawet o 45%. Optymalizacja konfiguracji sieci dystrybucyjnej jest jednym z najczęściej wskazywanych działań na ograniczenie strat sieciowych [11,12]. Rozwiązanie to wpływa na poprawę funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, poprawia efektywność energetyczną a także pośrednio przyczynia się do obniżenia kosztów związanych ze stratami energii w systemie elektroenergetycznym. Obniżenie strat energii w konsekwencji spowoduje możliwość obniżenia składników zmiennej stawki sieciowej i spowoduje obniżenie opłat za usługi dystrybucji. Zatem zalecane jest, aby proces rekonfiguracji sieci odbywał się dynamicznie zgodnie z warunkami aktualnie panującymi w sieci [13]. Przy czym istotny jest stopień nasycenia sieci łącznikami zdalnie sterowanymi, gdyż zmiany punktów podziału sieci mogą zachodzić jedynie pomiędzy tymi lokalizacjami, których występują łączniki tego typu. Jednym z istotnych problemów przy przeprowadzaniu procesu optymalizacji konfiguracji sieci jest oszacowanie obciążeń poszczególnych stacji transformatorowych a także oszacowanie mocy z generacji rozproszonej współpracującej z systemem elektroenergetycznym. Przyłączenie coraz większej liczby odnawialnych źródeł energii do systemu elektroenergetycznego powoduje wzrost dynamiki warunków pracy sieci. Pomocne w tym przypadku mogą okazać się metody probabilistyczne przy użyciu, których możemy precyzyjnie oszacować wartości, które mają zmienny charakter. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie rekonfiguracji sieci elektroenergetycznej z zastosowaniem aktualnych pomiarów. Skuteczność rekonfiguracji sieci w rzeczywistym układzie sieciowym zależy od indywidualnych cech i właściwości sieci. Jednakże podobne badania wykazują, że rekonfiguracja sieci jest skutecznym sposobem na obniżenie strat mocy w sieci, poprawę warunków sieciowych, a także zwiększenie efektywności energetycznej.

Literatura

- [1] <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20160000831/U/D20160831Lj.pdf>, (dostęp: 25.04.2020).
- [2] Kąkol A., *Wpływ wybranych koncepcji rekonfiguracji sieci średniego napięcia na poziom strat energii*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 53, 2017.
- [3] Sidor K., Miller P., Pijarski P., *Zastosowanie optymalizacji konfiguracji sieci do redukcji kosztów strat energii elektrycznej*, Przegląd Elektrotechniczny 10, 110–113, 2019.
- [4] Sidor K., Pijarski P., Miller P., *Influence of RES sources on the location of distribution points in the MV network*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 1666–1673, 2019.
- [5] Helt P., Zduńczyk P., *Optymalizacja konfiguracji dla sieci rozdzielczych SN i nn*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 33, 2013.
- [6] Michalewicz Z., Fogel D. B., *Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2006.
- [7] Stadnicki J., *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2006.
- [8] Koziel S., Siluszyk, M., Galias, Z., *Zastosowanie modelu pogodowego w optymalizacji lokalizacji punktów rozcięć w sieciach dystrybucyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 117–122, 2019.
- [9] Pijarski, P., *Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2019.
- [10] Zhu J., *Optimization of power system operation*, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [11] Kot A., Kulczycki J., Szpyra W., *Możliwości redukcji strat w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia poprzez optymalną lokalizację rozcięć*, Acta Energetica 2, 43–59, 2009.
- [12] Helt P., Zduńczyk P., *Możliwości optymalizacji konfiguracji rozległych sieci dystrybucyjnych SN i nN*, Przegląd Elektrotechniczny 9, 2014.
- [13] Rekowski R., *Problematyka doboru współczynnika czułości algorytmu rekonfiguracji sieci dystrybucyjnej SN*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 53, 2017.

Systemy diagnostyki czerniaka oparte o selekcję cech

Streszczenie: Częstość występowania raka skóry, szczególnie czerniaka złośliwego stale rośnie na całym świecie. Obecnie wielu naukowców pracuje nad opracowaniem skutecznych systemów diagnostyki czerniaka skóry. Bardzo istotnym elementem jest selekcja cech zmian skórnych. Wybór najistotniejszych cech pomaga skuteczniej sklasyfikować zmianę.

Słowa kluczowe: melanoma, ekstrakcja i selekcja cech, metody klasyfikacji, obrazy dermatoskopowe

Melanoma diagnostics systems based on feature selection

Abstract: The incidence of skin cancer, especially malignant melanoma, is steadily increasing worldwide. Many scientists are currently working on developing effective skin melanoma diagnostic systems. A very important element is the selection of features of skin lesions. The selection of the most important features helps to better classify lesions.

Keywords: melanoma, feature extraction and selection; classification methods dermoscopic image

1. Wstęp

Czerniak jest uważany za jeden z najbardziej śmiertelnych typów raka skóry, którego częstotliwość występowania wzrosła w ciągu ostatnich kilku lat [1]. Wcześniejsze rozpoznanie znacznie zwiększa jednak szanse przeżycia pacjentów. Jeśli taki rak nie jest leczony na wczesnym etapie, może być śmiertelny. Rak skóry jest uważany za jeden z najczęstszych rodzajów raka, a jego zapadalność wzrosła w ostatnich latach. Przypadki czerniaka spowodowały rosnącą liczbę zgonów na całym świecie, ponieważ ten typ raka skóry jest najbardziej agresywny w porównaniu do innych typów.

W poszukiwaniu efektywnego sposobu wykrycia czerniaka zaproponowano kilka metod komputerowych [2–4], zdolnych do diagnozowania zmian skórnych na początkowych etapach. Opracowano metody obliczeniowe, aby pomóc dermatologom we wczesnej diagnostyce raka skóry [5]. W rozdziale zostały

*mmagdamichalska@gmail.com, Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych,
Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

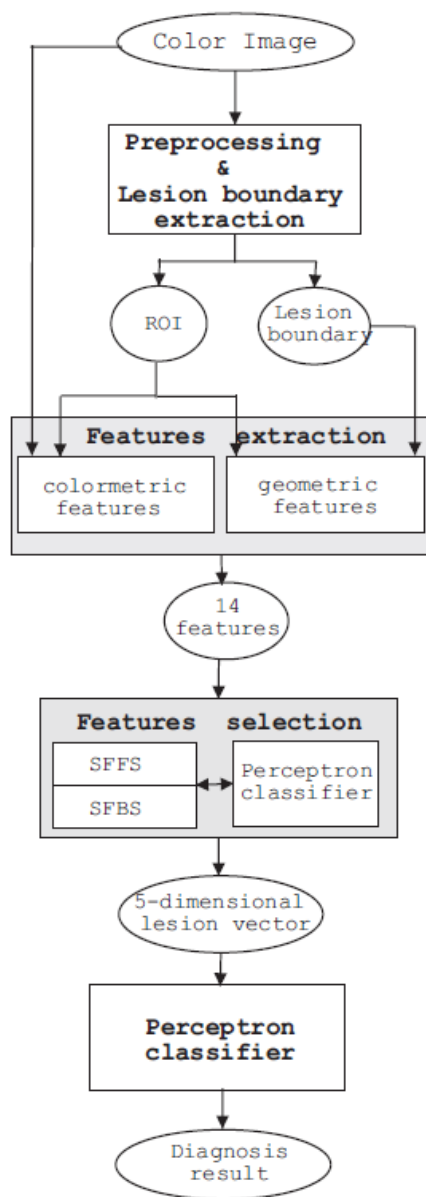
opisane podstawy działania systemów komputerowych oparte o selekcję, algorytmy wyboru cech oparte o różne narzędzia.

2. Podstawy działania systemów opartych o selekcję

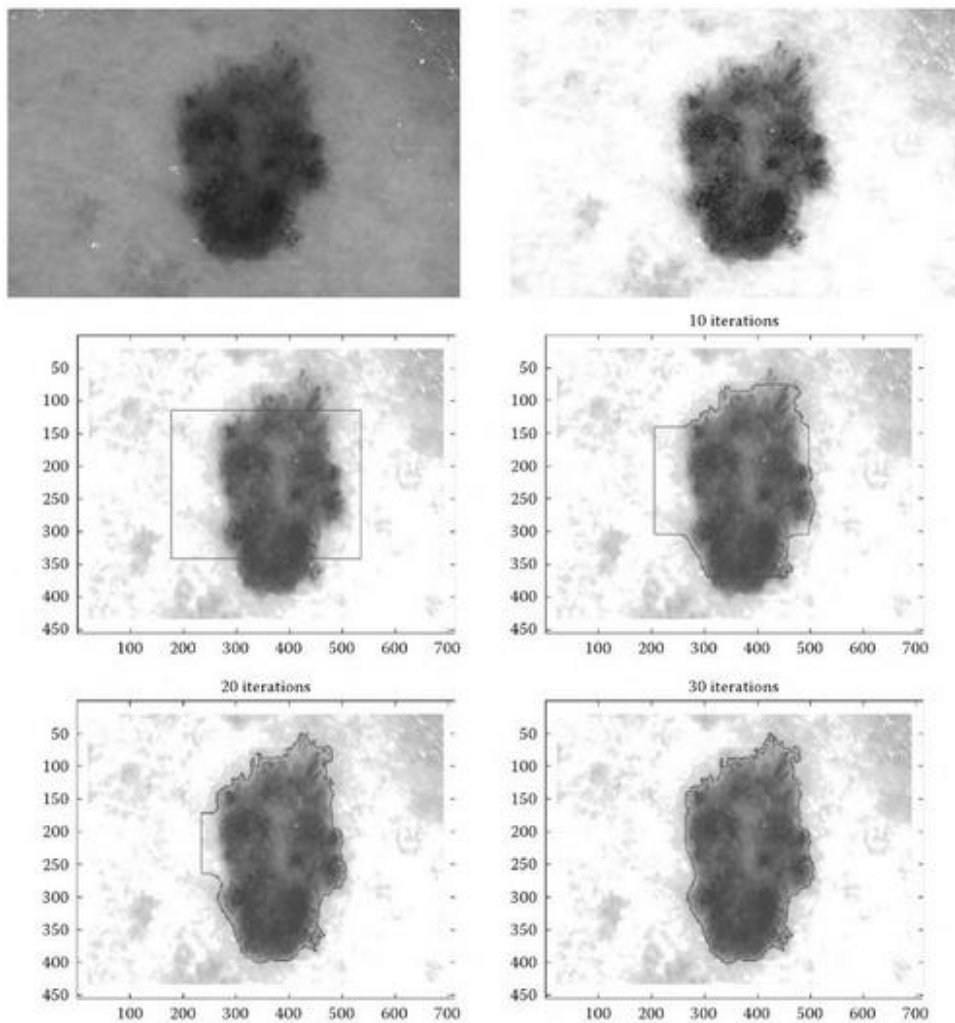
System komputerowy oparty na technikach przetwarzania obrazu i wizji komputerowej, posiadający dobrą zdolność diagnostyczną, może zapewnić ilościową ocenę przypadków raka skóry. Obecnie tworzone systemy oparte są o kolorowe obrazy dermatoskopowe z obszernej bazy danych lub kilku mniejszych, wybrane skuteczne metody przetwarzania wstępnego obrazu, wybór obszarów zainteresowania (ROI) i segmentacji zmian skórnych z całego obrazu. Następnie wybierane są porządane cech. Obecnie efektywne funkcje ekstrakcji cech bazują o geometrię [6,8], kolor [9] czy transformatę falkową. W [10] kolorowe obrazy dermatoskopowe po detekcji interesujących badaczy zmian skórnych poddawane są funkcjom ekstrakcji koloru i geometrii. Cały proces proponowanego rozwiązania znajduje się na Rys. 1. Aby przystąpić do tych czynności ważne jest zmniejszenie ilości przetwarzanych danych. W tym celu należy wyodrębnić zbiór liczbowy funkcji modelowania objawów klinicznych złośliwej zmiany i wybrać mniejszą liczbę funkcji. Ten krok pozwala zmniejszyć wymiar wektora zmiany bez utraty informacji o jego złośliwości.

Na Rys. 2 przedstawiono przykład algorytmu opartego o geometrię zmiany skórnej. Każde kolejne jego kroki pozwalają dokładnie odwzorować kształt zmiany [11].

Połączenie różnych kryteriów jest kluczem do wczesnego wykrycia złośliwego czerniaka. Przeanalizowana została powierzchnia zmiany pod kątem parametrów podziału powierzchni zmian na losowo wybranych obrazach zmian złośliwych i łagodnych Rys.3[10].

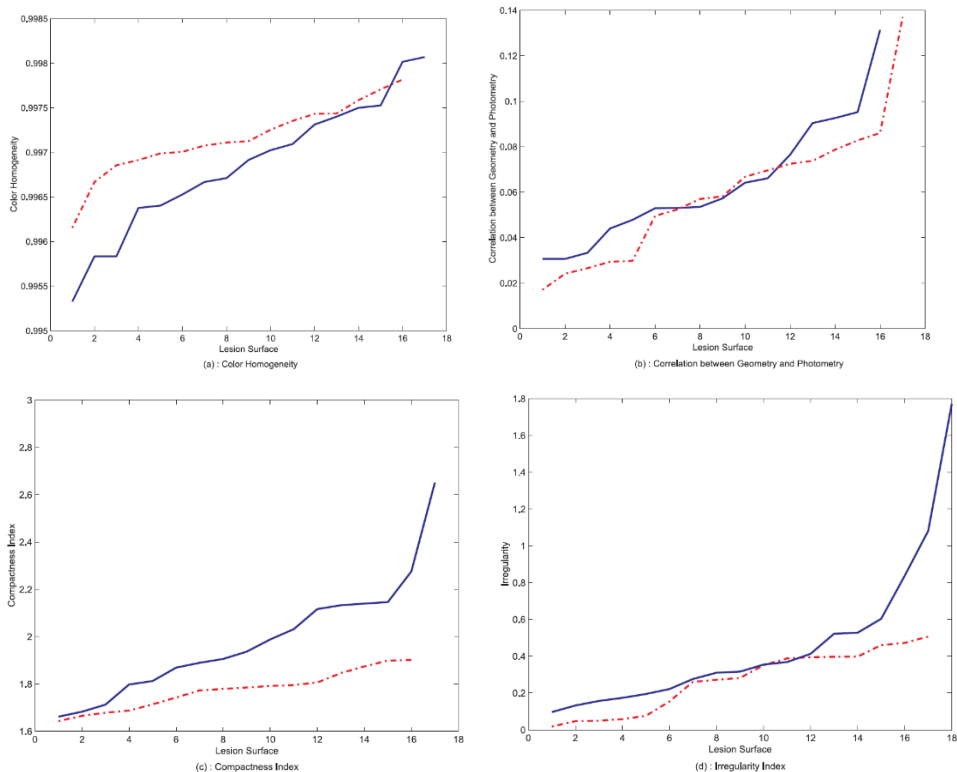


Rys. 1. Schemat proponowanego algorytmu działania [10]



Rys. 2. Wyniki segmentacji algorytmu wykorzystującego aktywne kontury

Źródło: Argenziano G., Soyer H .P., De Giorgi, V., Piccolo, D., Carli, P., Delfino, M., Dermatoscopy: A Tutorial, EDRA Medical Publishing and New Media, Milan, 2002



Rys. 3. Rozkład niektórych atrybutów w stosunku do łagodnych zmian „czerwona linia przerywana” i złośliwych zmian „niebieska linia ciągła” [10]

Zmiany łagodne różnią się od złośliwych pod względem wybranych charakterystycznych atrybutów. Analizowana jednorodność i wybrane cechy koloru (Rys. 3a) mają zwykle podwyższone wartości w przypadku łagodnych zmian skórnych. Dla innych atrybutów również można wysnuć podobny wniosek. Jednak zdarzają się przypadki niejednoznaczne. Konieczne staje się do wykonanie kombinacji zestawu odpowiednich atrybutów w celu uzyskania dokładnej klasyfikacji zmiany.

3. Algorytmu wyboru cech

Proces wyboru funkcji ma na celu znalezienie najlepszego podzbioru funkcji w celu wygenerowania zestawu klasyfikatorów. Algorytmy wyboru cech są kombinacją metod wyszukiwania i oceny. Można zastosować metody wyszukiwania, aby wybrać kandydujący podzbiór spośród wyodrębnionych cech zmian skórnych. Jest on następnie oceniany i porównywany z poprzednim

najlepszym podzbiorem, aż do osiągnięcia określonego kryterium. Po tym etapie zatrzymuje się ten proces.

W badaniu [12] zastosowano sześć algorytmów wyboru cech w celu wygenerowania różnych podzbiorów dla zespołu klasyfikatorów. Zastosowano współczynnik korelacji Pearsona, wybór cech na podstawie współczynnika wzmocnienia (GRFS) [13], wybór funkcji na podstawie wzmocnienia informacji, relief-F, analizę głównych składników (PCA) oraz wybór funkcji oparty na korelacji (CFS). Algorytmy te są powszechnie stosowane do wybierania cech zmian skórnych, ponieważ mają one szereg zalet. Należy do nich przede wszystkim wydajność obliczeniowa. Dodatkowo są prostymi i szybkimi algorytmami, niezależnymi kryteriami oceny i mają zdolność przewyższenia nadmiernego dopasowania.

W badaniu [12] przyjęto zarówno chciwe, jak i najlepsze metody pierwszego wyszukiwania. Chciwe metody wyszukiwania krokowego zawierają podzbiory w kierunku do przodu lub do tyłu w zachłanny sposób. Proces selekcji musi zostać zatrzymany, gdy nastąpi dodanie lub usunięcie dowolnej funkcji. Funkcja ta pogarsza wynik podzbioru do tego momentu. Najlepsza pierwsza metoda wyszukuje podzbiory funkcji, a kierunek wyszukiwania może być do przodu, do tyłu lub dwukierunkowy. Proces wyboru do przodu rozpoczyna się od pustego zestawu, a najlepsze funkcje są stopniowo dodawane do zestawu, zgodnie co do wydajności uzyskanej z metody oceny. Proces selekcji wstecznej rozpoczyna się od wszystkich cech, a najgorsze cechy są usuwane przy każdej iteracji algorytmu.

3.1. Analiza wzorców

W przeglądzie [15] omówiono przegląd głównych i obecnych metod obliczeniowych, które zostały zaproponowane do analizy wzorów i klasyfikacji zmian pigmentacyjnych skóry. Ponadto przewidziano dyskusję na temat zastosowania takich metod, a także przyszłych trendów. Wprowadzono i omówiono kilka metod ekstrakcji cech z obrazów makroskopowych i dermoskopowych oraz modeli wyboru cech. Ponadto opisano algorytmy klasyfikacji i procedury oceny oraz podano wyniki dotyczące klasyfikacji zmian [16] i analizy wzorów.

Głównym celem artykułu [17] jest ocena różnych modeli klasyfikacji zespołów w oparciu o manipulację cechami wejściowymi w celu zdiagnozowania zmian skórnych. Metody wejściowe, procesy manipulacji cechami oparte są na selekcji podzbiorów cech od właściwości kształtu zmiany, koloru i analizy tekstury w celu wygenerowania różnorodności dla modeli. Przedstawiono trzy modele wyboru podzbiorów. Należy do nich: model wyboru podzbioru oparty na określonych grupach cech, model wyboru podzbioru wykorzystujący korelację oraz model wyboru podzbioru bazujący na algorytmach wyboru cech. Każdy model klasyfikacji zespołu jest generowany przy użyciu optymalnego klasyfikatora i zintegrowany ze strategią głosowania większościowego.

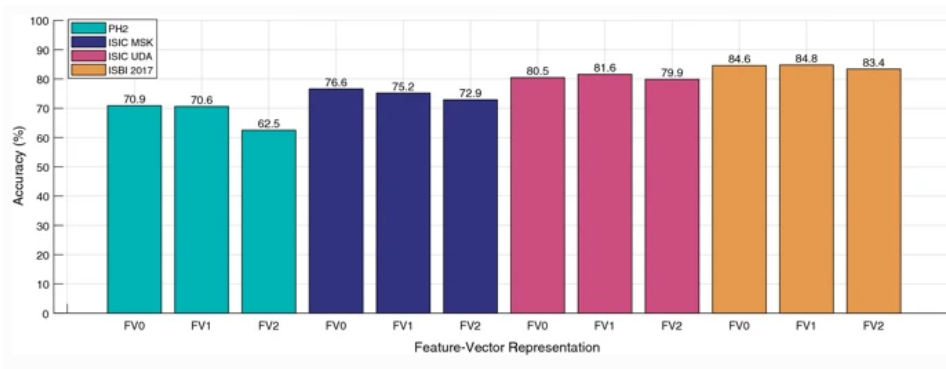
Proponowane modele zastosowano na zestawie 1104 obrazów dermoskopowych, stosując procedurę walidacji krzyżowej. Najlepsze wyniki uzyskano w pierwszym modelu klasyfikacji zestawu, który generuje zestaw podzbiorów cech oparty na określonych grupach cech. System obliczeniowy diagnostyki zmian skórnych osiągnął 94,3% dokładności, 91,8% czułości i 96,7% swoistości. Proces manipulacji cechami wejściowymi oparty na określonych podzbiórach cech wygenerował największą różnorodność dla modelu klasyfikacji zespołu z bardzo obiecującymi wynikami.

3.2. Dyskryminujący wybór cech

W [18] opracowano nową strukturę klasyfikacji zmian skórnych, która integruje głębokie informacje o cechach. Jej celem jest wygenerowanie najbardziej dyskryminującego wektora cech, z korzyścią w postaci zachowania pierwotnej przestrzeni cech. Naukowcy korzystają z najnowszych modeli głębokich w celu wyodrębnienia funkcji oraz wykorzystania uczenia się przez transfer. Początkowo obrazy dermoskopowe są segmentowane i zostaje wyodrębniony obszar zmiany. Następnie poddawany jest ponownemu szkoleniu wybranych modeli głębokich w celu wygenerowania połączonych wektorów cech. W drugim etapie proponowane są ramy dla najbardziej dyskryminującego wyboru cech i redukcji wymiarów, kontrolowana przez entropię analiza elementu sąsiedztwa (ECNCA). Ta hierarchiczna struktura optymalizuje połączone funkcje, wybierając podstawowe składniki i usuwając zbędne i nieistotne dane. Powstały skondensowany wektor FV_k może zawierać nadmiarowe lub nieistotne cechy, które są formalnie przekazywane przez procedurę wyboru atrybutu lub zmiennej.

$$FV_k = \{(x_1, t_1), \dots, (x_k, t_k), \dots, (x_N, t_N)\} \quad (1)$$

jest zbiorem macierzy treningowej zawierającej N etykiet, gdzie $X \in \{x_j\} N_j=1 \in R_v$ jest v –wymiarowy wektor cech, a $T = \{t_j\} N_j=1$ to etykiety klas z $t_j \in [0,1]$. Podstawą jest identyfikacja zestawu unikalnych cech, podczas gdy wartość entropii dąży do 0 przy minimalnej zmienności cech. W proponowanym podejściu przypisywana są rangi do cech FVE o wymiarach $(R < N)$. Uwzględniono najlepsze 80% funkcji z maksymalną wartością entropii, aby wygenerować zestaw wynikowy. Kryteria wyboru oparte zostały na rangach. Podczas etapu, gdy tylko próbują w dół oryginalną przestrzeń cech, zachowując oryginalne informacje zachowane dla następnego poziomu, zmniejszenia wymiarów.



Rys. 4. OA z różnymi warstwami wstępnie wyszkolonych modeli wykorzystywanych jako ekstraktor funkcji w zestawach danych PH2, ISIC MSK, ISIC UDA i ISBI-2017 [18]

Rys. 4 przedstawia wyniki klasyfikacji dla każdej z różnych warstw użytych w zestawach danych. Modele wstępnie przeszkolone przez architektury CNN są potężnymi przedstawicielami funkcji. Na podstawie wybranych wstępnie wyszkolonych modeli zaobserwowano, że DenseNet-201 i Inception-ResNet-V2 wykazują prawie podobną wydajność we wszystkich zestawach danych. W zestawie danych ISIC-UDA OA FV0 wynosi 80,5%, podczas gdy OA FV1 wynosi 81,6%. Zaobserwowano również, że Inception-V3 wykazuje spadek wydajności; dlatego nie jest odpowiednim kryterium diagnozowania raka skóry.

3.3. Wykorzystanie GP

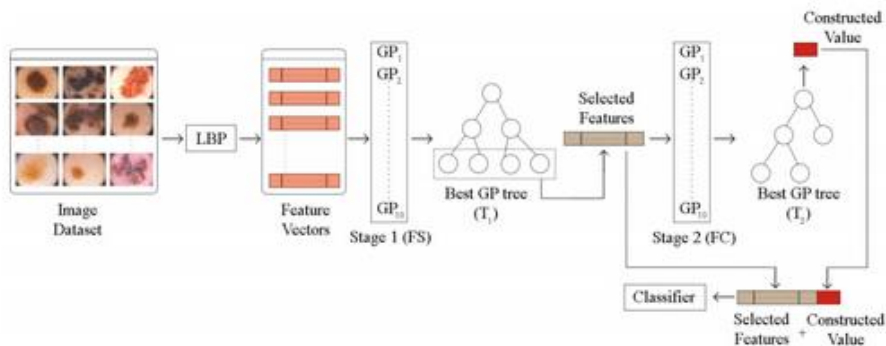
Programowanie genetyczne (GP) to algorytm obliczeń ewolucyjnych oparty na darwinowskich zasadach ewolucji biologicznej i selekcji naturalnej. GP automatycznie bada przestrzeń rozwiązań, aby ewoluować model, często reprezentowany przez strukturę drzewiastą, dla danego problemu. GP ma możliwość dokonywania niejawnej selekcji cech poprzez wybranie widocznych cech na swoich końcowych węzłach. Wybór funkcji wybiera podzbiór oryginalnych operacji, podczas gdy konstrukcja funkcji tworzy nowe funkcje z oryginalnego zestawu funkcji. Polega na przekształceniu danego zestawu cech wejściowych w celu wygenerowania nowego zestawu mocniejszych cech [19]. [20]. Ponadto lekarze są zainteresowani znalezieniem przyczyny choroby, a system jest wysoce zalecany do posiadania informacji przyczynowych. Ponieważ właściwość programów ewoluowanych przez GP jest interpretowalna, dostarczając informacji o tym, które cechy są znaczące przy konstruowaniu nowych funkcji wysokiego poziomu, lekarze mogą uzyskać głębokie zrozumienie, które konkretne wzory tekstur i zmiany kolorów są przyczyną choroby.

Programowanie genetyczne (GP) jest rodzajem techniki uczenia maszynowego, która wykorzystuje algorytm ewolucyjny do symulacji doboru naturalnego, a także dynamiki populacji, co prowadzi do prostych i zrozumiałych

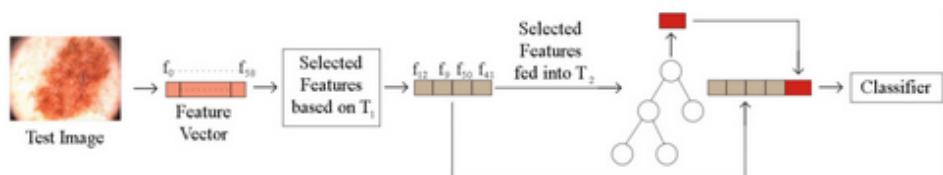
klasyfikatorów[21,22]. GP stosowany jest do danych profilowania ekspresji raka, aby wybrać geny cech i zbudować klasyfikatory [23].

Rozmiar obrazu medycznego jest zwykle duży i dlatego wymaga zmniejszenia wymiarów przed przetworzeniem przez algorytm klasyfikacji. Wybór cech i konstrukcja to skuteczne techniki zmniejszania wymiarów przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności klasyfikacji. W pracy [24] opracowano nowatorskie, dwustopniowe podejście oparte na programowaniu genetycznym (GP) do wyboru cech i konstrukcji cech do klasyfikacji obrazu raka skóry. Lokalny wzór binarny służy do wydobywania cech szarości i kolorów z obrazów dermoskopowych. Wyniki naszej proponowanej metody wykazały, że wybrane i skonstruowane przez GP cechy mają obiecującą zdolność do poprawy wydajności powszechnie stosowanych algorytmów klasyfikacji. W porównaniu z korzystaniem z pełnego zestawu dostępnych funkcji, wybrane i zbudowane przez GP funkcje wykazały znacznie lepszą lub porównywalną wydajność w większości przypadków. Ponadto analiza wyewoluowanych zestawów cech pokazuje wgląd we właściwości raka skóry i potwierdza zdolność GP do selekcji cech w rozróżnianiu obrazów łagodnego i złośliwego raka.

Na Rys. 5 przedstawiono proces uczenia uwzględniając wektory cech LBP, w którym został wykorzystany GP do wyboru funkcji (etap1). Po 10 iteracjach wybrano drzewo cech, które pozwoliło na wybranie funkcji. Następnie opracowany klasyfikator został opracowany na podstawie wyboru funkcji i skonstruowanych cech.



Rys. 5. Proces uczenia uwzględniając wektory cech LBP, w którym został wykorzystany GP do wyboru funkcji [24]



Rys. 6. Proces diagnozowania zmiany skórnej możliwy dzięki LBP i GP do wyboru funkcji [24]

Na Rys. 6 przedstawiony został schemat procesu diagnozowania oparty o 59 LPSgray cech (od f_0 do f_{58}). Dane treningowe w pierwszym etapie (stage-1) bazują na najlepszym drzewie GP (T_1) z wybranymi wcześniej cechami f . W drugim kroku (stage-2) tworzone jest najlepsze drzewo GP (T_2), wybierane cechy tworzą już wektor cech podawany dalej do klasyfikatora.

4. Wnioski

W ostatnich czasach wzrosła liczba zgonów z powodu czerniaka, po części dlatego, że czerniak jest najbardziej agresywnym rodzajem raka skóry. Opracowano systemy obliczeniowe, które pomagają dermatologom we wczesnym diagnozowaniu raka skóry, a nawet w celu monitorowania zmian skórnych. Jednak wciąż pozostaje wyzwanie, aby ulepszyć klasyfikatory do diagnozowania takich zmian skórnych.

Algorytmy wyboru funkcji wykorzystują wiele cech zmian skórnych. Systemy oceniające są używane z metodą rankingową, cechy są także uszeregowane indywidualnie, zgodnie z ich oceną. Często korzysta się z określonej liczby cech, które należy zachować. Oceniający podzbiór cech mierzy podzbiór cech i zwraca wartość, która jest używana podczas wyszukiwania.

Wybór cech i ich sama konstrukcja mogą pomóc poprawić wydajność, wybierając odpowiednie funkcje i konstruując nowe funkcje wysokiego poziomu. Dlatego są dobrymi narzędziami nie tylko do poprawy wydajności, ale także do zmniejszenia wymiarów, a tym samym do zapewnienia funkcji, które wymagają mniej czasu obliczeń podczas przetwarzania przez algorytm klasyfikacji.

Literatura

- [1] *Skin cancer facts*, 2017. URL <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/melan.html> (lipiec 2020)
- [2] Khan M. A. , Tallha A., Muhammad S., Aamir S., Khursheed A., Musaed A., Syed I. H., Abdualziz A. *An implementation of normal distribution based segmentation and entropy-controlled features selection for skin lesion detection and classification*, BMC Cancer 18(1), 638, 2018.

- [3] Bi L., Kim J., Ahn E., Kumar A., Fulham M., Feng D., *Dermoscopic image segmentation via multi-stage fully convolutional networks*, IEEE Trans Biomed Eng 64(9), 2065–2074, 2017.
- [4] Nida N., Irtaza A., Javed A., Yousaf M. H., Mahmood M. T., *Melanoma lesion detection and segmentation using deep region based convolutional neural network and fuzzy C-means clustering*, Int J Med Inform 124, 37–48, 2019.
- [5] Celebi M. E., Aslandogan Y. A., Stoecker W. V., Iyatomi H., Oka H., Chen X., *Unsupervised border detection in dermoscopy images*, Skin Res Technol. 13:1–9, 2007.
- [6] Lanzi P. L., *Fast feature selection with genetic algorithms: a filter approach*, IEEE International Conference on Evolutionary Computation ICEC97, 537–540, 1997.
- [7] Pupil P., Novaviovca J., Kittler J., *Floating search methods in feature selection*, Pattern recognition letters 15, 1119–1125, 1994.
- [8] Campos T.E., Ferisand R.S, Cesar R.M., *Improved face x non-face discrimination using Fourier descriptors through feature selection*, 13th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 2000.
- [9] Ercal F., Chawla A., Stoecker W.V., Lee H., Moss R.H., *Neural Network diagnosis of malignant melanoma from color images*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 41 (9), 837–845, 1994.
- [10] Zagrouba E., Barhoumi W., *An accelerated system for melanoma diagnosis based on subset feature selection*, Journal of Computing and Information Technology - CIT 13(1), 69–82, 2005.
- [11] Oliveira R.B., Papa J.P., Pereira A.S., Tavares J.M.R.S., *Computational methods for pigmented skin lesion classificatio in images: Review and future trends*, Neural Computing and Applications 27, 1–24, 2016.
- [12] Oliveira R. B., Pereira A. S., Tavaresa J. M. R. S., *Skin lesion computational diagnosis of dermoscopic images: Ensemble models based on input feature manipulation*, JMRS Tavares - Computer methods and programs Computer Methods and Programs in Biomedicine 149, 43–53, 2017.
- [13] Witten I.H., Frank E., Hall M.A., *Data mining: Practical machine learning tools and techniques*, Morgan Kaufmann, 2011.
- [14] Zagrouba E., Barhoumi W., *An accelerated system for melanoma diagnosis based on subset feature selection*, Journal of Computing and Information Technology - CIT 13(1), 69–82, 2005.
- [15] Oliveira R. B., Papa J. P., Pereira A. S., Manuel J., Tavaresa R. S., *Computational methods for pigmented skin lesion classification in images: review and future trends*, Neural Computing and Applications, Pattern recognition in dermoscopy images using ensemble methods, 2016.
- [16] Huang J., Ling C. X., *Using AUC and accuracy in evaluating learning algorithms*, IEEE Trans Knowledge Data Eng. 17(3), 299–310, 2005.

- [17] Oliveira R. B., Pereira A. S., Manuel J., Tavares R. S., *Skin lesion computational diagnosis of dermoscopic images: ensemble models based on input feature manipulation*, Computer methods and programs in biomedicine 149, 43–53, 2017.
- [18] Akram T., Junaid Lodhi H. M., Naqvi S. R., Naeem S., Alhaisoni M., Ali M., Ali Haider S., Qadri N.N., *A multilevel features selection framework for skin lesion classification Human-centric*, Computing and Information Sciences 10, 12, 2020.
- [19] Chen Q., Zhang M., Bing Xue B., *Feature Selection to Improve Generalisation of Genetic Programming for High-Dimensional Symbolic Regression*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 21(5), 792–806, 2017.
- [20] Al-Sahaf H., Al-Sahaf A., Xue B., Johnston M., Zhang M., *Automatically Evolving Rotation-Invariant Texture Image Descriptors by Genetic Programming*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 21(1), 83–101, 2017.
- [21] Neshatian, K., Zhang, M., Andreae, P., *A filter approach to multiple feature construction for symbolic learning classifiers using genetic programming*, IEEE Trans. Evol. Comput. 16(5), 645–661, 2012.
- [22] Xue, B., Zhang, M., Browne, W.N., Yao, X., *A survey on evolutionary computation approaches to feature selection*, IEEE Trans. Evol. Comput. 20(4), 606–626, 2016.
- [23] Yu J., Almal A. A., Dhanasekaran S. M., Ghosh D., Worzel W. P., Chinnaiyan A., M., *Feature selection and molecular classification of cancer using genetic programming*, Neoplasia 9(4), 292–303, 2007.
- [24] Ul Ain B., Xue B., Al-Sahaf H., Zhang M., *Genetic programming for feature selection and feature construction in skin cancer image classification*, Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, Springer, 732–745, 2018.

Analiza porównawcza zastosowania SF₆ oraz próżni w nowoczesnej aparaturze łączeniowej SN

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono problematykę stosowania gazu SF₆ oraz próżni jako ośrodków izolacyjnych w nowoczesnej aparaturze łączeniowej średnich napięć (SN). Przedstawiono najważniejsze właściwości fizyczno – chemiczne oraz elektryczne tych ośrodków, z uwzględnieniem aspektu związanego z ochroną środowiska. Zaprezentowano również przykłady urządzeń elektroenergetycznych (wylłączniki, rozłączniki) wykorzystujące te media podczas swojej pracy.

Słowa kluczowe: sześćciofluorek siarki, technologia próżniowa, aparatura łączeniowa SN, efekt cieplarniany, wytrzymałość elektryczna

Comparative analysis of the application of SF₆ and vacuum in modern MV switchgear

Abstract: This chapter presents the problems of using SF₆ gas and vacuum as insulation centres in modern medium voltage (MV) switchgear. The most important physical, chemical and electrical properties of these centers are presented, taking into account the aspect related to environmental protection. There are also presented examples of electrical equipment (switches, disconnectors) using these media during their work.

Keywords: sulphur hexafluoride, vacuum technology, MV switchgear, greenhouse effect, electrical strength

1. Wstęp

Współcześnie produkowana nowoczesna elektroenergetyczna aparatura łączeniowa pracująca na poziomie średniego napięcia, jako medium izolacyjne wykorzystuje głównie sześćciofluorek siarki (SF₆) oraz próżnię. Zainteresowanie technologią próżniową w ostatnich latach związane jest z jej brakiem szkodliwości dla środowiska. Jest to medium całkowicie neutralne dla otoczenia, czego nie można powiedzieć na temat gazu SF₆.

Heksafluorek siarki pojawił się w produkcji już na początku XX w. we Francji, jednak pierwsze zaawansowane badania nad właściwościami elektrycznymi przeprowadzono prawie 40 lat później [1]. Jeśli chodzi o zarys historyczny wykorzystania próżni w elektroenergetyce, warto zwrócić uwagę na fakt, że jest to technologia znana niemal od samego początku elektryczności.

*m.lech@pollub.pl, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

Pierwszy patent na wyłącznik próżniowy przyznany został już w roku 1890 [2]. Od tamtej pory technologia ta dynamicznie się rozwijała, by od lat 80. XX wieku stać się głównym medium izolacyjnym w wyłącznikach dedykowanych do sieci średnich napięć. Mimo, że badania nad wymienionymi ośrodkami izolacyjnymi trwają ponad 100 lat, wciąż wiele aspektów właściwości elektroizolacyjnych nie zostało do końca poznanych i wyjaśnionych w sposób skrupulatny.

2. Wyładowania elektryczne w gazach

2.1. Klasyfikacja wyładowań w gazach

Wyładowania elektryczne występujące w urządzeniach elektroenergetycznych mają niekorzystny wpływ na ich stan techniczny, skutkiem czego może być degradacja materiałów oraz straty mocy. Aby zapobiec tego typu zjawiskom, należy już na etapie projektowania mieć na uwadze sposoby ograniczania wyładowań.

Przykładowym podziałem wyładowań elektrycznych jest podział ze względu warunek podtrzymania wyładowania [3]. Wyróżniamy wyładowania niesamodzielne (niesamoistne) oraz samodzielne (samoistne). Wyładowania niesamoistne charakteryzują się koniecznością istnienia zewnętrznego czynnika, który zapewnia obecność nośników prądu. Przykładem takiego czynnika może być zewnętrzne promieniowanie jonizujące. W wyładowaniach samodzielnych nośniki prądu zapewnione są m.in. poprzez promieniowanie pochodzące z samego wyładowania.

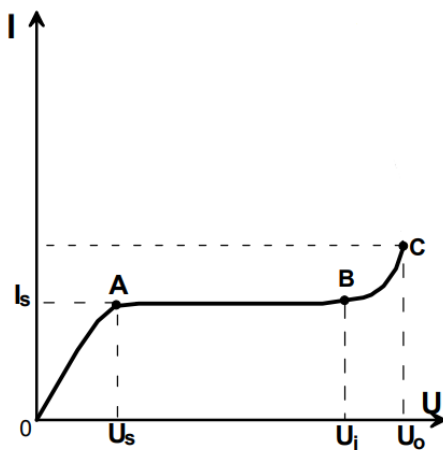
Innym kryterium podziału wyładowań elektrycznych w gazach może być kryterium jaskrawości promieniowania świetlnego pochodzącego od wyładowań [3]. W tym przypadku mamy do czynienia z wyładowaniami ciemnymi, jarzeniowymi oraz iskrowymi i łukowymi. Te pierwsze posiadają bardzo małą poświatę, kolejne z kolei charakteryzują się wyraźną, niezbyt jaskrawą poświatą. Wyładowaniom iskrowym i łukowym towarzyszy z kolei oślepiająca poświata.

Jako kryterium podziału wyładowań może być również wykorzystywana wartość rezystancji przestrzeni międzyelektrodowej [3], która charakteryzuje się największymi wartościami dla wyładowań niesamodzielnych, a najmniejszymi dla wyładowań zupełnych np. łuku elektrycznego.

2.2. Powielanie elektronów

Rozpatrując klasyczny układ izolacyjny składający się z dwóch płaskich, równoległych w stosunku do siebie elektrod umieszczonych w pewnej odległości od siebie, należy uwzględnić istnienie pewnej liczby ładunków swobodnych znajdujących się w przestrzeni międzyelektrodowej wypełnionej gazem. Mogą one pochodzić z różnego rodzaju promieniowania pochodzącego

z otoczenia. Po podłączeniu zasilania do biegunów układu, a następnie podnoszeniu napięcia, na skutek wzrostu wartości natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej wzrasta wartość prądu przewodzonego między elektrodami. Zjawisko to przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Charakterystyka prądowo – napięciowa gazowego układu izolacyjnego [4]

W początkowym przedziale wartości tego prądu rosną proporcjonalnie do przyłożonego napięcia, jednak przed osiągnięciem napięcia U_s szybkość narastania prądu spada w niewielkim stopniu. W punkcie A charakterystyki wartość prądu się stabilizuje na poziomie wartości I_s , która nazywana jest prądem nasycenia [4]. Wynika to z powodu braku nośników w przestrzeni międzyelektrodowej, które odpłynęły w kierunku elektrod. Powyżej wartości przyłożonego napięcia równej U_j następuje gwałtowny wzrost wartości prądu przewodzonego. Wynika to z jonizacji zderzeniowej cząsteczek obojętnych spowodowanej wzrostem energii kinetycznej elektronów i jonów do poziomu krytycznego. Jest to początek wyładowania lawinowego. Lawina elektronowa zostaje zapoczątkowana poprzez elektron, który jonizuje pierwszą cząsteczkę gazu. W tym momencie ruch w kierunku anody odbywa się z udziałem dwóch elektronów, które jonizują kolejne cząsteczki. Promień lawiny jest wprost proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z drogi. Czoło lawiny wypełnione jest chmurą elektronów, które poruszają się w kierunku anody. Na dalszy rozwój wyładowania wpływ ma wiele czynników: niejednostajność pola elektrycznego, odległość międzystykowa, ciśnienie i rodzaj gazu czy biegunowość napięcia. Wyróżnić można dwa główne mechanizmy rozwoju wyładowań w gazach [3]:

- mechanizm Townsenda

- mechanizm kanałowy

Dla obydwóch tych mechanizmów początkowa faza, jaką jest lawina elektronowa [5], została opisana matematycznie:

$$dn = n\alpha dx \quad (1)$$

gdzie: α – współczynnik pierwotnej jonizacji zderzeniowej (tzw. pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda), n – liczba elektronów przemieszczających się w przestrzeni międzyelektrodowej, dx – droga pokonana przez elektrony w przestrzeni międzyelektrodowej, dn – przyrost liczby elektronów wskutek zderzeń jonizujących z cząsteczkami gazu.

2.3. Mechanizm Townsenda

Mechanizm Townsenda występuje dla wartości iloczynu dp z przedziału $10^2 \div 10^5$ hPa·cm. Oparty jest na założeniu, że elektrony swobodne pochodzą z emisji wtórnej jonowo – elektronowej (z katody) oraz, że ładunek przestrzenny między elektrodami nie zmienia pierwotnego rozkładu pola elektrycznego.

Przy zwiększaniu napięcia, w momencie gdy mamy do czynienia z wyładowaniem niesamodzielnym, znaczącą rolę odgrywają procesy wtórne związane z emisją elektronów z katody. Jest to spowodowane m.in. bombardowaniem katody jonami dodatnimi i atomami metastabilnymi oraz fotoemisją. W celu sumarycznego opisu procesów wtórnych oraz jonizacji zderzeniowej cząsteczek gazu jonami dodatnimi, wprowadzono współczynnik γ nazywany w pewnych źródłach drugim współczynnikiem Townsenda jonizacji. Mechanizm Townsenda można opisać następującą zależnością [3]:

$$I = I_0 \frac{\exp \alpha d}{1 - \gamma(\exp \alpha d - 1)} \quad (2)$$

Analizując powyższą zależność, należy stwierdzić, że lawina elektronowa na drodze d wytwarza $(\exp \alpha d - 1)$ elektronów oraz tyle samo jonów dodatnich. Jony te bombardując katodę wyzwalaają z niej $\gamma(\exp \alpha d - 1)$ elektronów. Warunek na rozwój wyładowania samodzielnego prezentuje się więc następująco [3]:

$$\gamma(\exp \alpha d - 1) \geq 1 \quad (3)$$

Jeżeli wyładowanie odbywa się w środowisku gazu elektryjnego (np. SF₆), do analizy należy wprowadzić współczynnik przechwyty η związany ze zjawiskiem wiązania wolnych elektronów przez cząsteczki gazu elektryjnego. Po uwzględnieniu wypadkowego współczynnika, wartość prądu w układzie z gazem elektryjnym wygląda następująco [3]:

$$I = I_0 \frac{\alpha \exp(\alpha - \eta)d - \eta}{\alpha - \eta - \alpha \gamma [\exp(\alpha - \eta)d - 1]} \quad (4)$$

Warunek wyładowania samoistnego w gazach elektryczniejszych przyjmuje następującą postać [3]:

$$\gamma [\exp(\alpha - \eta)d - 1] = 1 - \frac{\eta}{\alpha} \quad (5)$$

2.4. Mechanizm kanałowy

Mechanizm ten występuje w dwóch odmianach: strimerowej dla wartości iloczynu dp z przedziału $10^3 \div 10^5$ hPa·cm oraz strimerowo – liderowej dla wartości iloczynu dp powyżej 10^5 hPa·cm. Propozycja nowego mechanizmu wynika z obserwacji krótkich czasów wyładowań dla dużych wartości iloczynów dp . Stwierdzono, że tego typu wyładowaniom nie towarzyszą procesy wtórne [6, 7].

Nazwa mechanizmu strimerowego pochodzi od obserwacji tzw. strimerów czyli świecących ścieżek występujących przy wyładowaniach w gazach o wysokim ciśnieniu [8]. Wielu naukowców na przestrzeni lat badało tego typu zjawiska, efektem czego było dokładne opisanie strimerowej teorii iskrowego przeskoku [8–13]. Mechanizm ten zakłada, że w początkowej fazie lawina elektronowa rozwija się zgodnie z opisanym wcześniej mechanizmem Townsenda. W przypadku gdy pole ładunku lawiny elektronowej jest porównywalne z polem pierwotnym, wypadkowe pole przed czołem lawiny oraz za lawiną ulega gwałtownemu wzmocnieniu, a w samej lawinie pole staje się słabsze. Promieniowanie, które pochodzi z procesów rekombinacyjnych oraz odzbudzeniowych zapoczątkowuje fotojonizację w pobliżu lawiny. Efektem tego jest powstanie lawin wtórnych w miejscach, gdzie wartości natężenia elektrycznego są największe. W związku z powyższym, lawina wtórna powstając zarówno przed, jak i za lawiną pierwotną może się z nią łączyć i tworzyć kanał wyładowania, zwany strimerem. Przejście lawiny pierwotnej w strimer określa się z wykorzystaniem dwóch kryteriów: Raethera oraz Meeka. Kryterium Raethera przyjmuje następującą postać [3]:

$$\exp \alpha d = n_{kr} = const. \quad (6)$$

gdzie: n_{kr} – krytyczna liczba elektronów w lawinie (ok. 10^8)

Kryterium Meeka opisano następującą formułą [3]:

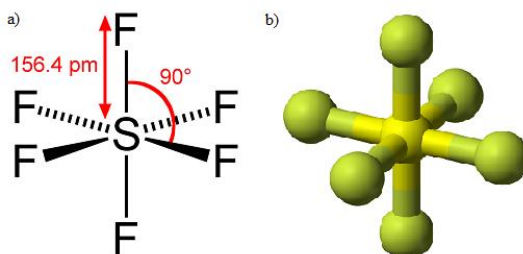
$$\alpha d + \ln \frac{\alpha}{d} = 14,46 + \ln \frac{E}{p} - \frac{1}{2} \ln pd + \ln d \quad (7)$$

gdzie: n_{kr} – krytyczna liczba elektronów w lawinie (ok. 10^8)

Druga odmiana wyładowania kanałowego, zwana liderowym, charakteryzuje się brakiem połączenia elektrod przez strimer, przy jednoczesnym zwiększeniu liczby i prędkości ładunków oraz przejścia części wyładowania strimerowego w wyładowanie o większych wartościach przewodnictwa elektrycznego. Ta część zwana jest liderem. W odróżnieniu do wyładowania strimerowego, w którym zachodzi wspomniana wcześniej jonizacja zderzeniowa oraz fotojonizacja, w wyładowaniu liderowym pojawia się również jonizacja termiczna. Porównując te dwa wyładowania, należy wspomnieć o znacznie mniejszych wartościach spadku napięcia w przestrzeni międzyelektrodowej przy wyładowaniu liderowym. Skokowy rozwój lidera odbywa się poprzez nasilenie procesów strimerowych przed czołem lidera.

2.5. Właściwości gazu SF_6 oraz próżni

Heksafluorek siarki, zwany również sześćiofluorkiem siarki jest nieorganicznym związkiem chemicznym, którego cząsteczka składa się z sześciu atomów fluoru oraz jednego atomu siarki (Rys. 2).



Rys. 2. Heksafluorek siarki (SF_6): a) szkielet cząsteczki, b) model pręcikowo-kulkowy [14]

Jest to gaz niepalny, bezzapachowy oraz bezbarwny. Swojej ośmiościennej budowie zawdzięcza dużą stabilność termiczną, co z kolei skutkuje brakiem rozpadu do temperatury $500^{\circ}C$. Przy większych temperaturach, w stosunkowo małych przedziałach odbywa się pełna jonizacja oraz dysocjacja gazu. W związku z powyższym temperatura palącego się łuku elektrycznego w środowisku gazu SF_6 w odniesieniu do powietrza jest relatywnie niska. Ma to korzystny wpływ na poprawienie stanu aparatury łączeniowej, dzięki zmniejszeniu erozji powierzchni styków podczas operacji łączeniowej w warunkach zakłóceń. Istotnym faktem jest również proces skraplania, który dla gazu SF_6 występuje poniżej temperatury $-30^{\circ}C$ (dla ciśnienia 5 bar) (Tab. 1). Poniżej tej temperatury następuje utrata właściwości dielektrycznych oraz gaszeniowych. Problem ten może być znacząco widoczny w miesiącach zimowych.

Istotnym z punktu widzenia wykorzystania gazu SF₆ w aparaturze łączeniowej SN jest jego elektroujemność. Właściwość ta polega na wiązaniu do siebie elektronów z otoczenia, co wpływa na zmniejszenie prawdopodobieństwa zapalenia się łuku elektrycznego oraz zwiększenie efektywności jego gaszenia. Wiązanie do siebie elektronów przebiegać może w następujące sposoby:



Tab. 2. Temperatury skraplania heksafluorku siarki SF₆ wraz z minimalnym ciśnieniem [15]

Temperatura skraplania, °C	Ciśnienie, bar
-50	2,34
-45	2,87
-40	3,49
-35	4,20
-25	5,02
-20	5,95
-15	7,01
-10	8,19
-5	9,52
0	11,01

Gaz SF₆ posiada 10 – krotnie wyższą zdolność gaszenia łuku elektrycznego w porównaniu do powietrza. Wyniki to przede wszystkim z dużej przewodności cieplnej gazu przy temperaturach łuku elektrycznego panujących w chwili przejścia prądu przez zero [16].

Porównując gaz SF₆ do innych mediów pracy stosowanych w elektroenergetyce, należy zwrócić szczególną uwagę na aspekt ekologiczny. SF₆ należy do tzw. F-gazów czyli fluorowanych gazów cieplarnianych, które przebywając w atmosferze wpływają na podwyższanie jej temperatury. Według opinii Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatycznych (IPCC) oraz Agencji Ochrony Środowiska w USA (EPA) został uznany za związek, który w dużej mierze wpływa na tworzenia efektu cieplarnianego. Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), który jest wskaźnikiem pozwalającym na ocenę wpływu danej substancji na efekt cieplarniany dla SF₆ wynosi 22000. Jest to wskaźnik, który porównuje ilość ciepła zatrzymanego przez adekwatną masę

dwutlenku węgla, dla którego GWP wynosi 1. Wartości wskaźnika GWP dla wybranych substancji przedstawiono w Tab. 2.

Szkodliwość stosowania heksafluorku siarki nie została pominięta przez wiele światowych organizacji i instytucji. Głównymi dokumentami poruszającymi tę tematykę są Protokoły: z Montrealu (1987r.) oraz z Kioto (2005r.) [17,18]. Poruszają one tematykę przeciwdziałania powstawaniu dziury ozonowej. Innym dokumentem jest Rozporządzenie Unii Europejskiej w sprawie F – gazów, zakładające zmniejszenie emisji tego typu substancji o ok. 75% do 2050 roku w stosunku do roku 1990 [19].

Tab. 2. Wybrane substancje chemiczne oraz ich wskaźnik GWP

Substancja	GWP₁₀₀
Dwutlenek węgla CO₂	1
Metan CH₄	23
Podtlenek azotu N₂O	296
Czterofluorek węgla CF₄	5 700
Freon R-12 (CFC- 12)	10 600
Heksafluorek siarki SF₆	22 200

Mając na uwadze powyższe rozporządzenie, wiele firm wprowadziło do produkcji przyrządy pozwalające na kontrolę stanu gazu SF₆ znajdującego się w komorach gaszeniowych urządzeń elektroenergetycznych. Szczegóły dotyczące kontroli, oczyszczania oraz ponownego wykorzystania SF₆ ujęto w normie PN-EN IEC 60480. Przykładem urządzenia służącego do kontroli wycieków gazu SF₆ jest detektor gazu GIR-10 firmy WIKA oparty o technologię podczerwieni (Rys. 2).



Rys. 3. Detektor gazu GIR-10 prod. WIKA [20]

2.6. Próżnia

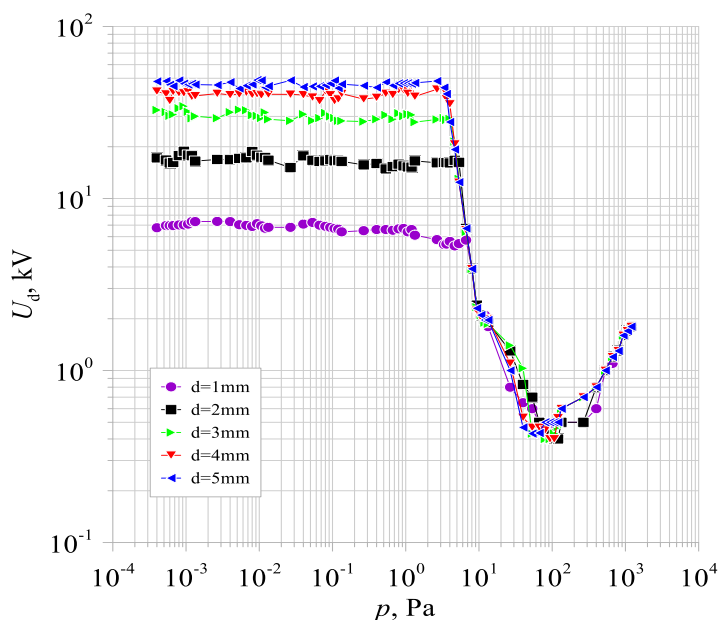
Jednoznaczna definicja próżni nie istnieje. W zależności od dziedziny jej zastosowania, może posiadać różne konotacje. W sensie technicznym, który jest najbardziej istotny z punktu widzenia urządzeń elektroenergetycznych, próżnia jest stanem wysokiego rozrzedzenia gazu. Określenie to jest niestety nieściśle, w związku z czym wprowadzono podział próżni m.in. ze względu na wartość ciśnienia, liczbę cząsteczek oraz ich średnią drogę swobodną (Tab. 3). Dzięki temu dokonano podziału próżni m.in. na próżnię niską, średnią, wysoką, bardzo wysoką czy ekstremalnie wysoką. W warunkach rzeczywistych osiągnięcie próżni idealnej, w której nie występują jakiejkolwiek cząsteczki, a ciśnienie jest równe zero, nie istnieje.

Tab. 3. Podział próżni ze względu na ciśnienie, liczbę cząsteczek oraz ich średnią drogę swobodną [21]

	Ciśnienie w hPa (mbar)	Liczba cząsteczek na cm ³	Średnia droga swobodna cząsteczki
Ciśnienie atmosferyczne	1013,25	$2,7 \times 10^{19}$	68 nm
Próżnia niska	300...1	$10^{19} \dots 10^{16}$	0,1...100 μm
Próżnia średnia	$1 \dots 10^{-3}$	$10^{16} \dots 10^{13}$	0,1...100 mm
Próżnia wysoka (HV)	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	$10^{13} \dots 10^9$	10 cm...1 km
Próżnia bardzo wysoka (UHV)	$10^{-7} \dots 10^{-12}$	$10^9 \dots 10^4$	$1 \dots 10^5$ km
Próżnia ekstremalnie wysoka (XHV)	$10^{-12} \dots 10^{-14}$	$10^4 \dots 10^2$	$10^5 \dots 10^7$ km
Przestrzeń kosmiczna	$10^{-7} \dots 10^{-16}$	$10^9 \dots 1$	$1 \dots 10^9$ km
Próżnia absolutna (doskonała)	0	0	∞

Próżnia wewnątrz komór gaszeniowych aparatury łączeniowej SN pełni funkcję izolacyjną oraz stwarza warunki powstawania łuku próżniowego. Średnia wartość ciśnienia wewnątrz próżniowej aparatury łączeniowej wynosi ok. 10^{-4} Pa.

Zgodnie z prawem Pashena, przy zmniejszaniu ciśnienia do wartości równej zero, wytrzymałość dielektryczna rośnie do nieskończoności. Wartości te są jednak ograniczone, co zostało zauważone podczas przeprowadzonych badań. Na Rys. 3 przedstawiono zależność napięcia przebicia w funkcji odległości międzystykowej dla wybranych wartości ciśnienia panującego w badanej komorze gaszeniowej SN. Stała wartość wytrzymałości dielektrycznej w pewnym przedziale ciśnienia stwarza strefę bezpieczeństwa, w której urządzenia mogą pracować w pełni sprawnie. Maksymalne wartości napięć przebicia zestawiono w Tab. 4. Zjawisko to wystąpiło poniżej wartości ciśnienia 5×10^0 Pa. Dalszy wzrost ciśnienia wewnątrz komory gaszeniowej spowodował gwałtowny spadek wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzystykowej. Komora próżniowa podlegająca diagnozie, dla której zmierzona wartość wytrzymałości dielektrycznej znajdowałaby się w tym przedziale, byłaby zdiagnozowana jako uszkodzona.

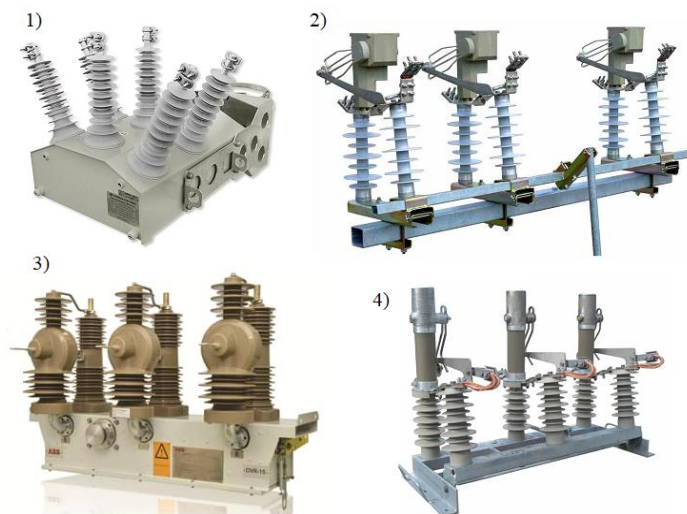


Rys. 4. Zależność napięcia przebicia U_d w funkcji odległości międzystykowej d dla wybranych wartości ciśnienia

Tab. 4. Wartości napięć przebicia zarejestrowane w strefie bezpieczeństwa pracy badanej komory próżniowej

Odległość międzystykowa, d	Napięcie przebicia, U_d
1 mm	7 kV
2 mm	17 kV
3 mm	31 kV
4 mm	40 kV
5 mm	47 kV

Istotnym problemem próżniowych układów gaszeniowych jest zjawisko zrywania prądu [16]. Łuk palący się w środowisku próżniowym charakteryzuje się wyższymi wartościami prądu ucięcia w porównaniu do łuku palącego się w środowiskach gazowych. Na zmniejszenie wartości tego parametru wpływa odpowiednia kompozycja materiału stykowego. W przeprowadzonych badaniach dokonywano analizy wpływu stosowanych materiałów stykowych na wartości prądów ucięcia w zależności od warunków stabilności plamki katodowej. Stwierdzono, że różne wartości prądów ucięcia spowodowane są występowaniem procesów dyfuzyjnych w wyładowaniu plamki.



Rys. 5. Przykłady próżniowej aparatury łączeniowej SN (1 – rozłącznik KTR, prod. Tavrida Electric, 2 – rozłącznik SRNkp, prod. IE, 3 – reklozer OVR, prod. ABB, 4 – rozłącznik RPN, prod. ZPUE Włoszczowa) [23–26]



Rys. 6. Przykłady aparatury łączeniowej SN izolowanej gazem SF₆ (1 – rozłącznik THO, prod. ZPUE Włoszczowa, 2 – wyłącznik SF, prod. Schneider, 3 – rozłącznik GSec, prod. ABB, 4 – reklozer GVR, prod. ZOE) [25–28]

Na Rys. 5 i Rys. 6 przedstawiono najczęściej spotykane aktualnie urządzenia elektroenergetycznej aparatury łączeniowej SN z podziałem na technologię SF₆ oraz technologię próżniową.

3. Wnioski

W niniejszym rozdziale dokonano analizy porównawczej wykorzystania sześćciofluorku siarki oraz próżni w aparaturze łączeniowej SN. Szczególną uwagę zwrócono na aspekt szkodliwości dla środowiska gazu SF₆. Obowiązujące akty prawne mówiące o konieczności ograniczenia emisji szkodliwych dla otoczenia substancji w najbliższych latach spowodują ograniczenie produkcji urządzeń elektroenergetycznych wykorzystujących gaz SF₆. W związku z powyższym, technologia próżniowa, która niesie ze sobą wiele korzyści, w najbliższych latach będzie wciąż tematyką zaawansowanych badań, których efektem końcowym będzie poprawa parametrów nowoczesnej elektroenergetycznej aparatury łączeniowej SN.

Literatura

- [1] Opydo W., Stawicki J., *Analiza porównawcza próżni i sześćciofluorku siarki jako izolacji wysokiego napięcia*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej 74, 181–186, 2013.
- [2] Slade P. G., *The Vacuum Interrupter Theory, Design and Application*, CRC Press, 2007.
- [3] Opydo W., *Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2008.
- [4] Szpor S., Dzierżek H., Winiarski W., *Technika Wysokich Napięć*, Warszawa, WNT, 1978.
- [5] Flisowski Z., *Technika Wysokich Napięć*, Warszawa, WNT, 1999.
- [6] Rogowski W., *Impulse potential and break down in gases*, Archiv. Fur Elektrotechnik B.20, 99, 1928.
- [7] Townsend J.S., *The theory of ionization of gas by collision*, London, Constable, 1910.
- [8] Llewellyn-Jones F., *Ionization and break down in gases*, London, Menthuen, 1966.
- [9] Raether H., *The development of the elektron avalanche in a Spark channel (from observations in a cloud chamber)*, Zeitschrift fur Physik B.112, 464, 1939.
- [10] Raether H., *The development of kanal discharges*, Archiv. Fur Elektrotechnik B.34, 49, 1940.

- [11] Raether H., *Electron avalanches and brakedown in gases*, London, Butterworths, 1964.
- [12] Meek J.M., *A theory of a spark discharge*, The Physical Review 57, 722, 1940.
- [13] Meek J.M., Craggs J.D., *Electrical breakdown of gases*, Clarendon Press, 1953.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride, (05.07.2020).
- [15] „*Sulphur Hexafluoride*” Solvay Special Chemicals.
- [16] Chmielak W., *Nowoczesne technologie w energetyce – SF₆ czy próżnia*, Elektroenergetyka 190, 15–50, 2015.
- [17] Protokół Montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową, Montreal, 1987.
- [18] Protokół z Kioto do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, Kioto, 1997.
- [19] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 517/2014 w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych z dnia 16 kwietnia 2014 r.
- [20] https://www.wikapolska.pl/gir_10_pl_pl.WIKA, (05.07.2020).
- [21] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%B3%C5%BCnia>, (05.07.2020).
- [22] Greenwood A., *Vacuum Switchgear*, IEE London, 190, 1994.
- [23] Materiały reklamowe firmy Tavrida Electric.
- [24] Materiały reklamowe firmy IE.
- [25] Materiały reklamowe firmy ABB.
- [26] Materiały reklamowe firmy ZPUE Włoszczowa.
- [27] Materiały reklamowe firmy Schneider Electric.
- [28] Materiały reklamowe firmy ZOE.

Wykorzystanie właściwości elektrycznych tkanek w pomiarach biomedycznych metodą impedancji bioelektrycznej

Streszczenie: W pracy przedstawiono szczegółowy opis metody analizy składu ciała, jaką jest analiza impedancji bioelektrycznej. Opisano właściwości elektryczne elementów ludzkiego ciała oraz podstawy fizyczne pracy urządzenia wykorzystującego BIA. Skupiono się na parametrach otrzymywanych w pomiarach metodą analizy bioimpedancji elektrycznej oraz na wpływie nawodnienia organizmu na wynik analizy i poszczególnych jej składowych. W pracy przedstawiono także przykładowe wyniki analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem analizatora JAWON MEDICAL IOI-353..

Słowa kluczowe: BIA, impedancja bioelektryczna, właściwości elektryczne

The use of electrical properties of tissues in biomedical measurements using the bioelectrical impedance method

Abstract: The paper presents a detailed description of the body composition analysis method, which is bioelectrical impedance analysis. The electrical properties of the elements of the human body and the physical phenomena of the device using BIA were described. The focus was on the parameters obtained in measurements by the method of electrical bioimpedance analysis and on the impact of hydration on the analysis result and its individual components. The paper also presents examples of analyses carried out with the use of the JAWON MEDICAL IOI-353 analyzer.

Keywords: BIA, bioelectrical impedance, electrical properties

1. Wstęp

Analiza impedancji bioelektrycznej (ang. BIA, *bioelectrical impedance analysis*) jest jedną z najpopularniejszych metod badania składu ciała. Jest szeroko stosowana w badaniach klinicznych, a także w poradnictwie żywieniowym, dietetyce i sporcie. Dostarcza przede wszystkim informacji o ilości

*monika.manko@umlub.pl, ⁽¹⁾Katedra i Zakład Biofizyki, Wydział Lekarski, Uniwersytet Medyczny w Lublinie; ⁽²⁾Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

i rozmieszczeniu wody w organizmie, a właściwa interpretacja otrzymanych wyników może posłużyć do monitorowania masy i poszczególnych składowych ciała osoby poddanej badaniu.

Przy znanych parametrach antropometrycznych ciała oraz przy określonej charakterystyce prądu zmiennego stosowanego podczas analizy BIA otrzymuje się wynik całkowitej impedancji bioelektrycznej, a więc możliwe jest uzyskanie wartości objętości wody w organizmie, kluczowej z punktu widzenia dalszych analiz składu ciała [1].

2. Znaczenie wody w organizmie człowieka

Głównym składnikiem ludzkiego organizmu jest woda, stanowiąc około 70% masy ciała dorosłego człowieka. Zawartość wody w organizmie zmienia się wraz z wiekiem, i tak np. dla noworodka wynosi 80% masy ciała, dla osoby starszej około 60%. Przyjmuje się, że woda w organizmie kobiety stanowi 50–55% masy jej ciała, w organizmie mężczyzny jest to 60–65% masy jego ciała. Z kolei 65–75% masy ciała noworodka stanowi woda [2].

Na ilość wody w ciele człowieka wpływają również inne czynniki, takie jak: jakość i ilość spożywanych pokarmów (np. zawartość w nich soli), ilość wody przyjmowanej w ciągu dnia jak i tej, którą organizm traci (przez aktywność fizyczną, wysoką temperaturę). Należy pamiętać o tym, że wszystkie procesy zachodzące w organizmie również zużywają wodę i wymagają jej regularnego dostarczania i uzupełniania.

Przyjmuje się, że w wyniku procesów fizjologicznych przeciętny organizm ludzki traci w ciągu dnia od 2 do nawet 3 litrów wody. Dla prawidłowego funkcjonowania i dobrego samopoczucia taką samą ilość powinno się więc uzupełnić (uzupełnić bilans wodny). Konsekwencje niedoboru wody w organizmie zauważalne są po kilku godzinach, w czasie których spada zdolność koncentracji, pojawiają się zaburzenia koordynacji ruchowej, bóle głowy, kłopoty z pamięcią, trawieniem i sercem. Niedobór wody w organizmie człowieka (wynoszący około 10% masy ciała) powoduje więc niewydolność fizyczną i psychiczną, a w przypadku utraty 20% wody może dojść nawet do zgonu [2,3]. Według badań, 1 dm³ wody dostarczanej do organizmu w ciągu doby to minimalna ilość zapobiegająca zmianom patologicznym [4]. Podczas upałów zapotrzebowanie to wzrasta nawet trzykrotnie. Ponad 1,5 litra wody dostarczanej do organizmu w ciągu dnia muszą stanowić płyny. Resztę organizm przyswaja z produktów spożywczych (owoce, warzywa).

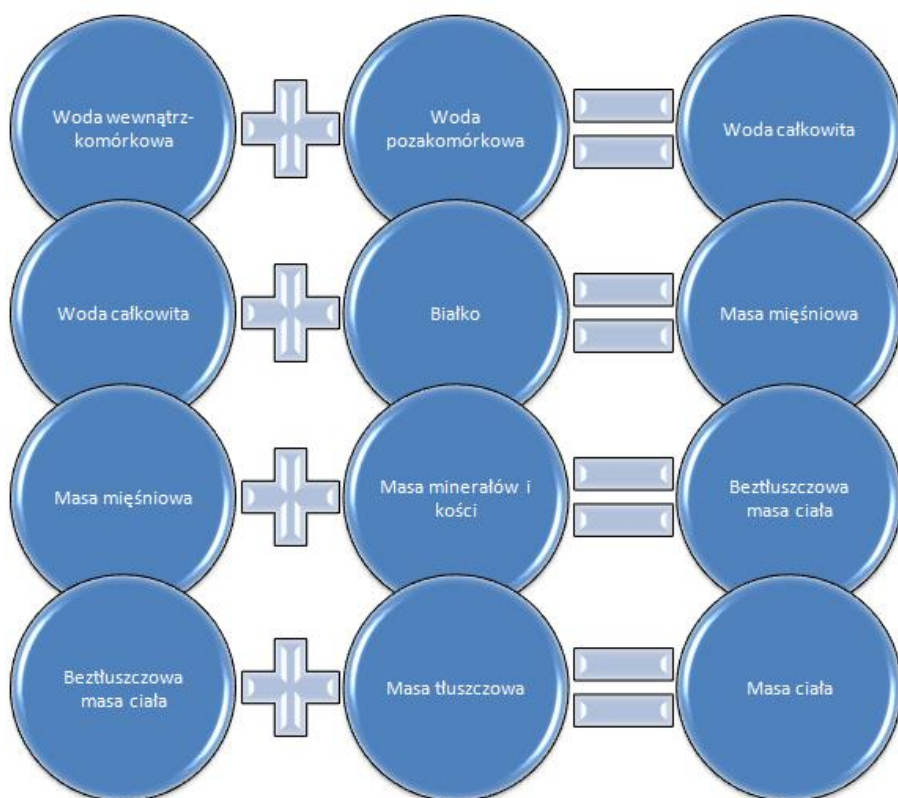
3. Komponenty składu ciała

W dużym uogólnieniu można przyjąć, że ciało człowieka składa się z tkanki tłuszczowej i beztłuszczowej masy ciała (Rys.1.) Beztłuszczowa masa ciała to

masa białka, minerałów i wody znajdujące się w organizmie. Jak wiadomo, białko jest głównym składnikiem mięśni, a minerały są materiałem budulcowym kości [5].

Tkanka tłuszczowa u przeciętnego człowieka znajduje się pod skórą oraz między organami w jamie brzusznej. Jej ilość w pozostałych miejscach (w okolicach mięśni i stawów w kończynach) zależy od ogólnej kondycji organizmu. Gdy energia z pożywienia jest niewystarczająca, tkanka tłuszczowa ulega hydrolizie w celu dostarczenia energii dla fizjologicznego funkcjonowania organizmu. Jednak zbyt duża zawartość tkanki tłuszczowej może prowadzić do powstawania wielu chorób.

W przypadku stosowania diet mających na celu redukcję masy ciała zalecane jest picie dużych ilości wody. Badania wykazują, iż prosta interwencja dietetyczna polegająca na zwiększeniu spożycia wody w ciągu dnia lub zastąpieniu innych napojów wodą okazuje się skuteczną metodą zarówno w zapobieganiu nadwadze i otyłości, jak też w redukcji masy ciała i zmniejszeniu procentowej zawartości tkanki tłuszczowej w ciele [6].



Rys. 1. Schemat wyjaśniający zależności pomiędzy poszczególnymi komponentami ciała; opracowanie własne [6]

Jak wynika z powyższego schematu, woda jest głównym budulcem ludzkiego organizmu. Wchodzi w reakcje biochemiczne z makro i mikroskładnikami oraz stanowi środowisko reakcji enzymatycznych.

Racjonalne podejście do żywienia, suplementacji i aktywności fizycznej w połączeniu z analizą i systematycznym monitorowaniem składu poszczególnych elementów ciała może się przyczynić do zminimalizowania ryzyka wystąpienia wielu chorób, tj. anemia, cukrzyca, otyłość, miażdżyca.

Badanie składu ciała oraz jego poszczególnych komponentów stanowi odrębny obszar badań naukowych. Według Stewarta skład ciała odnosi się do elementów fizycznych lub chemicznych tworzących razem masę organizmu, która określona jest w systematyczny sposób [7].

Wang w roku 1992 zaproponował pięciopoziomowy model złożoności komponentów ciała, w którym, w zależności od poziomu, stosowane są wybrane metody pomiaru składu ciała [8].

W poziomie atomowym [9] bada się podstawowe pierwiastki, takie jak: sód, potas, fosfor, chlor, wapń, magnez i siarkę a także: tlen, wodór, węgiel i azot. Razem stanowią one ponad 99,5% masy ciała. Zwykle elementy te są oznaczane ilościowo dla całego ciała, w niektórych przypadkach (gdy badanie tego wymaga) w poszczególnych jego obszarach.

Na poziomie molekularnym [8] wyróżnia się następujące składniki: lipidy całkowite, wodę wewnątrzkomórkową i zewnątrzkomórkową, białko całkowite, węglowodany, minerały tkanek miękkich oraz minerały kości. Najpopularniejszą metodą analizy składu ciała na tym poziomie jest metoda bioimpedancji elektrycznej. Wyżej wymienione główne składniki można łączyć w grupy, przez co powstają następujące kombinacje [10]:

model dwuskładnikowy: tłuszcz + masa beztłuszczowa ciała, lipidy + nie lipidy, tkanki + minerały kostne;

model trzyskładnikowy: woda + tłuszcz + suma protein i glikogenu, tłuszcz + minerały kostne + masa ciała szczupłego;

model czteroskładnikowy: woda + tłuszcz + minerały + suma protein i glikogenu.

W poziomie komórkowym występują tylko 3 składniki. Są to: ciała pozakomórkowe, płyny pozakomórkowe oraz komórki. Według naukowców [11] na masę ciała komórki składają się płyny pozakomórkowe oraz stałe ciała pozakomórkowe. Warto zaznaczyć, że niekiedy skomplikowane interakcje między komórkami mają kluczowe znaczenie w badaniach fizjologii człowieka, gdy organizm funkcjonuje prawidłowo lub w chorobie.

Na poziomie tkankowym [8] główną rolę odgrywa tkanka tłuszczowa podskórna, trzewna i wewnątrzmięśniowa), a także mięśnie szkieletowe, kości, trzewia oraz inne organy.

Z kolei model poziomu całego ciała obejmuje głowę, tułów i kończyny. Bada się w nim rozmiar ciała, jego kształt, wygląd zewnętrzny oraz inne cechy fizyczne

[8]. Metody pomiaru na tym poziomie są stosunkowo proste, ponieważ dotyczą takich wielkości, jak: masa ciała, wysokość ciała, długość poszczególnych segmentów ciała, pomiar obwodów ciała, powierzchnię ciała, objętość ciała, gęstość ciała, szerokość ciała, pomiar fałdów skórnych czy wskaźnik masy ciała BMI (body mass index) [12].

Wciąż aktualnymi i interesującymi obszarami badań ciała ludzkiego są przede wszystkim:

- komponenty ciała i ich proporcje na wyżej wymienionych pięciu poziomach;
- analizy składu ciała na poziomie wewnętrznym (przeprowadzane różnymi metodami, w zależności od stosowanej aparatury czy dokładności wyników);
- podyktowane działaniem różnych czynników (np. wiek, płeć, dieta, aktywność fizyczna) zmiany w składzie ciała.

4. Podstawy teoretyczne BIA

Metoda impedancji bioelektrycznej (BIA) wykorzystuje właściwości elektryczne poszczególnych elementów ludzkiego ciała [13,14]. Nie bez powodu metoda ta opiera się na znajomości budowy tkankowej i komórkowej organizmu, łącząc w sobie zagadnienia z zakresu anatomii, fizjologii, biofizyki oraz elementów elektrotechniki.

Jak wynika z prawa Ohma, wartość rezystancji (oporu elektrycznego) jednolitego obiektu jest wprost proporcjonalna do długości tego obiektu i jego oporu właściwego i odwrotnie proporcjonalna do powierzchni jego przekroju poprzecznego. Z kolei impedancja jest funkcją rezystancji i reaktancji pojemnościowej, odwrotnie proporcjonalnej do pojemności elektrycznej układu i częstotliwości prądu. Poniżej przedstawione są ogólne równania impedancji dla połączenia równoległego (1) i szeregowego (2).

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}} \quad (1)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2)$$

Przyjmując założenie (w celu uproszczenia), że w badanym układzie (nawet biologicznym) występują wyłącznie połączenia szeregowe, możliwe jest wykonanie pomiaru impedancji bioelektrycznej, oczywiście po zastosowaniu matematycznego przekształcenia połączenia szeregowego w połączenie równoległe, w wyniku czego otrzymuje się wzór na impedancję bioelektryczną organizmu (3):

$$Z = \frac{X_C R}{\sqrt{X_C^2 + R^2}} \quad (3)$$

4.1. Właściwości elektryczne tkanek

Impedancja bioelektryczna organizmu jest połączeniem rezystancji i przesunięcia fazowego prądu elektrycznego przechodzącego przez ciało. Innymi słowy, jest to wielkość oporu, jaki ciało stanowi dla płynącego przez nie prądu elektrycznego. W przewodzeniu prądu elektrycznego szczególne znaczenie ma znajdująca się w organizmie woda i jej rozpuszczone w niej elektrolity, a poszczególne tkanki ciała mają różne właściwości w zakresie przewodnictwa elektrycznego.

Ogólnie, tkanki ludzkie wykazują się czynnymi i biernymi właściwościami elektrycznymi. Zdolność do samoistnego wygenerowanie potencjału czynnościowego to czynna właściwość elektryczna, natomiast bierną nazywa się zdolność do przewodzenia ładunków elektrycznych. Jedną z metod wykorzystującą odpowiedź biologiczną tkanek na doprowadzone do nich zewnętrzne pole elektryczne jest analiza impedancji bioelektrycznej.

Związek pomiędzy pomiarami impedancji elektrycznej a całkowitą ilością wody w organizmie zauważono w połowie XX wieku [15], kiedy po raz pierwszy [16] w badaniach tego typu zastosowano elektrody podskórne (nieco później powierzchniowe [17]). Natomiast badania nad właściwościami elektrycznymi tkanek prowadzone są od XIX wieku [18].

Do najważniejszych parametrów opisujących tkanki, narządy czy płyny ustrojowe pod względem ich zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego należą przewodność właściwa γ i względna przenikalność elektryczna ϵ_r . W przeważającej części tkanek, narządów i płynów przewodność wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości, natomiast przenikalność maleje w bardzo szybkim tempie.

Opór właściwy ciała ludzkiego oraz jego pojemność elektryczna wyznaczone są na podstawie danych statystycznych dla danej populacji, wieku, płci, stanu zdrowia, itp. [19].

Woda zewnątrzkomórkowa oraz tkanka tłuszczowa posiadają swoją rezystancję (opór elektryczny czynny). Z uwagi na fakt, iż nie zachowują się jak kondensatory (nie gromadzą ładunku elektrycznego), nie posiadają reaktancji (oporu pojemnościowego). Reaktancja pojawia się natomiast na błonie komórkowej tkanek o wysokiej zawartości wody. Spadek napięcia spowodowany jest przez rezystancję, a reaktancja wpływa na przesunięcie fazowe przyłożonego prądu zmiennego. W miarę wzrostu częstotliwości prądu (i spadku reaktancji), wzrasta również kąt fazowy i rezystancja.

4.2. Metodologia pomiarów BIA

W pracy do wykonania analizy impedancji bioelektrycznej użyty został analizator JAWON MEDICAL IOI-353 [20], znajdujący się w Katedrze i Zakładzie Biofizyki Uniwersytetu Medycznego w Lublinie. Pomiar wykonany był kilkakrotnie dla tej samej osoby, o różnych porach dnia, w przeciągu 5 dni (codziennie po 2 pomiary). W pracy zdecydowano się jednak przedstawić tylko 1 przykładowy wynik analizy składu ciała w celu omówienia poszczególnych parametrów. We wnioskach końcowych uwzględniono natomiast wszystkie pomiary i wyciągnięto konkluzje uwzględniające wiele czynników mających wpływ na wyniki poszczególnych analiz.

Analizator pozwala na dokonanie oceny podstawowej przemiany materii, określenie poszczególnych komponentów w ciele osoby badanej oraz oszacowanie wieku metabolicznego (ta funkcja widoczna jest tylko na ekranie urządzenia). Na podstawie tych parametrów możliwe jest określenie typu sylwetki osoby badanej wraz ze szczegółową analizą obszaru brzucha.

Urządzenie posiada system 8 elektrod (w systemie ręka-noga), dzięki czemu możliwy jest pomiar komponentów w ciele w poszczególnych segmentach.

Parametry wejściowe, wprowadzane przed użytkownika przed przystąpieniem do analizy składu ciała:

- wzrost [cm];
- wiek [lata];
- płeć.

Na podstawie powyższych danych, urządzenie określa (przy pomocy odpowiednich algorytmów) zakresy referencyjne (optymalne) dla otrzymanych wyników analizy (tj. waga, masa mięśniowa, itp.).

Parametry wyjściowe otrzymywane bezpośrednio po analizie (wraz z jednostkami):

- waga [kg] – rzeczywista waga ciała osoby badanej oraz suma całkowitej wody w organizmie, minerałów, protein oraz tłuszczu podanych w tabeli;
- LBM (Lean Body Mass) – beztłuszczowa masa ciała [kg] – składa się z części ciała wolnych od tłuszczu (mięśnie, krew, woda, inne organy), obliczana przez odjęcie masy tkanki tłuszczowej od masy ciała;
- MBF (Mass of Body Fat) – masa tkanki tłuszczowej [kg] – obliczana przez odjęcie beztłuszczowej masy ciała od wagi osoby badanej;
- zawartość minerałów – są częścią elektrolitów i kości [kg];
- zawartość protein (białka) [kg] – składa się z tkanki mięśniowej oraz wody;
- TBW (Total Body Water) – całkowita zawartość wody [kg];
- PBF (Per cent of Body Fat) – procentowa zawartość tkanki tłuszczowej [%]:

Tab. 3. Wartości procentowej zawartości tkanki tłuszczowej w zależności od płci [%][20]

	Niski poziom tłuszczu	Norma	Wysoki poziom tłuszczu	Otyłość	Poważna otyłość
mężczyzna	<15	15–20	20–25	25–30	>30
kobieta	<20	20–30	30–35	35–40	>40

- BMI (Body Mass Index) – wskaźnik masy ciała [kg/m^2]:
 - szczupły <18,5
 - normalny 18,5<25
 - nadwaga 25<30
 - otyłość 30 i powyżej
- SLM (Soft Lean Mass) – masa tkanek miękkich (mięśni szkieletowych i organów wewnętrznych), składa się z białka i całkowitej wody w organizmie [kg];
- otłuszczenie [%].

Urządzenie ocenia również rodzaj budowy ciała osoby poddanej badaniu. W tym przypadku brany jest pod uwagę zarówno wskaźnik masy ciała (BMI), jak także procent tkanki tłuszczowej, które razem tworzą kryteria oceny otyłości. Analizator rozróżnia 9 typów budowy ciała: niska waga otłuszczenie, nadwaga, otyłość, niska masa ciała, norma, nadwaga typ masy, szczupła sylwetka, typ masy niskie otłuszczenie, budowa atletyczna.

Rodzaj budowy ciała		Parametr	Wynik	Optimalny poziom
Data 16-05-20 Czas 16:59:44 Płeć Kobieta Wiek 29 lat Wzrost 179.0 cm	Niska waga otłuszczenie	W a g a	64.6 kg	(63.4 ~ 77.5)
	Nadwaga %	L . B . M .	48.9 kg	(49.3 ~ 56.4)
Niska masa ciała Norma Nadwaga typ masy Szczupła sylwetka Typ masy niskie otłuszczenie Budowa atletyczna		Tkanka tłuszczowa	15.7 kg	(14.1 ~ 21.2)
		Masa mięśniowa	45.2 kg	(45.4 ~ 52.1)
		Minerały	3.7 kg	(3.8 ~ 4.2)

Minerały to jedynie wartość szacunkowa

Rys. 2. Wyniki analizy BIA, cz.1; opracowanie własne

Według algorytmów analizatora, oceniono typ budowy ciała osoby badanej jako normalny (nie odbiegający od normy). Ocena ta uwzględniała parametry takie, jak: waga (znajdująca się w dolnym zakresie optymalnego poziomu), beztłuszczowa masa ciała (lekko poniżej dolnej granicy optymalnego poziomu),

prawidłowy poziom tkanki tłuszczowej oraz masy mięśniowej (lekko poniżej dolnej granicy optymalnego poziomu) a także masę minerałów (Rys. 2.).

Analiza Okolicy Brzucha:

- VFA (Visceral Fat Area) – powierzchnia tłuszczu trzewnego, w odniesieniu do norm [cm²], optymalny zakres dla kobiet wynosi 40–80 cm², dla mężczyzn 50–100 cm²;
- AC (Abdominal Circumference) – szacunkowa wartość obwodu brzucha w okolicy pępka [cm];
- WHR (Waist Hip Ratio) – szacunkowa wartość stosunku obwodu talii do obwodu bioder, w odniesieniu do norm;
- VFL (Visceral Fat Level) – poziom tłuszczu trzewnego (stopień otyłości trzewnej), w nawiasie podawany jest optymalny zakres dla osoby badanej [skala 01–20]:
 - stopień 01–04 – odpowiada typowi tłuszczu podskórnego;
 - stopień 05–08 – odpowiada typowi zrównoważonemu, w którym tłuszcz podskórny i trzewny są zrównoważone;
 - stopień 09–10 – jest to typ graniczny; jeśli osoba badania nie zmieni obecnego stylu życia, osiągnie typ tłuszczu trzewnego;
 - stopień 11–15 – odpowiada typowi tłuszczu trzewnego I stopnia;
 - stopień 16–20 – jest to typ tłuszczu trzewnego II stopnia.
- Waga należąca.

Parametr	Wynik	Optymalny poziom
B i a ł k o	10.0 kg	(9.8 ~ 11.2)
Całkowita zawartość wody	35.2 kg	(35.5 ~ 40.6)
P . B . F .	24.3 %	(20.0 ~ 30.0)
B . M . I .	20.2 kg/m ²	(18.5 ~ 25.0)
OTŁUSZCZENIE	- 8.4 %	(-10.0 ~ +10.0)

Dokładność analizy brzusznej może być zmniejszona w przypadku idiosyncrazji

Parametr	Wynik	Optymalny poziom
P o z i o m	03 stopień	(01 ~ 08 stopień)
V . F . A .	30 cm ²	(40 ~ 80)
A . C .	74.4 cm	(Mniej niż 88 cm)
W . H . R .	0.73	(0.70 ~ 0.85)
Waga należąca	70.5 kg	

A.C. - obwód brzucha
A.C. jest wartością szacunkową

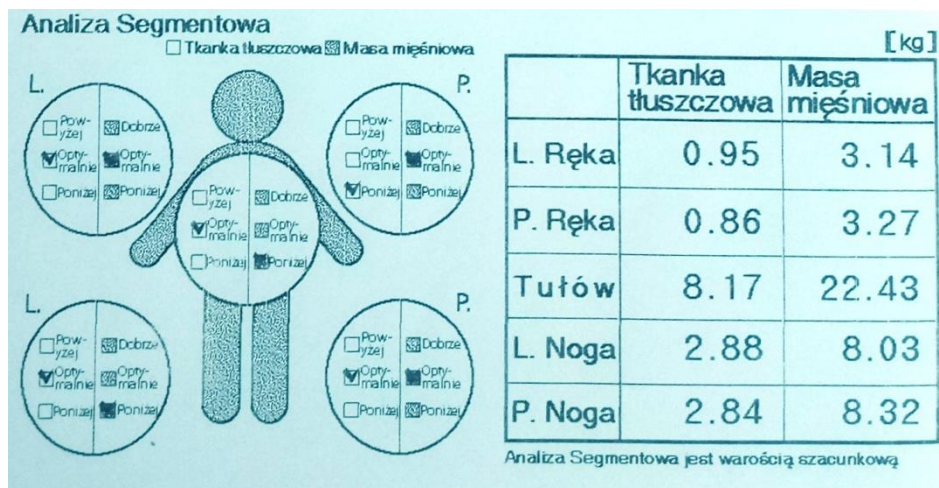
Rys. 3. Wyniki analizy BIA, cz.2; opracowanie własne

Analiza okolic brzucha uwzględniała szereg parametrów (Rys.3.), z których zdecydowana większość mieści się w określonych dla osoby badanej normach (nawiasy po prawej stronie). Jedynie całkowita zawartość wody znajduje się lekko poniżej dolnej granicy optymalnego poziomu. Fakt ten można uznać za szczególnie istotny, ponieważ osoba badana przyznała, że niewystarczająco nawodniła organizm przed przystąpieniem do badania (powinno się wypić przynajmniej 500 ml wody na 15 minut przed analizą).

Algorytm urządzenia wyliczył również wagę należną (70,5 kg), która jest o 6 kg wyższa od rzeczywistej masy ciała osoby badanej. Należy jednak zauważyć, że obliczony wskaźnik BMI jest w normie.

Analiza Segmentowa (prawa ręka, prawa noga, tułów, lewa ręka, lewa noga):

- MBF (Mass of Body Fat) – masa tkanki tłuszczowej, w odniesieniu do trzech poziomów: podwyższona (powyżej), w normie (optymalnie), obniżona (poniżej) [kg];
- SLM (Soft Lean Mass) – masa mięśniowa, w odniesieniu do trzech poziomów: podwyższona (dobrze), w normie (optymalnie), poniżej normy (poniżej) [kg].



Rys. 4. Wyniki analizy BIA, cz.3; opracowanie własne

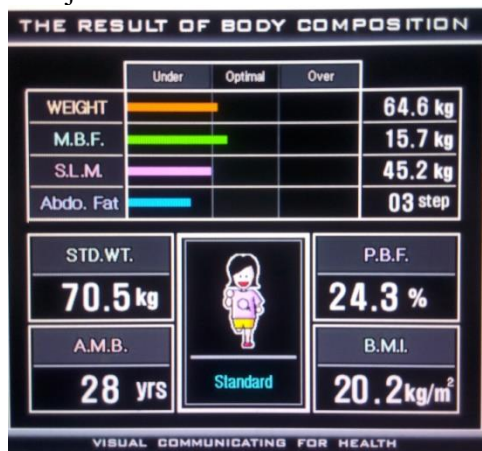
Podane w analizie segmentowej wyniki analizy masy mięśni i masy tkanki tłuszczowej są oceniane na podstawie optymalnego zakresu opartego na typowej wadze osoby badanej. Na Rys. 4 przedstawiona jest szczegółowa analiza segmentowa osoby badanej, z której wynika, że poziom tkanki tłuszczowej jest optymalny na przeważającym obszarze ciała, oprócz prawej ręki. Można wnioskować, że osoba badana jest praworęczna i w tej kończynie przeważa masa mięśniowa w porównaniu z ręką lewą.

Masa mięśniowa również wykazuje w większości optymalny poziom, z wyłączeniem okolic brzucha i lewej nogi, gdzie mięśni jest nieco mniej niż na pozostałym obszarze ciała osoby badanej. Tabela pokazuje również masę poszczególnych kończyn i tułowia, zarówno tkanki tłuszczowej, jak i mięśniowej.

Urządzenie przedstawia nie tylko analizę wyników składu ciała, ale także analizę brzuszną, wydatkowanie energii, analizę segmentową oraz przewodnik kontrolny. Oprócz wyników analizy otrzymanych w formie wydruku, urządzenie

po zakończonym badaniu pokazuje na wyświetlaczu ocenę otyłości w formie wykresu słupkowego.

Słupki odzwierciedlają wagę osoby badanej, masę tkanki tłuszczowej, masę mięśni szkieletowych i organów wewnętrznych oraz masę tłuszczu brzuszego. Wynik analizy jest porównywany z idealnym składem ciała odzwierciedlającym wiek i płeć osoby badanej.



Rys. 5. Wyniki analizy BIA, ocena otyłości, opracowanie własne

Wyniki analizy otyłości (Rys. 5.) pokazują, że waga oraz masa tkanki tłuszczowej osoby badanej są w normie, ogólna masa mięśni szkieletowych i organów wewnętrznych znajduje się na granicy normy (lekko poniżej normy). Masa tłuszczu brzuszego jest zaniżona, co u młodych kobiet jest zjawiskiem normalnym i coraz częściej pożądanym w kulturze europejskiej.

Poza wyżej wymienionymi parametrami, osoba badana otrzymuje również informację o wieku odpowiadającym ciału (AMB). Jest to fizyczny wiek ciała osoby poddanej badaniu, tzw. wiek metaboliczny, w którego ocenie brany jest pod uwagę zarówno wynik analizy składu ciała, jak i płeć oraz wiek biologiczny. Dla osób w wieku 20 lat i poniżej, wiek odpowiadający ciału jest równoważny z wiekiem biologicznym. Osoba badana w rzeczywistości ma 29 lat a jej wiek metaboliczny jest tylko o rok mniejszy. Na tej podstawie można wnioskować o prawidłowym sposobie odżywiania i nawadniania osoby badanej, prowadzeniu przez nią zdrowego i aktywnego trybu życia. Procentowa zawartość tkanki tłuszczowej osoby badanej mieści się w normie.

5. Wnioski

Analiza bioimpedancji elektrycznej stanowi wiarygodny, bezpieczny i skuteczny sposób badania składu ciała zarówno u osób zdrowych, jak i chorych

(np. na cukrzycę, nadciśnienie, otyłość, anoreksja). Metoda ta polega na pomiarze oporu prądu elektrycznego w organizmie, gdzie wykorzystany jest fakt występowania wysokiej impedancji tkanki tłuszczowej większej ilości elektrolitów, lepszego przewodnictwa.

Metoda BIA może stanowić wiarygodny sposób badania także innych parametrów wynikających z dystrybucji wody w organizmie. W praktyce klinicznej może być stosowana przy badaniu składu ciała ze szczególnym uwzględnieniem chorób związanych z metabolizmem. Na wyniki analizy impedancji bioelektrycznej wpływa wiele czynników, zależnych od prawidłowej obsługi urządzenia oraz przede wszystkim odpowiedniego przygotowania osoby badanej.

Celem pracy było przedstawienie szczegółowego opisu metody analizy składu ciała, jaką jest analiza impedancji bioelektrycznej i cel ten został osiągnięty. Jako narzędzie badawcze wykorzystano analizator składu ciała typu JAWON MEDICAL IOI-353, wykorzystujący zamknięty układ elektrod (typu ręce - stopy). Jest to urządzenie często spotykane w poradniach dietetycznych i gabinetach lekarskich z uwagi na łatwość w obsłudze i niemalże natychmiastowe uzyskanie czytelnych dla użytkownika wyników. Badanie jest nieinwazyjne, wymaga jedynie bezpośredniego kontaktu stóp osoby badanej z elektrodami znajdującymi się na platformie urządzenia oraz trzymania w rękach drążka z elektrodami.

Należy podkreślić, że analizie poddanych zostało w sumie 15 osób, których wyniki są do siebie porównywalne. Osobą reprezentatywną była kobieta w wieku 29 lat, o szczupłej sylwetce, mierząca 179 cm wzrostu, o masie ciała równej 64,5 kg i właśnie tę osobę wybrano jako osobę reprezentatywną. Wyniki analizy przedstawione w pracy pochodzą z badania wykonanego w godzinach porannych (między 8:00 a 10:00), po niewystarczającym nawodnieniu organizmu (osoba badana wypila mniej niż 500 ml wody przed badaniem).

Badanie określiło wpływ nawodnienia organizmu ludzkiego na wyniki jednego parametru, jakim jest całkowita ilość wody. Analiza przeprowadzona tej samej osoby następnego dnia, o tej samej porze i po prawidłowym nawodnieniu organizmu wykazała wartość całkowitej ilości wody znajdującą się w normie obliczonej dla osoby badanej. Pozostałe parametry analizy różniły się nieznacznie i nie wpłynęły na zmianę zakresu parametrów. Wyniki przedstawione w pracy należy uznać zatem za przykładowe, ponieważ na ich podstawie nie można przeprowadzić rzetelnej analizy wpływu nawodnienia organizmu na wynik analizy bioimpedancji elektrycznej i poszczególnych jej składowych.

Literatura

- [1] Lewitt A., Mądro E., Krupienicz A., *Podstawy teoretyczne i zastosowania analizy impedancji bioelektrycznej (BIA)*, Endokrynologia, Otyłość, Zaburzenia Przemiany Materii 4(3), 79–84, 2007.
- [2] Łubkowska B., Rola wody w życiu człowieka i środowisku, *Żywnienie a środowisko*, Gdańsk, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Zarządzania, 20–37, 2016.
- [3] Derkowska-Sitarz M., Adamczyk-Lorenc A., Wpływ składników mineralnych rozpuszczonych w wodzie pitnej na organizm człowieka, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* 123, 39–48, 2008.
- [4] Wiggins Ph. M., *Role of water in some biological processes*. Microbiological Reviews 54, 432–449, 1990.
- [5] Bolanowski M., Zadrozna-Śliwka B., Zatońska K., *Badanie składu masy ciała - metody i możliwości zastosowania w zaburzeniach hormonalnych*, Endokrynologia, Otyłość, Zaburzenia Przemiany Materii 1(1), 20–25, 2005.
- [6] Gawęcki J., Brzozowska A., *Woda w żywieniu i jej źródła*, Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego, Poznań, 2008
- [7] Stewart A.D., *Kinanthropometry and body composition: a natural home for three-dimensional photonic scanning*, Journal of Sports Sciences 28(5), 455–457, 2010.
- [8] Wang Z. M., Pierson R. N., Heymsfield S.B., *The five-level model: a new approach to organizing body-composition research*, American Journal of Clinical Nutrition, 56(1), 19–28, 1992.
- [9] Lukaski H.C., *Methods for the assessment of human body composition: traditional and new*, American Journal of Clinical Nutrition 46(4), 537–556, 1987.
- [10] Bazzocchi A., Diano D., Albisinni U., Marchesini G., Battista G., Guglielmi G., *Liver in the analysis of body composition by dual-energy X-ray absorptiometry*, British Journal of Radiology 87, 1041, 2014.
- [11] Heymsfield S., Wang Z., Baumgartner R.N., Ross R. *Human body composition. Advances in Models and Methods*. Annual Review of Nutrition 17, 527–58, 1997.
- [12] Joakimsen R.M., Fonnebo V., Magnus J.H., Tollan A., Sogaard A.J., *The Tromso study: body height, body mass index and fractures*, Osteoporosis International 8, 436–442, 1998.
- [13] Bergman P., Janusz A., *Bioelektryczna metoda określania składu ciała człowieka*, Wyższa Szkoła Pedagogiczna, Słupsk, 1992.

- [14] Bergman P., *Zróźnicowanie komponentów ciała człowieka w zależności od wybranych czynników endo- i egzogennych w świetle bioelektrycznej metody impedancji*, Studia i Monografie 1(52) Wrocław, Akademia Wychowania Fizycznego, 1997.
- [15] Barnett A., *Electrical method for studying water metabolism and translocation in body segments*, Proceedings of Society for Experimental Biology and Medicine 44, 142–147, 1940.
- [16] Thomasset A., *Bio-electrical properties of tissue impedance measurements*, Lyon Medical 207, 107–118, 1963.
- [17] Hoffer E.C., Meador C.K., Simpson D.C., *Correlation of whole-body impedance with total body water volume*, Journal of Applied Physiology 27, 531–534, 1969.
- [18] Hermann L., *Über eine Wirkung galvanischer Ströme auf Muskeln und Nerven*, Pflügers Archiv: European Journal of Physiology 5, 223–275, 1871.
- [19] Kyle U.G., Bosaeus I., De Lorenzo A.D., *Bioelectrical impedance analysis-part I: review of principles and methods*. Clinical Nutrition 23, 1226–1243, 2004.
- [20] https://vitako.pl/upload_pliki_produkty/30/9e1f047d05fa7d06c57bc1c3045598b7.pdf, (dostęp: 10.07.2020)

*Piotr Wójcicki

Wybrane zagadnienia metod optycznego rozpoznawania znaków

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące metod optycznego rozpoznawania znaków: podział systemów rozpoznawania, rodzaje pisma, etapy rozpoznawania, proces uczenia oraz generowane błędy.

Słowa kluczowe: OCR, optyczne rozpoznawanie znaków, uczenie maszynowe

Selected issues of optical character recognition methods

Abstract: The paper presents selected issues regarding optical character recognition methods: division of recognition systems, types of writing, stages of recognition, learning process and generated errors.

Keywords: OCR, Optical Character Recognition, machine learning

1. Wstęp

Optyczne rozpoznawanie znaków (ang. OCR – Optical Character Recognition) polega na wykryciu w pliku graficznym występujących w danym alfabecie liter, cyfr i innych znaków. Optyczne rozpoznawanie znaków jest podzbiorem obszaru rozpoznawania wzorców (ang. Pattern Recognition). Pismo jest jednym z najbardziej naturalnych sposobów gromadzenia, przechowywania oraz przekazywania informacji. Jest to sposób komunikacji nie tylko ludzi z ludźmi ale również ludzi z maszynami. Intensywne prace nad rozpoznawaniem pisma były związane z próbą przeprowadzenia symulacji czytania. Drugim popularnym zastosowaniem istotnie wpływającym na rozwój systemów OCR była próba automatyzacji procesu przetwarzania dużej ilości tekstu i przesyłania danych do urządzeń [1]. Próba kopiowania funkcji naturalnie wykonywanych przez ludzi i wykorzystywanie urządzeń do zadań typowo ludzkich stało się silnym impulsem do rozwoju tego obszaru nauki. Początek wykrywania znaków sięga roku 1870, kiedy stworzono skaner siatkówki wykorzystujący mozaikę fotokomórek do transmisji obrazu. Początkowe prace prowadzone nad systemami rozpoznawania znaków były motywowane chęcią pomocy dla osób

* p.wojcicki@pollub.pl, Katedra Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

niepełnosprawnych wzrokowo [2,3]. Ówczesne systemy OCR były przystosowane do wykrywania jedynie drukowanego maszynowo tekstu lub bardzo dobrze przygotowanego pisma odręcznego i symboli. Wykorzystywano do tego porównanie danej próbki z biblioteką obrazów. Uproszczone algorytmy z powodzeniem wykrywały znaki i cyfry alfabetu łacińskiego. Intensywne prace badawcze zaczęły być prowadzone w latach pięćdziesiątych XX wieku, kiedy urządzenia rozpoznające znaki były dostępne do zastosowań komercyjnych. Pierwsza maszyna do odczytu znaków została zainstalowana w wydawnictwie Reader's Digest w 1954 roku i była używana do przekształcania pisanych na maszynie raportów sprzedaży na dziurkowane karty wprowadzane do komputera. Urządzenia tzw. pierwszej generacji OCR pojawiały się do połowy lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku i charakteryzowały się bardzo ograniczonymi możliwościami – rozpoznawanie liter o konkretnym kształcie. Zmiana czcionki powodowała błędy lub całkowity brak rozpoznania. Pojawienie się na przełomie lat siedemdziesiątych urządzeń rozpoznających odręczne pismo drukowane było początkiem czytników drugiej generacji. Rozpoczął się etap prac nad normalizacją symboli i w efekcie powstały dwa standardy OCR – A (amerykański zestaw znaków OCR) oraz OCR – B (europejski zestaw znaków OCR). Na Rys. 1 pokazano zestaw OCR – A oraz OCR – B [1].

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Y	Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

OCR - A

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Y	Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

OCR - B

Rys. 1. Standardowy zestaw znaków OCR – A oraz OCR – B [1]

Obecnie istnieje silna potrzeba konwersji papierowych książek i dokumentów na format cyfrowy. Rosnąca liczba urządzeń elektronicznych zdolnych przeprowadzić operację rozpoznawania i poprawnej klasyfikacji znaków powoduje ciągłe udoskonalanie metod OCR. Klasyfikacja pojedynczego znaku składa się z kilku etapów.

Celem tej pracy jest przedstawienie wybranych zagadnień dotyczących optycznego rozpoznawania znaków oraz podsumowanie badań realizowanych w tym obszarze. Kolejne części dotyczą systemów OCR, rozróżnianych rodzajów pisma, etapów rozpoznawania, procesu uczenia oraz rodzajów błędów powstających przy klasyfikacji znaków.

2. Systemy rozpoznawania

Optyczne rozpoznawanie znaków (OCR) to procedura przekształcenia tekstu wejściowego najczęściej w formie obrazu na tekst zakodowany maszynowo, podatny na analizę oraz edytowalny. Aktualnie OCR wykorzystywany jest głównie w digitalizacji rękopisów, dokumentów pisanych na maszynie oraz tradycyjnych książek. Postać cyfrowa ułatwia wyszukiwanie informacji, umożliwia edycję i powielanie. Dodatkowym atutem jest redukcja przestrzeni potrzebnej do przechowywania dokumentów i książek.

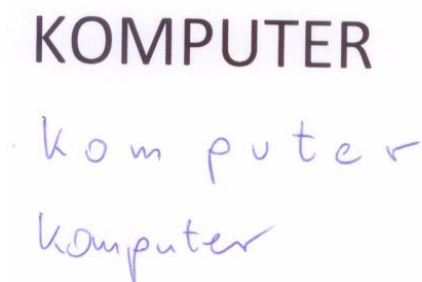
Podstawowy podział systemów OCR to systemy offline i online. Systemy offline otrzymują jako dane wejściowe zeskanowany obraz – rozpoznanie odbywa się w oparciu o statystykę i prawdopodobieństwo. Rozpoznawanie przy użyciu systemu online odbywa się już podczas pisania, poprzez analizę ruchu końcówki pióra (np. w tablecie graficznym). Ze względu na dynamiczny charakter wejścia analizowane są: prędkość pisania, nachylenie znaków, kierunek zakresłania oraz pozycje. Systemy online są uważane za bardziej złożone, a jednocześnie skuteczniejsze [1,4].

3. Rodzaje pisma

W literaturze występuje podział pisma, ze względu na rodzaj [3,5–9]. Wyróżniane jest pismo:

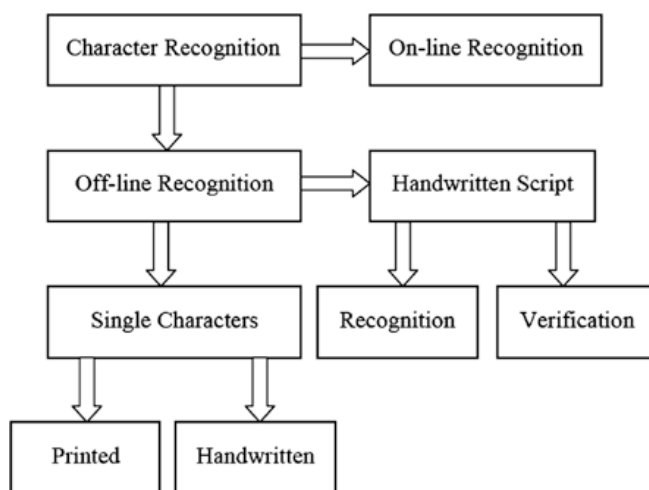
- drukowane (ang. *Printed*) – przykładem może być zwykła książka lub dowolny inny wydrukowany tekst
- pisane odręcznie z separacją (ang. *Handprinted*) – przykładem może być dowolny formularz wypełniony ręcznie, gdzie każdy znak jest odseparowany od pozostałych
- pisane odręcznie bez separacji (ang. *Handwritten*) – przykładem może być dowolny tekst pisany ręcznie, gdzie znaki w obrębie wyrazu są połączone

Na Rys. 2 przedstawiono wyszczególnione rodzaje pisma.



Rys. 2. Rodzaje pisma: drukowane, pisane odręcznie z separacją znaków i pisane odręcznie bez separacji znaków; opracowanie własne

W celu lepszego rozpoznania i konwersji należy najpierw określić do jakiej grupy zaliczamy dany tekst. Wybór odpowiedniego rodzaju tekstu wejściowego jest istotny, ponieważ każdy rodzaj tekstu wymaga przeprowadzenia innych operacji. Na Rys. 3 pokazano obszary rozpoznawania pisma w zależności od rodzaju.



Rys. 3. Obszary rozpoznawania pisma w zależności od rodzaju [1]

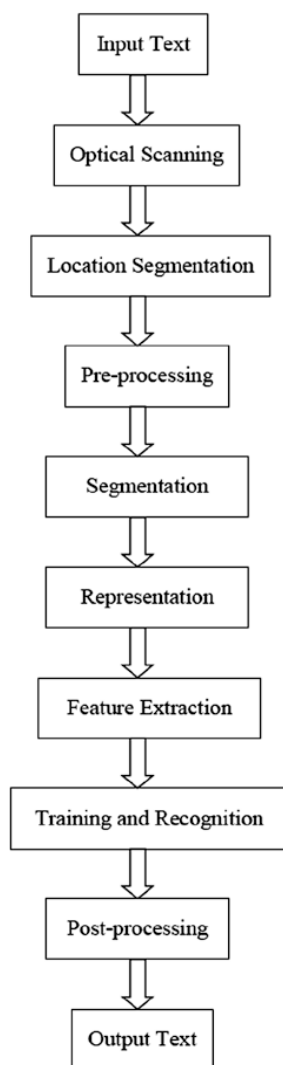
System rozpoznający pismo danego rodzaju musi wykonać określone zadania. W przypadku pisma drukowanego oraz pisanego odręcznie z separacją znaków procedura rozpoznawania jest skrócona – każdy znak jest już oddzielony od pozostałych.

4. Etapy rozpoznawania

Podstawową koncepcją optycznego rozpoznawania znaków jest nauczenie maszyny jaka klasa wzorców może wystąpić w danej próbce oraz jak wyglądają elementy wzorcowe. Zestaw wzorcowy OCR może zawierać w zależności od zastosowania np. same cyfry, litery, znaki specjalne lub symbole. Nauka maszyny odbywa się poprzez wielokrotne dopasowanie i zapamiętanie dostarczonego obrazu znaku wraz z etykietą. Dla jednej klasy znaków (np. litery A) takie dopasowanie musi być powtórzone wielokrotnie, ponieważ każdy napisany znak jest inny z punktu widzenia maszyny. Zapisanie znaku pod innym kątem lub w inny sposób nie może być powodem nierozpoznania lub błędnej klasyfikacji. Z tego powodu bazy zawierające zbiory uczące są bardzo obszerne – przykładowo baza danych MNIST samych cyfr (0–9) zawiera zbiór 60000 obrazów uczących i 10000 obrazów testowych wraz z etykietami. Typowy system OCR składa się z kilku elementów jak pokazano na Rys. 4. Pierwszym krokiem jest przekształcenie dokumentu analogowego na postać cyfrową przy użyciu skanera optycznego. Po utworzeniu pliku graficznego jest on wstępnie przetwarzany. Na tym etapie odbywa się usuwanie artefaktów i eliminacja szumów (kratki, linie, rysunki niepowiązane z tekstem, zanieczyszczenia papieru). Następnie lokalizowane są regiony zawierające tekst. Po odseparowaniu fragmentów zawierających rozpoznawane znaki następuje etap przygotowujący do dalszej segmentacji. W zależności od rodzaju pisma jakie zostało dostarczone jako wejście może wystąpić dodatkowy etap. W przypadku pisma odręcznego bez separacji znaków wyrazy składają się z liter połączonych ze sobą i niezbędne jest ich oddzielenie przed przejściem do kolejnego etapu. Złożony charakter tej operacji jest kluczowy dla odpowiedniego przygotowania tekstu. Ten etap nie występuje, jeżeli znaki są odseparowane na etapie powstawania pisma (pismo drukowane lub odręczne z separacją). Po odpowiednim przygotowaniu z obrazu ekstrahowane są cechy, na podstawie których określane jest prawdopodobieństwo przynależności badanego znaku do odpowiedniej klasy. Określenie przynależności do danej klasy znaków może mieć miejsce po wcześniejszym wytrenowaniu klasyfikatora przy wykorzystaniu zbioru uczącego [3,4,10].

Aktualnie najpopularniejszymi klasyfikatorami używanymi w rozpoznawaniu znaków [4, 9–13] są:

- sztuczne sieci neuronowe (ANN, ang. *Artificial Neural Network*)
 - Jednokierunkowe jednowarstwowe
 - Jednokierunkowe wielowarstwowe
 - Głębokie np. konwolucyjne (CNN, ang. *Convolutional Neural Network*)
- metoda wektorów nośnych (SVM, ang. *Support Vector Machine*)
- drzewa decyzyjne (ang. *Decision Trees*)



Rys. 4. Etapy rozpoznawania pisma [1]

4.1. Skanowanie

Pierwszym etapem rozpoznawania znaków jest optyczne skanowanie. Poprzez proces skanowania cyfrowy obraz oryginalnego dokumentu zostaje przygotowany do dalszego wykorzystania przez komputer. Podczas skanowania możliwe jest przeprowadzenie wstępnej obróbki obrazu np. poprzez konwersję na obraz w skali szarości lub czarno-biały. Taka operacja wykonana na etapie skanowania pozwala na zaoszczędzenie przestrzeni pamięciowej, co przy dużej

ilości dokumentów jest istotne. Dodatkowym atutem jest przyspieszenie późniejszych etapów i zmniejszenie obciążenia obliczeniowego.

4.2. Wstępne przetwarzanie

Na tym etapie obraz uzyskany po skanowaniu jest obrabiany w celu wyeliminowania wszystkich artefaktów mogących mieć negatywny wpływ na poprawne wykrycie znaku. W zależności od sposobu akwizycji (skaner, aparat) uzyskany obraz może być zaszumiony, rozmazany lub przekrzywiony np. poprzez skanowanie zagiętej strony książki. Zwykle procedowana na tym etapie jest również normalizacja wraz z wygładzaniem krawędzi w celu uzyskania znaków o jednolitym rozmiarze i nachyleniu. Wstępne przetwarzanie ma na celu wytworzenie danych, które są bardziej podatne na przetwarzanie przez system OCR.

4.3. Lokalizacja tekstu

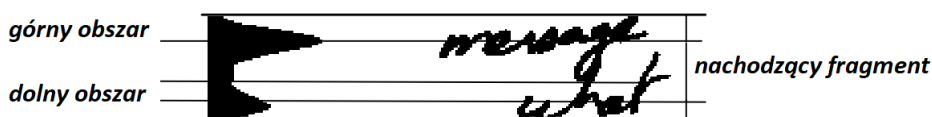
Kolejnym etapem OCR jest wyodrębnienie z obrazu fragmentów zawierających tylko tekst i całkowite pominięcie rysunków lub wykresów. Ekstrakcja odbywa się najpierw na poziomie wierszy. W następnej kolejności w każdej linijce wykrywane są wyrazy. Zwykle segmentacja odbywa się poprzez izolację komponentów np. przy użyciu metody histogramów. Jeżeli badany tekst zawiera pismo drukowane lub odręczne z separacją znaków po tym etapie możliwa jest ekstrakcja cech (pomijany jest etap rozdzielania wyrazów na litery).

4.4. Segmentacja wyrazów

Ten etap występuje wyłącznie w systemach OCR wykorzystujących jako dane wejściowe pismo odręczne bez separacji znaków. Polega na rozdzieleniu liter w danym wyrazie w taki sposób, aby były one rozpoznawalne w późniejszym etapie. Jest to operacja bardzo problematyczna, ponieważ występuje bardzo duża trudność w ekstrakcji znaków, które łączą się ze sobą w więcej niż jednym miejscu. Dodatkową przeszkodą w poprawnym oddzieleniu znaków może być pismo pochyle lub nachodzące na siebie wiersze [13]. Przedstawione problemy skutecznie eliminują możliwość wykorzystania metody histogramów do poprawnej separacji znaków. Na Rys. 5 przedstawiono przykładowy tekst powodujący problemy segmentacji. Rys. 6 przedstawia tekst z nachodzącymi na siebie wyrazami oraz pionowy histogram.

This paragraph is prepared for document segmentation
that is performed by a system running UNIX.
Please inform your friends and relatives if possible
to spread this message to all.
Now the problem is to find what is the problem,
define its range and report it for further action.

Rys. 5. Przykładowy tekst z nachodzącymi na siebie literami [13]



Rys. 6. Przykładowy tekst ze złączonymi literami [13]

4.5. Ekstrakcja cech i klasyfikacja

Obrazy potencjalnych i odseparowanych znaków są traktowane jako dane wejściowe tego etapu. W zależności od rodzaju rozpoznawanego pisma poprzednie operacje mogły się różnić. Głównym celem tego etapu jest wydobywanie z przekazanego obrazu cech charakterystycznych dla danego symbolu. Wyodrębnienie cech jest zaraz po separacji wyrazów najtrudniejszym problemem związanym z rozpoznawaniem wzorców. Spotykane w literaturze rozwiązania zakładają analizę obrazów rastrowych i wyodrębnienie kluczowych dla danego znaku atrybutów. Odpowiednio przetworzony obraz (np. otrzymany z gotowej bazy danych MNIST) o określonych rozmiarach (np. 28×28 pikseli) jest przedstawiany jako macierz wartości 0 i 1, gdzie umownie „0” oznacza kolor czarny, natomiast „1” oznacza kolor biały. Macierz 28×28 zostaje zamieniona na wektor wejściowy 784-elementowy i w zależności od użytego klasyfikatora (np. jednowarstwowej sieci neuronowej lub konwolucyjnej sieci neuronowej) oraz wyuczonego modelu jest on przetwarzany w celu uzyskania prawdopodobieństwa na ile rozpatrywany obraz jest podobny do każdej klasy wyjściowej. Znak jest rozpoznany jeżeli w wyniku przeprowadzonej klasyfikacji jedna z klas wyjściowych uzyskała wysokie podobieństwo do danych uczących [7, 8, 14].

5. Proces uczenia

W celu poprawnego zaklasyfikowania danego obrazu jako literę, cyfrę lub inny znak przed przystąpieniem do rozpoznawania należy wykorzystać co najmniej jeden z algorytmów uczących (ang. *Learning algorithms*). Tworzony jest w ten sposób model na podstawie zestawu danych uczących. W literaturze [15–17] wyróżniamy podstawowe procesy uczenia maszynowego:

- Uczenie nadzorowane (z nauczycielem, ang. *supervised learning*) – do utworzenia modelu wykorzystuje się zbiór danych zawierający etykiety
- Uczenie nienadzorowane (bez nauczyciela, ang. *unsupervised learning*) – do utworzenia modelu wykorzystuje się zbiór danych nie zawierający etykiet
- Uczenie na bieżąco (ang. *online learning*) – do utworzenia modelu wykorzystuje się bieżące dane. Strumień danych ulega ciągłym zmianom i model jest douczany w trakcie eksploataowania
- Uczenie ze wzmocnieniem (ang. *reinforcement learning*) – do utworzenia modelu wykorzystuje się iteracje, dzięki którym model jest poprawiany w oparciu o tzw. wzmocnienie

6. Zbiory uczące

W pracy [8] przedstawiono wykorzystanie bazy danych odręcznych cyfr MNIST. Cyfry zostały znormalizowane pod względem wielkości i przygotowane do stosowania jako dane wejściowe do ulepszanych systemów OCR. Wyśrodkowane cyfry są prezentowane na obrazach o stałych rozmiarach. Baza danych MNIST jest podzbiorem większej bazy NIST, która zawiera ręcznie pisane, odizolowane znaki (cyfry, małe i wielkie litery oraz pola tekstowe) wyekstrahowane z formularzy. Głównymi założeniami bazy NIST jest zebranie i zestawienie odręcznie pisanych próbek od 3600 autorów w wyniku czego przechowywane jest ponad 800000 zdjęć z ręcznie sprawdzoną klasyfikacją oraz nadaną etykietą. Jest to największa baza obrazów przeznaczonych do badania odręcznie wytwarzanych dokumentów i badań OCR. Baza cyfr MNIST składa się z 60000 znaków w zbiorze uczącym oraz 10000 znaków w zbiorze testowym. Jest dostępna na licencji Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0. Wykorzystanie bazy może być traktowane jako punkt odniesienia w stosowaniu nowych technik uczenia maszynowego. Dodatkowym atutem jest ograniczenie przetwarzania wstępnego i formatowania z uwagi na gotowy zestaw danych uczących oraz testowych. Obrazy przechowywane w bazie nie mają żadnego standardowego formatu i do odczytania plików niezbędne jest napisanie prostego autorskiego programu. Dane przechowywane są w formacie pliku przeznaczonym do zapisu wektorów i macierzy wielowymiarowych. Wszystkie szczegółowe i niezbędne informacje dostępne są na stronie autora [14].

7. Błędy w systemach OCR

Błąd w systemie OCR oznacza złe rozpoznanie znaku, a w konsekwencji całego słowa. Zdecydowana większość błędów otrzymywanych z systemów OCR pochodzi z etapu skanowania oraz segmentacji wyrazów. Źródła literaturowe wskazują również występowanie błędów klasyfikacji pomimo poprawnie przeprowadzonego etapu skanowania i segmentacji. W zależności od rodzaju pisma (drukowane, odręczne z separacją, odręczne bez separacji) procentowy udział błędnie rozpoznanych znaków będzie inny. Najwięcej błędów segmentacji oraz poprawnej klasyfikacji występuje przy rozpoznawaniu pisma odręcznego bez separacji. Błędy skanowania są powodowane głównie złą jakością danych źródłowych (dokumenty, książki, formularze). Dla systemów OCR dużo bardziej krytyczne są błędy segmentacji oraz klasyfikacji. Ze względu na rodzaj błędów oraz skutki jakie mogą powodować w literaturze [7, 18] wyróżniono następujące klasy błędów:

- Błąd segmentacji
- Błąd non-word
- Błąd real-word

7.1. Błąd segmentacji

Błąd występuje w sytuacji niepoprawnie przeprowadzonej operacji segmentacji wyrazów. Wynika głównie z nieprawidłowo dobranego algorytmu separacji dla danego rodzaju pisma. Na ten rodzaj błędu najbardziej narażone jest pochyłe pismo odręczne bez separacji znaków.

7.2. Błąd non-word

Błędy klasy non-word są skutkiem złego rozpoznania pojedynczego znaku. Wynikiem takiego działania jest wyraz który nie istnieje w danym języku lub słowniku. Przykładem takiego błędu może być wykrycie cyfry 1 w wyrazie „litera” w wyniku czego powstaje wyraz „litera”. W przypadku, gdy jakiś znak błędnie rozpoznany występuje w wyrazie wiele razy poprawa jest trudniejsza. Przykładem takiej sytuacji jest wyraz „opona” – błąd klasyfikacji litery „o” może spowodować powstanie wyrazu składającego się częściowo z cyfr „0p0na”.

7.3. Błąd real-word

Błędy klasy real-word podobnie jak błędy non-word polegają na złym rozpoznaniu pojedynczego znaku, jednak wynikiem błędu tego rodzaju jest wyraz istniejący w danym języku lub słowniku ale niepoprawne pod względem semantycznym lub gramatycznym. Przykładem takiego błędu jest zamiana słowa „kot” na słowo „kat” – oba wyrazy znajdują się w słowniku ale mają zupełnie inne znaczenie.

8. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój metod optycznego rozpoznawania znaków ułatwia i przyspiesza komunikację człowieka z komputerem. Metody wykorzystywane w OCR osiągnęły wysoki poziom rozpoznawania i są wykorzystywane komercyjnie, jednak nie dla każdego rodzaju pisma. Proces automatycznej klasyfikacji znaków przy użyciu sztucznej inteligencji znacząco przyspiesza procesy digitalizacji zbiorów książkowych oraz dokumentów.

Literatura

- [1] Chaudhuri S., Mandaviya A., Badelia K., Ghosh P., *Optical Character Recognition System for Different Languages with Soft Computing*, Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2017.
- [2] Cheriet M., Kharm N., Liu C., Suen C., *Character Recognition Systems*, Character Recognit. Syst., 2007.
- [3] Amaral G. et al., *Advances in Digital Image Processing and Information Technology* 369, 2013.
- [4] Choudhary A., Rishi R., Ahlawat S., *A new approach to detect and extract characters from off-line printed images and text*, Procedia Comput. Sci. 17, 2013.
- [5] Ahmed M., Abidi A., *Review on Optical Character Recognition*, Irjet 06, 2019.
- [6] Ruiz V., Linares I., Sanchez A., Velez J., *Off-line handwritten signature verification using compositional synthetic generation of signatures and Siamese Neural Networks*, Neurocomputing 374, 2019.
- [7] Hafemann L., Sabourin R., Oliveira L., *Analyzing features learned for Offline Signature Verification using Deep CNNs*, Proc. - Int. Conf. Pattern Recognit., 2016.
- [8] Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., Ha P., *LeNet*, Proc. IEEE, no. November, 1998.
- [9] Louloudis G., Gatos B., Pratikakis I., Halatsis C., *Text line and word segmentation of handwritten documents*, Pattern Recognit. 42, 2009.
- [10] Aubin V., Mora M., Santos-Peñas M., *Off-line writer verification based on simple graphemes*, Pattern Recognit. 79, 2018.
- [11] Nguyen H., Nguyen C., Ino T., Indurkha B., Nakagawa M., *Text-independent writer identification using convolutional neural network*, Pattern Recognit. Lett. 121, 2019.
- [12] Achkar R., Ghayad K., Haidar R., Saleh S., Al Hajj R., *Medical handwritten prescription recognition using CRNN*, Proceeding Int. Conf. Comput. Inf. Telecommun. Syst., 2019.
- [13] Takru K., Leedham G., *Separation of touching and overlapping words in adjacent lines of handwritten text*, Proc. - Int. Work. Front. Handwrit.

- Recognition, 2002.
- [14] <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/index.html> (data dostępu: 9.07.2020 r.).
 - [15] Bi N., Suen C., Nobile N., Tan J., *A multi-feature selection approach for gender identification of handwriting based on kernel mutual information*, Pattern Recognit. Lett., 121, 2019.
 - [16] Memon J., Sami M., Khan R., *Handwritten Optical Character Recognition (OCR): A Comprehensive Systematic Literature Review (SLR)*, IEEE Access 8, 2019.
 - [17] Yadav U., Verma S., Xaxa D., Mahobiya C., *A deep learning based character recognition system from multimedia document*, Innov. Power Adv. Comput. Technol. i-PACT 2017, 2017.
 - [18] Ahmed F., De Luca E., Nürnberger A., *Revised N-Gram based Automatic Spelling Correction Tool to Improve Retrieval Effectiveness*, Polibits 40, 2009.

Sterowanie zwrotnic trolejbusowej sieci trakcyjnej oparte o funkcjonalną generację indywidualnych kodów pojazdów

Streszczenie: Podczas prowadzenia trolejbusu, jego kierowca, poza wszystkimi czynnościami jakie wykonują kierowcy innych pojazdów, steruje zwrotnicami zainstalowanymi na sieci trakcyjnej. Ta dodatkowa czynność wpływa negatywnie na skupienie jego uwagi oraz koncentrację. W celu ograniczenia tych negatywnych skutków wprowadzane są różne metody sterowania zwrotnicami sieci trakcyjnej. Ich ocena ze względu na łatwość sterowania, niezawodność, bezpieczeństwo, absorpcję uwagi kierowcy i wpływ na trakcję pojazdu jest celem artykułu. W artykule przedstawiono ponadto metodę sterowania zwrotnicami sieci trakcyjnej opartą o generację indywidualnych kodów pojazdów.

Słowa kluczowe: zwrotnice, sterowanie, sieć trakcyjna

Control of trolleybus traction network switch points based on the functional generation of individual vehicle codes

Abstract: While driving a trolleybus, his driver, in addition to all activities performed by drivers of other vehicles, controls the switch points installed on traction network. This additional activity negatively affects his attention and concentration. To reduce these negative effects, various methods are used to control traction network. Their assessment due to the ease of control, reliability, safety, absorption of the driver's attention and impact on the vehicle's traction is the aim of the article. The article also presents the method of controlling switch points on traction network based on the generation of individual vehicle codes.

Keywords: switch points, control, traction network

1. Wstęp

Wszystkie obecnie wprowadzane do ruchu pojazdy, cechuje mnogość rozwiązań i systemów wspomagających pracę kierowcy. Zmniejszają one ilość

*pholyszko@mpk.lublin.pl, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

czynności jakie musi wykonywać kierowca, ograniczając rozproszenie spowodowane zbyt dużą ilością bodźców [1].

Zagadnienia związane wprowadzaniem innowacyjnych rozwiązań w technice trolejbusowego transportu zbiorowego są obficie opisywane w literaturze. Opisują one wykorzystanie autonomicznych źródeł energii zainstalowanych w pojazdach [2,3] oraz wspomagających pracę sieci trakcyjnej [4,5]. Przedstawiają rozwiązania pozwalające na zmniejszenie straty przesyłu energii w sieci trakcyjnej [6] oraz opisują zjawiska związane rekuperacją energii [7]. Analizują zagadnienia związane ze zużyciem energii oraz technikami ekonomicznej i ekologicznej jazdy [8,9]. Często podejmowane są tematy związane z topologią trolejbusowych układów napędowych oraz funkcjonalnościami jakie muszą one zapewnić aby sprostać wymaganiom kierowców i pasażerów w tym zakresie [10,11].

Jedną z czynności jakie wykonuje kierowca prowadząc trolejbus jest sterowanie zwrotnicami sieci trakcyjnej. Czynność ta nie jest wykonywana przez kierowców innych pojazdów. Istnieje wiele metod sterowania zwrotnicami trolejbusowej sieci trakcyjnej. Zmianę toru zasilania trolejbusu można wykonać wychodząc z pojazdu i ręcznie zmieniając miejsce podłączenia odbieraków prądu do sieci trakcyjnej, poprzez zwrotnice prądowe, które reagują na pobór prądu przez trolejbus, jak również różnego rodzaju sterowanie radiowe. Wszystkie te metody absorbują jednak uwagę kierowcy oraz zwiększają ilość czynności jakie musi on wykonać prowadząc trolejbus.

W ostatnim czasie na rynku pojawił się system, który zestawia drogę połączeniową na sieci trakcyjnej, prowadząc kierowcę i trolejbus do wcześniej zakodowanego miejsca. Istnieją jednak sytuacje, w których miejsce docelowe i sposób dojazdu zmienia się dynamicznie w zależności od warunków trakcyjnych, pojazdu jaki prowadzi kierowca, rozkładu jazdy realizowanego przez kierującego oraz decyzji obsługi technicznej pojazdu. Najczęściej zajezdnie trolejbusowe cechuje duża ilość zainstalowanych na sieci trakcyjnej izolatorów sekcyjnych, zjazdów i zwrotnic, których sterowanie wymaga od kierowcy koncentracji, skupienia uwagi, co przy wzmożonym ruchu panującym na zajezdniach podczas wyjazdów porannych i zjazdów nocnych prowadzi niejednokrotnie do kolizji oraz uszkodzeń odbieraków prądu powodując straty materialne [12].

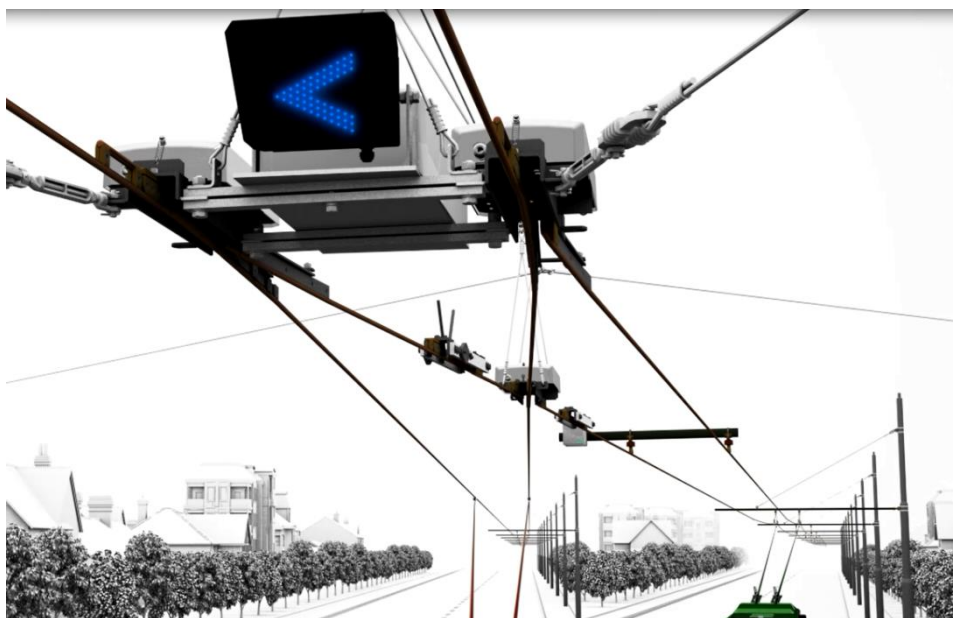
Istnieje zatem problem badawczy oceny możliwości wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań do sterowania zwrotnic trolejbusowej sieci trakcyjnej zainstalowanej na zajezdniach trolejbusowych. Problem ten w niniejszym artykule analizowany jest na podstawie krytycznego przeglądu istniejących metod sterowania zwrotnic przy zasilaniu trolejbusu z sieci trakcyjnej. Celem badawczym jest natomiast analiza skuteczności i niezawodności prezentowanych w pracy rozwiązań.

Praca podzielona jest na 5 merytorycznych rozdziałów, w których kolejno scharakteryzowano zjawisko oraz przeanalizowano dostępne rozwiązania,

sformułowano ich ocenę oraz skuteczność. Końcowym efektem artykułu jest przedstawienie metody generowania indywidualnych kodów, prowadzących kierowcę i trolejbus do miejsca docelowego, w zależności od rodzaju pojazdu, jego numeru inwentarzowego oraz rozkładu jazdy jaki zrealizował.

2. Funkcja zwrotnic trolejbusowej sieci trakcyjnej

Zwrotnice zainstalowane na trolejbusowej sieci trakcyjnej umożliwiają zmianę toru zasilania trolejbusu. Zgodnie z normami prawnymi zasięg odbieraków prądu zainstalowanych na trolejbusie umożliwia odjechanie pojazdu od osi sieci trakcyjnej do 4,5 m w lewo i w prawo. Powoduje to, że jeden tor sieci trakcyjnej może obsłużyć trzy pasy ruchu w jednym kierunku. W przypadku napotkania przez trolejbus skrzyżowania rozjazdu lub ronda



Rys. 1. Zwrotnica zainstalowana na trolejbusowej sieci trakcyjnej

wymagana jest zmiana toru zasilania z sieci trakcyjnej. Rys. 1 przedstawia zwrotnice sieci trakcyjnej oraz odbieraki prądu dwóch trolejbusów. Rozkład jazdy zielonego auta biegnie rozjazdem w prawo a czerwonego w lewo. Zmianę toru zasilania umożliwia sterowana radiowo zwrotnica z wyświetlaczem wskazującym kierunek aktualnie zestawionego toru zasilania.

3. Sposoby zmiany toru zasilania

Zmianę toru zasilania trolejbusu można uzyskać poprzez manualne przełączenie odbieraków prądu na inny tor sieci trakcyjnej. Ta metoda wykorzystywana była w czasie, gdy nierozwinięta była technika związana ze zwrotnicami sieci trakcyjnej. Obecnie również można spotkać wykorzystywanie tej metody, lecz ograniczone jest to do sytuacji awaryjnych [13] i przypadków jednostkowych. Wymaga to od kierowcy sporych umiejętności. Trolejbus podczas ręcznej zmiany toru zasilania musi zostać ustawiony w sposób, który zapewnia zasilanie z odcinka sieci trakcyjnej, z której aktualnie zasilany jest pojazd, oraz tak aby odbieraki prądu obejmowały swoim zasięgiem odcinek sieci trakcyjnej, do którego ma zostać podłączony trolejbus. Sposób manualnej zmiany toru zasilania trolejbusu przedstawia rys. 2.

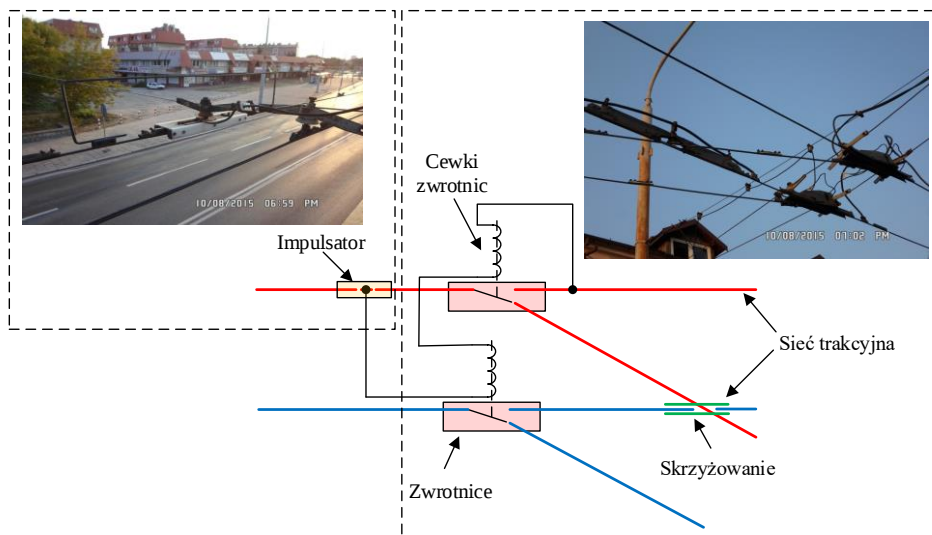


Rys. 2. Manualna zmiana toru zasilania trolejbusu.

Operacja ta wymaga opuszczenia pojazdu przez kierowcę. O ile w warunkach zajezdni jest to proste, o tyle podczas wykonywania manualnego przełączenia w ruchu miejskim stanowi spore zagrożenie dla kierowcy i wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na pozostałych uczestników ruchu drogowego. Do tego dochodzi, w zależności od warunków, oślepiające słońce lub padający deszcz. Osobnym zagrożeniem są bębny zwijające linki odbieraków z bezwładnościowym mechanizmem uruchamiającym opuszczenie odbieraków poniżej poziomu sieci trakcyjnej. Problemy te spowodowały rozwój techniki automatycznych zwrotnic sieci trakcyjnej.

Stosowaną do niedawna metodą zmiany toru zasilania trolejbusów było wykorzystywanie zwrotnic sterowanych prądowo. Schemat takiej zwrotnicy i sposób działania przedstawia rys 3. W pobliżu zwrotnicy zainstalowany jest impulsator. Jeżeli kierowca przejedzie przez impulsator z rozruchem spowoduje

przepływ prądu przez cewki zwrotnic i przełoży za pomocą zwrotnicy kierunek jazdy na inny wymagany tor. Głowice odbieraków po przejechaniu przez zwrotnicę powodują zluzowanie zapadek przez co zwrotnica wraca do początkowej pozycji. Jeżeli kierowca nie chce przestawiać zwrotnicy przejeżdża przez impulsator na wybiegu nie powodując reakcji zwrotnicy. Ten rodzaj sterowania znacząco absorbuje uwagę kierowcy oraz ma duży wpływ na trakcję pojazdu. Taki sposób sterowania zwrotnicami był akceptowalny w sytuacji, gdy natężenie ruchu pojazdów w mieście było małe, eksploatowane trolejbusy nie umożliwiały rekuperacji energii do sieci trakcyjnej, a kierowca zawsze miał wpływ na to czy trolejbus pobiera lub oddaje do sieci trakcyjnej prąd przekraczający 100 A. Obecnie większość trolejbusów eksploatowanych na świecie posiada autonomiczne źródła energii. Najczęściej są to baterie elektrochemiczne, które są ładowane podczas zasilania trolejbusu z sieci trakcyjnej. Do tego wzrost ilości i mocy pomocniczych urządzeń pokładowych takich jak systemy ogrzewania, klimatyzacji, systemy informacji pasażerskiej oświetlenie itp. powoduje, że z sieci trakcyjnej podczas jazdy pobierana jest znaczna wartość prądu, niezależnie od trybu pracy układu napędowego. Także potrzeba hamowania przy przejeździe przez impulsator powodowała przełożenie zwrotnicy.



Rys. 3. Schemat zwrotnicy sieci trakcyjnej sterowanej prądem

Obecnie większość zwrotnic sieci trakcyjnej sterowana jest radiowo. System umożliwia sterowanie zwrotnicami za pomocą czterech kanałów częstotliwościowych. Na pulpicie kierowcy znajdują się przyciski odpowiadające za wysterowanie każdego z kanałów zwrotnic rys. 4a. Tabliczka z numerem

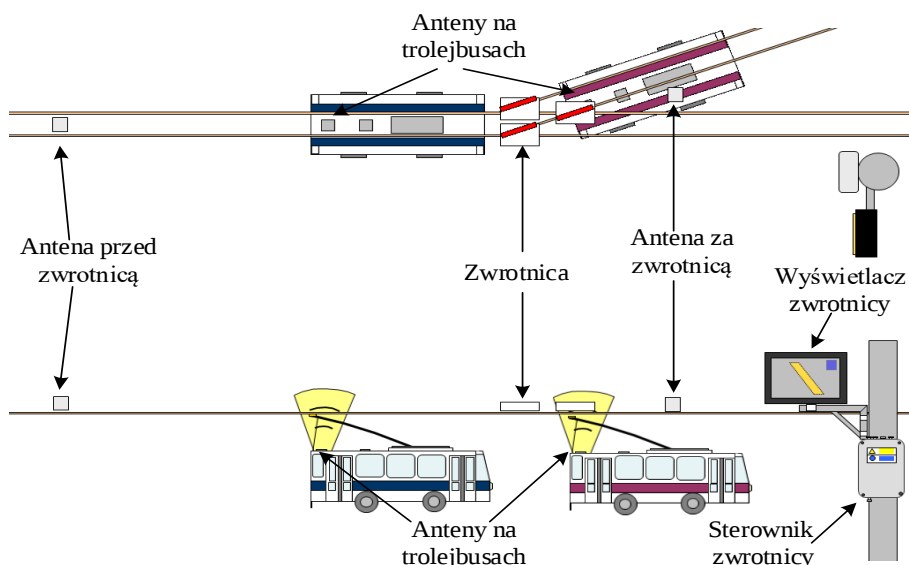
kanalu, który steruje daną zwrotnicą zainstalowana jest na sieci trakcyjnej jak przedstawiono na rys. 4b. Wciskając odpowiedni przycisk kierowca przestawia położenie zwrotnicy, której aktualny stan wyświetlany jest na monitorze zawieszonym na sieci trakcyjnej. Zasięg sterowników zainstalowanych w trolejbusach wynosi około 100 m. System nie kolejkuje nadjeżdżających pojazdów, nie wykrywa też czy dany trolejbus przejechał już pod daną zwrotnicą.



Rys. 4. a) Przyciski na pulpicie kierowcy A, B, C, D odpowiadające wysterowaniu kanałów zwrotnic odpowiednio 1, 2, 3, 4, b) Numer kanału zwrotnicy naklejony na tabliczce przyczepionej do sieci trakcyjnej.

Z tego powodu istnieje duże ryzyko związane z możliwością przełączenia położenia zwrotnicy przez kierowcę innego trolejbusu przez pomyłkę lub w sytuacji gdy nie zauważy on, że znajdujący się przed nim trolejbus nie jest jeszcze za zwrotnicą. Inną wadą systemu radiowego jest wykorzystywanie tylko czterech kanałów, przez co w sytuacji, w której w zasięgu trolejbusu znajduje się więcej niż 4 zwrotnie jeden kanał wysteruje przynajmniej 2 zwrotnice.

Najnowszym stosowanym obecnie systemem sterowania zwrotnicami trolejbusowej sieci trakcyjnej jest system radiowy, prowadzący kierowcę do miejsca docelowego, które zadane jest czterocyfrowym kodem. Sposób działania systemu zobrazowano na rys. 5. W jego skład wchodzi anteny zainstalowane około 50 m przed zwrotnicą oraz anteny zainstalowane tuż za zwrotnicą, zwrotnica, wyświetlacz zwrotnicy, sterownik zwrotnicy oraz wyposażenie trolejbusów w postaci anteny znajdującej się na dachu trolejbusu w tylnej jego części i sterownik z panelem numerycznym wyposażonym w wyświetlacz dla kierowcy. Kierowca zadaje czterocyfrowy adres miejsca docelowego. Zwrotnica zaprogramowana jest między innymi danymi, które dla każdego istniejącego kodu miejsca docelowego przyporządkowują jej stan, tzn. żądanie ustawienia w prawo lub w lewo. Jeżeli więc na trasie przejazdu zaprogramowane są wszystkie zwrotnice, to tworzą one tor przejazdu dla danego kodu miejsca docelowego. Antena znajdująca się na tyle trolejbusu, w miejscu najbardziej zbliżonym do miejsca styku odbieraków prądu z siecią trakcyjną, wysyła do sterownika zwrotnicy informacje z kodem miejsca docelowego. Zwrotnica ustawia się odpowiednio, a potwierdzeniem jej ustawienia jest strzałka na wyświetlaczu zwrotnicy. Po przejechaniu przez zwrotnicę antena, znajdująca się na trolejbusie, wysyła informację do sterownika zwrotnicy poprzez antenę znajdującą się za zwrotnicą, o kodzie miejsca docelowego, dzięki temu w systemie pojawia się informacja o tym, że dany trolejbus przejechał już przez zwrotnicę.



Rys. 5. Sposób działania radiowego systemu sterowania zwrotnicami o nazwie Vetra

System kolejkuje trolejbusy w kolejności pojawienia się ich pod anteną znajdującą się przed zwrótnicą i usuwa z kolejki te, które przejechały już przez zwrótnicę. Problemy jakie pojawiają się podczas eksploatacji systemu wynikają z konieczności przejazdu trolejbusu pod antenami zwrótnicy. Jeżeli trolejbus nie zostanie zauważony przez antenę znajdującą się przed zwrótnicą, nie zareaguje ona na jego przejazd. Jeżeli nie wykryje go antena znajdująca się za zwrótnicą, system oczekiwał będzie na przejazd trolejbusu, nie przestawiając zwrótnicy kolejnym trolejbusom znajdującym się w kolejce. Największy problem stanowi jednak odpowiednia obsługa systemu przez kierowcę, zwłaszcza w sytuacji kiedy jest dużo możliwości wpisania kodu miejsca docelowego, i zmienia się on dynamicznie w czasie.

4. Generacja indywidualnych kodów pojazdów

W Lublinie na Zajeźdni trolejbusowej zainstalowanych jest 18 zwrótnic sterowanych radiowo, które znajdują się w zasięgu trolejbusu poruszającego się po zajeźdni. W związku z tym, każdy z kanałów steruje minimum 4 zwrótnicami. Niemożliwe jest więc poruszanie się po zajeźdni przy wykorzystaniu radiowego systemu czterokanałowego. Ze względu na bliskość zainstalowanych zwrótnic, system prądowego ich sterowania również nie jest możliwy do implementacji. Pozostaje więc manualne przekładanie odbieraków prądu lub wykorzystanie systemu Vetra. Zajeźdnię trolejbusową w Lublinie przedstawia Rys. 6. Zainstalowany na niej system sieci trakcyjnej umożliwia dojazd trolejbusem w każde miejsce zajeźdni.



Rys. 6. Zajeźdnia trolejbusowa w Lublinie

Ilość kodów możliwą do wpisania z klawiatury sterownika systemu określa moc zbioru możliwych liczb czterocyfrowych. Pierwsza cyfra kodu wybierana jest wśród liczb od 0 do 9, podobnie druga, trzecia i czwarta. Zatem:

$$|\Omega| = 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 = 10\,000 \quad (1)$$

Adres miejsca docelowego jest jeden i określa moc zbioru zdarzeń sprzyjających:

$$|A| = 1 \quad (2)$$

Zatem bez wprowadzenia zasad poruszania się po zajezdni, zgodnie z klasyczną definicją prawdopodobieństwa, prawdopodobieństwo wprowadzenia kodu, który zaprowadzi kierowcę do odpowiedniego miejsca parkingowego na terenie zajezdni wynosi:

$$P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|} = \frac{1}{10\,000} \quad (3)$$

Z tego powodu wprowadzono zasady poruszania się po zajezdni trolejbusowej w Lublinie jak na Rys.7. Pomarańczowe linie oznaczają tory sieci trakcyjnej. Czerwoną linią przerywaną zaznaczono wiaty postojowe dla trolejbusów. Zieloną linią przerywaną zaznaczono halę naprawczą. Pierwszą cyfrę kodu oznaczono kolorem pomarańczowym, 9 na tym miejscu oznacza, że miejsce docelowe znajduje się na terenie zajezdni. Druga cyfra kodu oznaczona jest kolorem zielonym i odpowiada za sposób przejazdu trolejbusu odpowiednio 1, 2, 3, 4 torem przez halę naprawczą lub 0 obok hali naprawczej. Trzecia cyfra kodu oznaczona jest kolorem czerwonym i oznacza wiatę, pod którą znajduje się miejsce parkingowe dla danego trolejbusu. Czwarta cyfra kodu oznaczona jest kolorem niebieskim i odpowiada za numer toru sieci trakcyjnej przy której znajduje się miejsce parkingowe dla danego trolejbusu. Przyjmując, że kierowca zapamięta, w którym miejscu należy zaparkować dany trolejbus, będzie ze sobą posiadał mapkę z naniesionymi numerami, ze względu na proces technologiczny obsługi codziennej dla trolejbusu, nadal prawdopodobieństwo wpisania odpowiedniego kodu nie jest wystarczająco wysokie. W takiej sytuacji ilość kodów możliwą do wpisania z klawiatury sterownika systemu określa moc zbioru, w którym druga cyfra kodu może być równa 3 lub 4. Zatem:

$$|\Omega_{OC}| = 2 \quad (4)$$

Adres miejsca docelowego określa moc zbioru zdarzeń sprzyjających:

$$|B| = 1 \quad (5)$$

Zatem prawdopodobieństwo wpisania odpowiedniego kodu, który przeprowadzi kierowcę przez niezakorkowany tor wynosi:

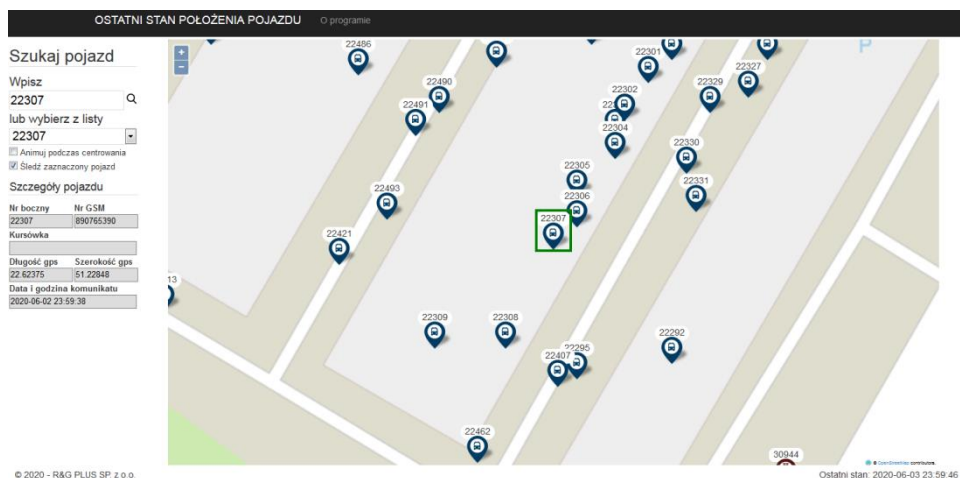
$$P(B) = \frac{|A|}{|\Omega \cap C|} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

Kod miejsca docelowego musi być wpisany przed wjazdem na zajezdnię. Obsługa codzienna ze względu na wyposażenie zajezdni np. w myjnie wykonywana jest na torze 1 i 2 hali naprawczej. Istnieje zatem prawdopodobieństwo, że wszyscy kierowcy wybiorą ten sam tor sieci podczas przejazdu przez halę naprawczą i zostanie on zakorkowany.



Rys. 7. Numeracja wprowadzona na zajezdni trolejbusowej w Lublinie na potrzeby systemu Vetra

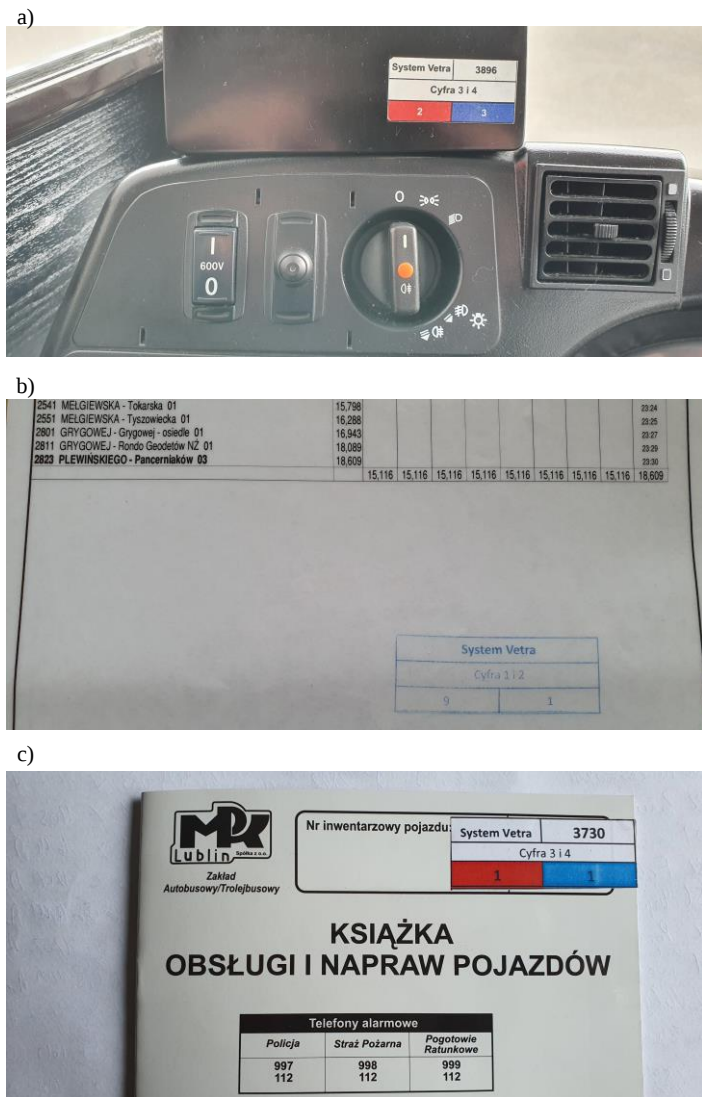
Wprowadzenie mapki z naniesionymi numerami – kodami wniosło dosyć intuicyjny sposób, metodę poruszania się po zajezdni, wymagało jednak aby zjeżdżający z miasta posiadał przy sobie mapkę i wiedział wcześniej, przed wyjazdem na zajezdnię, gdzie chce zaparkować trolejbus. Rezultatem niezrozumienia przez kierowców zaproponowanych algorytmów tworzenia kodu miejsca docelowego były kolizje na zajezdni, trolejbusy zaparkowane w nieodpowiednich miejscach, połamane odbieraki prądu itp.. Generowało to koszty związane z naprawami pokolizyjnymi, oraz opóźnione wyjazdy trolejbusów na linie komunikacyjne, co spowodowane było porannym poszukiwaniem trolejbusu na zajezdni, która ma powierzchnię 5,3 ha. Istnieją systemy lokalizacji pojazdów na terenie zajezdni, a jeden z nich wdrożony jest na zajezdni autobusowej w Lublinie. Sposób działania systemu zobrazowano na Rys. 8.



Rys. 8. System lokalizacji pojazdów działający na zajezdni autobusowej w Lublinie

Korzysta on z danych jakie generuje system informacji pasażerskiej zainstalowany w pojeździe, który jest sprzężony z centrum nadzoru ruchu. Działanie opiera się na danych z czujników GPS, które przesyłane są siecią GSM. System jest bardzo kosztowy, a jego działanie obarczone jest różnymi błędami. Ze względu na konieczność oszczędzania baterii pokładowych, celem zwiększenia dostępności operacyjnej pojazdów [14], systemy informacji pasażerskiej i inne urządzenia pokładowe autobusu są wyłączane na czas postoju na zajezdni. Jeżeli więc kierowca wyłączy w danej chwili system informacji pasażerskiej np. zjeżdżając z miasta na zajezdnię, a pojazd od tego czasu zmieni położenie, to system wskaże ostatnią wysłaną pozycję, czyli w mieście, dla autobusu, który znajduje się na zajezdni.

Opisane problemy powodowały konieczność wprowadzenia zmian, które je wyeliminują. Efektem przeprowadzonej analizy problemów i poszukiwania rozwiązań jest zaproponowany i wdrożony przez autora niniejszej pracy algorytm, który wyróżnia sposób poruszania się po zajezdni oraz lokalizacji trolejbusów na terenie zajezdni w Lublinie w skali Polski, Europy, i świata. Wprowadzone zmiany zobrazowano na rys. 9.



Rys. 9. Naklejki z poszczególnymi cyframi kodu systemu Vetra, rozmieszczone: a) w kabinie kierowcy, b) na rozkładzie jazdy, c) na książce obsługi i napraw pojazdów

Proces świadczenia usługi przewozowej trolejbusami zaczyna się przed wyjazdem na dyspozytorni, gdzie zgłasza się przed wyjazdem na linię kierowca. Wśród dokumentów jakie otrzymuje znajduje się książka obsługi i napraw pojazdów oraz rozkład jazdy. Na książce obsługi i napraw pojazdów znajdują się 3 i 4 cyfra kodu systemu Vetra wskazujące na nr wiaty postojowej oraz na tor sieci trakcyjnej, przy którym znajduje się trolejbus gotowy do wyjazdu do miasta Rys. 9c. Zatem wykorzystując system sterowania siecią trakcyjną zastąpiono kosztowny system lokalizacji trolejbusów na zajezdni. Kodem wyjazdowym do miasta, z każdego miejsca na zajezdni jest 1000. Świadcząc usługę przewozową kierowca posiada również rozkład jazdy, na którym wpisano 1 i 2 cyfrę kodu systemu Vetra rys 9b. Rozkład jazdy jest także dokumentem wskazującym czas pojawienia się podczas zjazdu trolejbusu na zajezdnię. Posortowano zatem rozkłady jazdy zgodnie z czasem zjazdu rosnąco, a następnie kolejno przypisano dwie pierwsze cyfry kodu Vetra w następujący sposób: 1 – 91, 2 – 92, 3 – 91, 4 – 92, 5 – 91 itd. . Podzielono w ten sposób zgodnie z czasami zjazdów trolejbusy po połowie na tory obsługi codziennej. Kombinacja cyfr 1 i 2 z rozkładu jazdy oraz cyfr 3 i 4 z książki obsługi i napraw pojazdów tworzą dla każdej kombinacji rozkładu jazdy i trolejbusu unikalny kod miejsca docelowego i toru jazdy, prowadzący kierowcę od wjazdu na zajezdnię, poprzez niezakorkowany system obsługi codziennej, aż do miejsca postojowego. Gdy podczas wykonywania obsługi codziennej stwierdzona zostanie awaria, kodem do powrotu przed halę naprawczą jest 9999. Trzecia i czwarta cyfra kodu Vetra umieszczona jest również w kabinie kierowcy jak na rys. 9a. Cyfry te wskazują obsłudze technicznej miejsce odstawienia trolejbusu po naprawie. Trolejbusy ustawiane są pod odpowiednimi torami sieci trakcyjnej jeden za drugim itd. zgodnie z czasami wykonania obsługi codziennej. Wyjazd do miasta jest możliwy środkiem między dwoma rzędami aut niezależnie od pojazdów stojących przed autem wyjeżdżającym.

5. Wnioski

Wśród przedstawionych metod sterowania zwrotnicami sieci trakcyjnej, najbardziej niezawodną, skuteczną oraz najmniej absorbującą kierowcę jest wykorzystanie radiowego sterowania zwrotnic, prowadzącego kierowcę w miejsce docelowe zadane czterocyfrowym kodem. Z analizy wynika, że jej wykorzystanie powoduje konieczność opracowania odpowiednich algorytmów, które upraszczają wybór odpowiedniego kodu miejsca docelowego. Korzyści, jakie wynikają z zastosowania tej metody sterowania zwrotnic sieci trakcyjnej oraz wprowadzenia odpowiednich algorytmów wyboru kodu miejsca docelowego są następujące:

- system sterowania zwrotnicami sieci trakcyjnej na zajezdni jest intuicyjny,

- każdy trolejbus w zestawieniu, z każdym rozkładem tworzą indywidualną kombinację cyfr, kod, który prowadzi kierowcę przez cały cykl technologiczny na zajezdni, aż do miejsca parkowania,
- wyświetlacze zainstalowane na sieci trakcyjnej prowadzą kierowcę do miejsca parkowania wprowadzając do systemu rodzaj autonomiczności,
- nie jest potrzebny dodatkowy system lokalizacji trolejbusów na zajezdni,
- oszczędność akumulatorów,
- położenie pojazdu jest aktualne,
- skraca się droga i czas jaki przebywa kierowca przed wyjazdem na linię,
- skraca się czas pracy kierowcy,
- zmniejsza się ilość kolizji, uszkodzeń sieci trakcyjnej i uszkodzeń systemów odbioru prądu,
- ogranicza się zatrudnienia,
- ogranicza się ilość środków technicznych wykorzystywanych do poruszania się po zajezdni,

Wykorzystanie systemu radiowego sterowania zwrotnic, prowadzącego kierowcę w miejsce docelowe zadane czterocyfrowym kodem, umożliwia wprowadzanie kolejnych funkcjonalności ograniczających absorbowanie uwagi kierowcy podczas prowadzenia trolejbusu. Kolejnym etapem rozwoju sterowania zwrotnicami sieci trakcyjnej będzie próba zintegrowania pracy sterownika systemu sterującego zwrotnicami ze sterownikiem systemu informacji pasażerskiej. Pozwoli to na wymianę informacji o kodzie miejsca docelowego między sterownikami w zależności od realizowanego przez kierowcę kursu.

Literatura

- [1] Sheela P. V., Mannering F., *The effect of information on changing opinions toward autonomous vehicle adoption: An exploratory analysis*, International Journal of Sustainable Transportation 6(14), 2020.
- [2] Gizinski Z., Gasiewski M., Mascibrodzki I., Zych M., Zymmer K., Zulawnik M. *Hybrid – type system of power supply for a trolleybus with an asynchronous motor*, 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference , Poznań, IEEE, 2008.
- [3] Holyszko P., Filipek P. Z., *Estimation of the Running Costs of Autonomous Energy Sources in Trolleybuses*, Journal of Ecological Engineering 5(17), PTIE, 2016.
- [4] Jarzyna W., Zielinski D., Holyszko P., *Battery-Supported Trolleybus Traction Network-a Component of the Municipal Smart Grid*, Environmental Engineering V, Leiden, CRC Press/Balkema, 2017.
- [5] Bartłomiejczyk M., *Super capacitor energy bank MEDCOM UCER-01 in Gdynia trolleybus system*, Proceedings of the Iecon 2016 - 42nd Annual Conference of the Ieee Industrial Electronics Society, IEEE 2016.

- [6] Bartłomiejczyk M., Holyszko P., Filipek P., *Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport*, Journal of Ecological Engineering 5(17), 2016.
- [7] Bartłomiejczyk M., Polom M., *Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery*, Energy Conversion and Management 127, 2016.
- [8] Siemionek E., Dziubinski M., *Testing Energy Consumption in the Trolleybus and the Bus on a Chosen Public Transport Line in Lublin*, Advances in Science and Technology-Research Journal 26(9), 2015.
- [9] Dziubinski M., Siemionek E., Adamiec M., Drozd A., Kołodziej S., *Energy Consumption of the Trolleybuses*, 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (Elmeco & Aos) (2017), IEEE. 2017.
- [10] Bartłomiejczyk M., *Practical application of In Motion Charging: trolleybuses service on bus lines*, 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering 2017.
- [11] Hołyszko P., *Ocena metod zapewnienia ciągłości pracy urządzeń pomocniczych trolejbusu*, Wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki, inżynierii biomedycznej i budownictwa : prace doktorantów Politechniki Lubelskiej, 2019.
- [12] Niewczas A., Rymarz J., Debicka E., *Stages of operating vehicles with respect to operational efficiency using city buses as an example*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 1(21), 2019.
- [13] Rymarz J., Niewczas A., Stokosa J., *Reliability evaluation of the city transport buses under actual conditions*, Transport and Telecommunication Journal 4(16), 2015.
- [14] Rymarz J., Niewczas A., Krzyzak A., *Comparison of operational availability of public city buses by analysis variance*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 3(18), 2016.

Bezprzerwowe zasilanie odbiorców z mobilnej stacji transformatorowej SN/nN współpracującej z agregatem prądotwórczym

Streszczenie: W artykule opisano opatentowany zestaw, w którego skład wchodzi mobilna stacja transformatorowa - SN/nN o mocy transformatora 630kVA 15/0,4kV oraz bocznik SN. Zestaw zasilany jest za pomocą agregatu prądotwórczego i służy do bezprzerwowego zasilania odbiorców. W celu podpięcia stacji mobilnej lub bocznika do czynnej linii SN stosuje się nowe techniki prac pod napięciem. Techniki te wykorzystują specjalistyczne drążki z uchwytemi manewrowymi oraz izolatory parkujące.

Słowa kluczowe: stacja mobilna, zasilanie, synchronizacja napięcia, bocznik, układ awaryjnego zasilania

Consumers uninterruptible power supply from a mobile MV/LV transformer station cooperating with a power generator

Abstract: The article describes a patented set which includes a mobile transformer station MV/LV with a transformer power of 630 kVA 15/0.4kV and an MV shunt. The set is powered by a power generator and is used for uninterrupted power supply to consumers. New work techniques are used to connect a mobile station or a shunt to an active MV line. These techniques are used specialized poles with maneuvering handles and insulators parking.

Keywords: mobile station, power, voltage synchronization, shunt, emergency power supply system

1. Wstęp

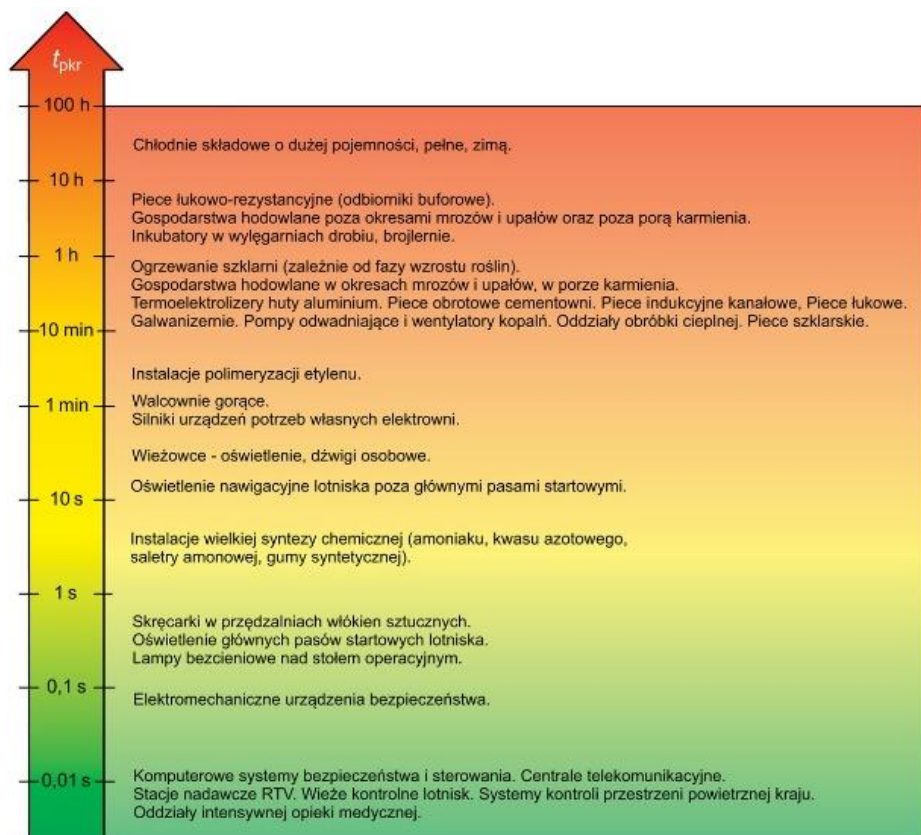
Gospodarstwa komunalno-bytowe są to przede wszystkim gospodarstwa domowe. Zalicza się do nich odbiorców zamieszkujących tereny miejskie oraz wiejskie. Wymagania tych grup są bardzo zróżnicowane. O ile odbiorcy z obszarów miejskich wykorzystują elektryczność tylko do celów domowych, to odbiorcy terenowi potrzebują jej również do celów produkcyjnych, czyli m. in. do zasilania odbiorników produkcyjnych w gospodarstwie rolnym. Gospodarstwa wiejskie wymagają również zasilania dodatkowych narzędzi elektrycznych i urządzeń ogólnego przeznaczenia (podgrzewcze wody, szlifierki, betoniarki itp.) [1]. U odbiorców przemysłowych skutki przerwy w zasilaniu energią elektryczną są bardzo poważne np.: brak zasilania obiektu gromadzącego publiczność,

*d.slawek1@wp.pl Katedra Techniki Wysokich Napięć, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

szpitalnej sali operacyjnej, wieży kontrolnej lotniska, centrali telekomunikacyjnej. Przerwy w zasilaniu wrażliwego odbiorcy przemysłowego, poza kosztownym przestojem, może oznaczać [2,9]:

- ryzyko wypadków z ludźmi i ryzyko skażenia środowiska;
- ryzyko uszkodzenia lub zniszczenia przerabianych materiałów, półproduktów oraz obniżonej ich jakości po wznowieniu procesu (synteza chemiczna, włókiennictwo, obróbka cieplna, przemysł spożywczy, systemy komputerowe);
- ryzyko uszkodzenia lub zniszczenia urządzeń technologicznych (hutnictwo stali i aluminium, przemysł szklarski, cementowy, włókien sztucznych, nowoczesne obrabiarki);
- koszty ponownego uruchomienia procesu technologicznego, co może trwać 6–8 h po przerwie rzędu minut, a dwie doby po przerwie dłuższej niż godzina i oznacza koszty równe wartości tygodniowej produkcji [2].

Wspomniane skutki i czas krytyczny t_{pkr} zostały przedstawione na Rys. 1.



Rys. 1. Krytyczny czas trwania przerwy w zasilaniu energią elektryczną oraz jej skutki [2]

Pomimo różnych potrzeb tych odbiorców, jedna kwestia pozostaje wspólna, a mianowicie potrzeba niezawodności dostaw energii elektrycznej. Współczesny odbiorca energii elektrycznej ma bardzo wysokie wymagania odnośnie jakości oraz ciągłości jej dostaw. Spółki dystrybucyjne z roku na rok muszą sprostać stale zaostrażającym się wskaźnikom bezawaryjnej pracy sieci zarówno na niskim jak i na średnim napięciu [1,6]. Bezawaryjna praca sieci średniego napięcia jest możliwa w przypadku niezawodnej pracy poszczególnych urządzeń. Linie elektroenergetyczne SN są jednym z najważniejszych elementów sieci dystrybucyjnych. Umożliwiają one przesył energii elektrycznej przy najkorzystniejszych z technicznego i gospodarczego punktu widzenia wartościach napięć. Uszkodzenia linii wpływają w zdecydowanym stopniu na awaryjność sieci, a więc determinują straty gospodarcze występujące u odbiorców i dystrybutorów energii elektrycznej [3].

2. Bezprzerwowe zasilanie odbiorców

Pierwsze informacje dotyczące układów zasilania bezprzerwowego odnajdujemy na początku lat 90-tych. Były to jednak urządzenia stosunkowo małej mocy japońskiej marki Fuji. W roku 1992 Zakład Automatyki i Systemów Elektroenergetycznych REFA w Świebodzicach obecnie Schneider-Electric opatentował: „Sposób i układ do przełączania elektroenergetycznych linii zasilających”. Wynalazek pozwalał na zachowanie ciągłości zasilania odbiorców poprzez przełączanie obwodów z jednej linii zasilającej na drugą, gwarantując przy tym prawidłowość parametrów. Rozwiązanie nie umożliwiała niestety zasilania odbiorców z wykorzystaniem agregatów prądotwórczych. Mocno ograniczona funkcjonalność wynikała również z konieczności lokalizacji urządzenia w bliskim sąsiedztwie dwóch linii SN [16].

Dotychczas, aby uniknąć wyłączeń i skrócić do minimum czas awarii w sieci dystrybucyjnej stosowano agregaty prądotwórcze przy każdej z zasilanych stacji. Wymagało to zapewnienia odpowiedniej ich liczby. Innowacyjność opracowanego w lubelskim Oddziale PGE Dystrybucja S.A. Zestawu Stacji Mobilnej z Bocznikiem SN polega na wykorzystaniu agregatu do zasilenia fragmentu sieci średniego napięcia poprzez mobilną stację transformatorową i bocznik SN. Takie rozwiązanie przy zastosowaniu technologii prac pod napięciem ma znaczący wpływ na dwa podstawowe wskaźniki świadczące o kondycji sieci takich jak SAIDI (czas przerwy w dostawie energii w przeliczeniu na jednego odbiorcę) i SAIFI (ilość wyłączeń w przeliczeniu na jednego odbiorcę). Dzięki zastosowaniu innowacyjnych rozwiązań, w znaczącej ilości przypadków odbiorcy nie odczują faktu prowadzenia prac na sieci dystrybucyjnej średniego napięcia, takich jak przeglądy, przebudowy, wymiany słupów itp. W przypadku awarii zastosowanie zestawu znacząco skróci czasy przerw w dostawie energii elektrycznej. Wykorzystanie funkcjonalności stacji mobilnej ma

również szczególne znaczenie dla wrażliwych odbiorców, dla których nawet krótka przerwa powoduje ogromne zagrożenie, jak wspomniane szpitale, przychodnie ze sprzętem specjalistycznym, wrażliwe urządzenia linii produkcyjnych, itp. [10,11].

Innym rozwiązaniem, które uwzględniło wykorzystanie agregatu prądotwórczego jest „Mobilny Układ Zasilający” w skrócie MUZ, opatentowany i skonstruowany przez inżynierów z grupy Tauron [15]. Główna idea urządzeń konstrukcji Tauron i PGE Dystrybucja jest taka sama i polega na zasileniu sieci średniego napięcia z mobilnych agregatów prądotwórczych. Oba zestawy są mobilne co daje dużą elastyczność wyboru miejsca przyłączenia do sieci. Ogromna przewaga lubelskiego Zestawu Stacji Mobilnej SN/nN z bocznikiem SN wynika z możliwości bezprzerwowego zasilania odbiorców podczas podłączania i odłączania urządzeń od sieci podczas, gdy MUZ daje możliwość tylko bezprzerwowego podłączenia. W celu odłączenia od sieci konieczny jest zanik napięcia, co jest niewątpliwie dużym problemem [12,15].

Największym problemem do rozwiązania w systemie bezprzerwowego zasilania odbiorców jest konieczność podpięcia zestawu do czynnej sieci SN. W tym celu lubelscy inżynierowie opracowali nowe metody „Prac Pod Napięciem” na sieci SN 15kV, które umożliwiają podłączenie przewodów ze stacji mobilnej i bocznika do czynnej linii SN [11].

3. Prace pod napięciem

Prace pod napięciem w skrócie PPN zalicza się do nowoczesnych technik prowadzenia eksploatacji sieci elektroenergetycznej bez konieczności wyłączeń linii dostarczających energię elektryczną. Jedną z głównych korzyści PPN jest przede wszystkim brak konieczności wykonywania przełączeń sieci mających na celu odstawienie linii do prac remontowych czy eksploatacyjnych. Eliminuje się tym samym przesłania energii sąsiednimi liniami i niepotrzebnego ich przeciążania. Problem ten szczególnie jest istotny w miesiącach znacznego obciążenia sieci a w niektórych dniach nawet przeciążonych. Wykonywanie PPN eliminuje konieczność angażowania zespołów pogotowia energetycznego do czynności przełączeń sieci i przygotowania strefy pracy, a także przekłada się na ograniczone zaangażowanie dyspozytora ruchu, sprawującego nadzór nad daną siecią. Inną zaletą PPN jest wydłużenie czasu eksploatacji urządzeń łączeniowych (odłączniki, rozłączniki i wyłączniki) wynikającą z braku potrzeby wykonania czynności manipulacyjnych a także wyeliminowania możliwości wykonania pomyłek łączeniowych. Technika PPN wykorzystuje trzy możliwe usytuowania montera względem urządzenia będącego pod napięciem[4]:

- odizolowanie montera posiadającego potencjał ziemi od urządzenia pod napięciem;

- odizolowanie montera posiadającego potencjał urządzenia od ziemi i innych potencjałów;
- odizolowanie montera zarówno od ziemi jak i od urządzenia pod napięciem.

Możliwości te pozwoliły na wykreowanie następujących metod prac pod napięciem: metoda w kontakcie, metoda z odległości, metoda na potencjale, metoda kombinowana C3M [4].

Do podpięcia kabli średniego napięcia w mobilnej stacji transformatorowej wykorzystano metodę pracy z odległości która polega na wykonaniu pracy pod napięciem wewnątrz strefy zagrożenia za pomocą narzędzi umieszczonych na drążkach izolacyjnych. Monter tym samym pozostaje na potencjale ziemi w odległości większej niż dopuszczalna odległość zbliżenia do części, będących pod napięciem. Praca jest wykonywana wprowadzanymi do strefy zagrożenia narzędziami umieszczonymi na drążkach izolacyjnych. Rys. 2 przedstawia uchwyt manewrowy z dołączonym izolatorem parkującym oraz sposób podłączenia kabla do czynnej sieci 15 kV.



Rys. 2. Drążek manewrowy wraz z uchwytem do dokręcania izolatorów parkujących PGE Dystrybucja 2019; opracowanie własne

4. Charakterystyka poszczególnych elementów zestawu

4.1. Stacja transformatorowa

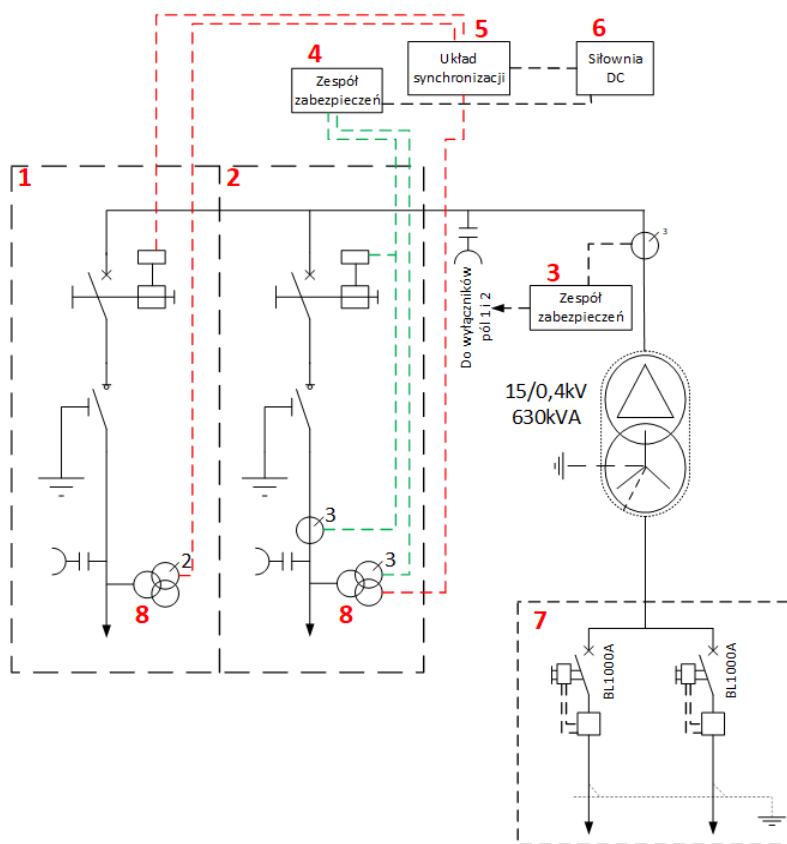
Stacja transformatorowa wykonana jest w obudowie metalowej i posadowiona na podwoziu jezdnym (Rys. 3). Całość ma gabaryty: wysokość 3,15m, szerokość 2,25m, całkowita długość wraz z dyszlem 4,45m. Rozdzielnice SN i nN skonstruowane są jako oddzielne elementy stacji, a dostęp do części SN oraz przedziałów kablowych zapewniony poprzez żaluzje aluminiowe. Transformator zamontowany jest na stałe w sposób umożliwiający jego wymianę. Stacja posiada 2 komplety kabli SN, ekranowanych z żyłą powrotną, wykonanych w technologii silikonowej z żyłą roboczą miedzianą o długości 25m każdy, a także dwa kable uziemiające w izolacji silikonowej. Podwozie pod stację transformatorową wykonane jest ze stali konstrukcyjnej o podwyższonej wytrzymałości, dzięki temu cały zestaw jest niezwykle wytrzymały- DMC 6,4 T. Ponadto posiada 2 osie z mechanizmem hamującym, systemem ABS oraz dyszel o regulowanym kącie podpięcia [12,17].



Rys. 3. Mobilna stacja transformatorowa z synchronizacją 15 kV PGE Dystrybucja 2019; opracowanie własne

Po stronie średniego napięcia rozdzielnica posiada 2 pola wyłącznikowe oraz możliwość podpięcia kabla zasilającego transformator bezpośrednio z mostu szynowego poprzez przepust w pełni izolowany. Pola umożliwiają podpięcie kabli SN. Wyposażone są w pomiar napięcia dla potrzeb synchronizacji, a dodatkowo pole nr 2 posiada sensory prądowe. Pole SN nr 1 (synchronizacyjne) zapewnia automatyczną synchronizację napięciową do pola nr 2 po załączeniu funkcji przez obsługę i ręcznym zabrojeniu napędu wyłącznika. Pole SN nr 2 (zasilające) posiada zabezpieczenia wyspowej pracy sieci: nadprądowe, ziemnozwarciowe, nadnapięciowe, podnapięciowe, częstotliwościowe. Oba pola posiadają wyłączniki z napędem ręcznym oraz cewkami zamykającą i otwierającą o napięciu sterowniczym 24V DC. W polu transformatorowym zasilanym bezpośrednio z mostu szynowego rozdzielnicy SN zastosowane jest zabezpieczenie autonomiczne z przekładnikami i sygnalizacją zadziałania. Zadziałanie w/w zabezpieczenia wyłącza jednocześnie wyłączniki w polach nr 1 i 2 rozdzielnicy SN. Szafka obwodów wtórnych z zabezpieczeniem cyfrowym a także przekaźnikiem kontroli synchronizmu umiejscowiona jest obok rozdzielnicy SN. W niej znajduje się siłownia DC z funkcją ładowania akumulatora z zewnętrznego źródła 230V AC. Po stronie niskiego napięcia stacja posiada rozdzielnicę nN w wykonaniu modułowym. W jej skład wchodzi dwa pola odpływowe, wyposażone w wyłączniki kompaktowe 1000A. Rozdzielnica przystosowana jest do podłączenia agregatu za pośrednictwem złącza typu POWERLOCK [8,12,14].

Logikę pracy układu synchronizacji przedstawia Rys. 4. Proces synchronizacji rozpoczyna się w momencie podania napięć pomiarowych do układu automatyki z przekładników napięciowych pola synchronizacyjnego i zasilającego. Zadanie sygnału sterującego przez obsługę inicjuje proces synchronizacji. Następuje sprawdzenie przez układy automatyki warunków synchronizacji tj.: poziom napięć, częstotliwość, a także kąt przesunięcia fazowego między napięciami pola synchronizacyjnego i pola zasilającego. W odpowiednim czasie automatycznie załączany jest wyłącznik w polu synchronizacyjnym do pracy równoległej z siecią dystrybucyjną SN. Ostatnią czynnością jest wyłączenie wyłącznika głównego w rozdzielnicy nN i odstawienie agregatu prądotwórczego. Procedura skomplikowanych czynności łączeniowych została zawarta w opracowanej specjalnie do tego celu instrukcji. Część tych czynności wykonywana jest poprzez układ automatyki co wymaga szczególnej uwagi monterów obsługujących zestaw. W związku z tym przeprowadzono szereg szkoleń dla ekip biorących czynny udział w pracach z wykorzystaniem stacji mobilnej, bocznika oraz agregatu [5,7,12].



Rys. 4. Układu synchronizacji stacji [12]

Układ synchronizacji stacji składa się z następujących elementów [12]:

- 1 – pole synchronizacji,
- 2 – pole zasilania (zabezpieczeń napięciowych ziemnozwarciowych, nadprądowych i częstotliwościowych),
- 3 – autonomiczne zabezpieczenie nadprądowe transformatora,
- 4 – zespół zabezpieczeń prądowych, napięciowych i częstotliwościowych,
- 5 – układ synchronizacji i kontroli kolejności faz,
- 6 – zespół zasilania potrzeb własnych, wskaźniki napięć, rozdzielnica napięcia gwarantowanego DC,
- 7 – rozdzielnica nN, pole agregatu i pole dodatkowe,
- 8 – przekładniki napięciowe SN.

4.2. Bocznik SN

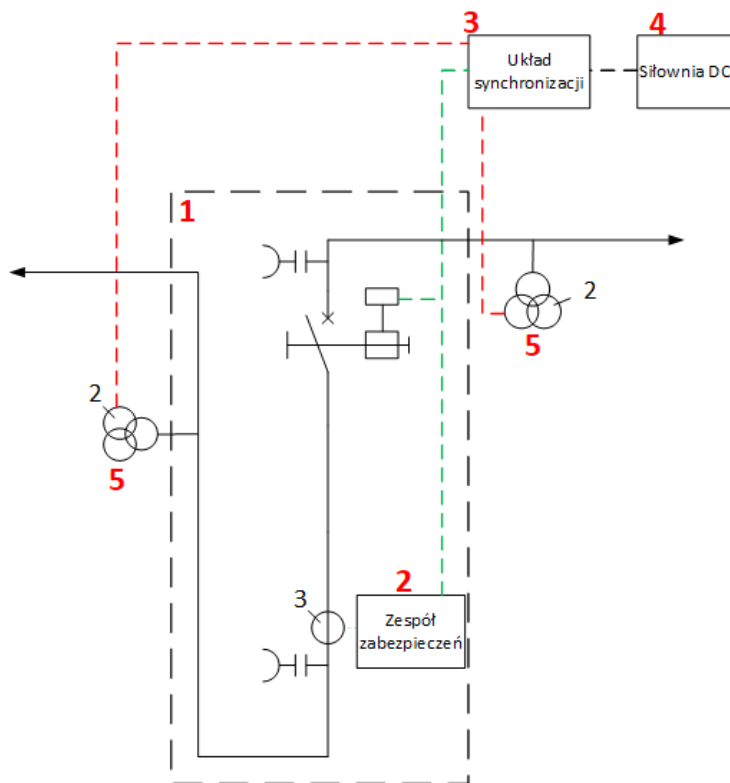
Bocznik zbudowany jest jako kontener z płyty aluminiowej, posadowiony na integralnych płozach (Rys. 5). Jego gabaryty wynoszą: wysokość 2,35m, szerokość 1 m, długość 1,25m. Waga z wyposażeniem nie przekracza 400kg. Przestrzeń kontenera posiada wydzielone przedziały przyłączeniowe po lewej i prawej stronie, a także przedział środkowy dla rozdzielnic SN. Dostęp dla obsługi realizowany jest za pomocą drzwi metalowych. W przedziałach przyłączowych znajdują się takie same 2 komplety silikonowych kabli SN oraz 2 komplety kabli uziemiających co w stacji mobilnej. Siłownia 24V DC z możliwością ładowania ze źródła 12V DC, zlokalizowana jest w szafce obwodów wtórnych [13,17].



Rys. 5. Bocznik SN z synchronizacją 15 kV PGE Dystrybucja 2019; opracowanie własne

W boczniku zamontowana jest 1 połowa rozdzielnic średniego napięcia z przepustami w pełni izolowanymi. Pole to zapewnia automatyczną

synchronizację napięciową pomiędzy polami przyłączeniowymi po załączeniu funkcji przez obsługę. Po obu stronach bocznika znajdują się pola przyłączowe, każde z nich wyposażone w pomiar napięcia z przekładników współpracujących z synchronizatorem. Pole rozdzielnic SN wyposażone jest w wyłącznik z napędem ręcznym, cewki zamykającą i otwierającą o napięciu sterowniczym 24V DC oraz autonomiczne zabezpieczenie nadprądowe. Logika pracy układu synchronizacji bocznika jest analogiczna jak w stacji i przedstawiona na Rys. 6 [5,8,13].



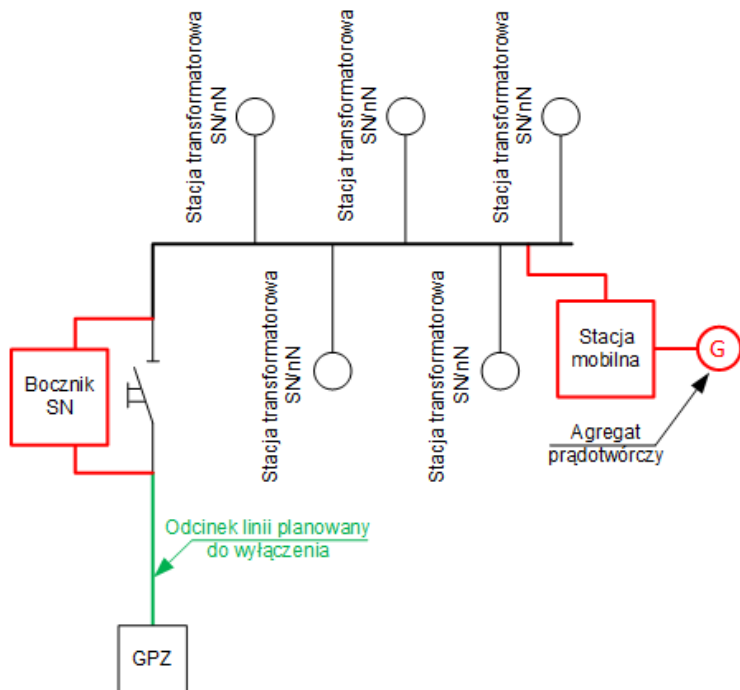
Rys. 6. Układu synchronizacji bocznika [13]

Układ synchronizacji bocznika składa się z następujących elementów:

- 1 – pole wyłącznika SN – moduł wysuwany tworzący przerwę izolacyjną,
- 2 – autonomiczne zabezpieczenie nadprądowe,
- 3 – układ synchronizacji i kontroli kolejności faz,
- 4 – zespół zasilania potrzeb własnych, wskaźniki napięć, rozdzielnica DC,
- 5 – przekładniki napięciowe SN

5. Funkcjonalność zestawu

5.1. Zasilenie odbiorców z wykorzystaniem mobilnej stacji transformatorowej oraz bocznika

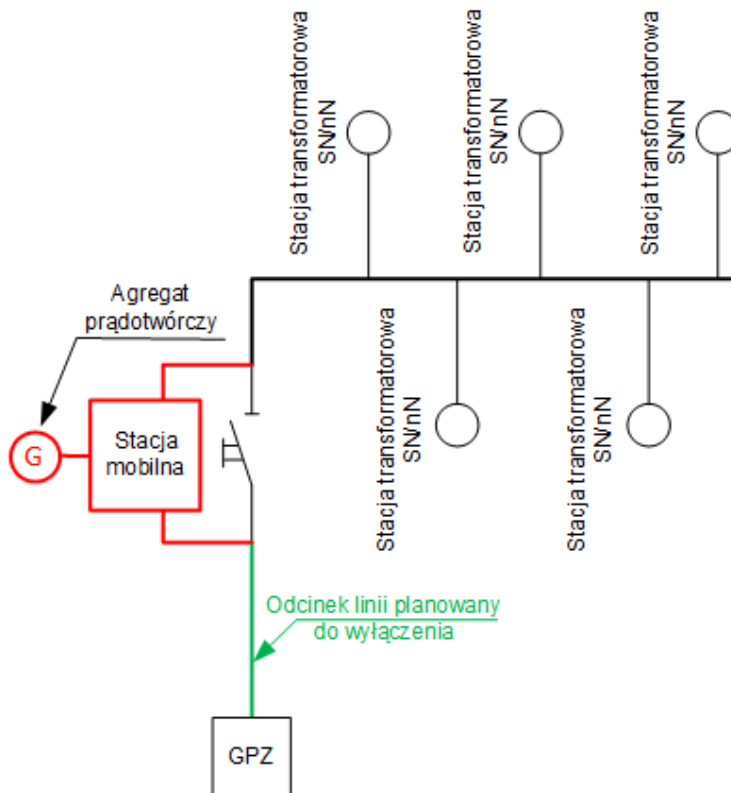


Rys. 7. Wykorzystanie stacji mobilnej i bocznika SN do bezprzerwowego zasilania odbiorców w sytuacji braku dostępu do stanowiska z łącznikiem SN; opracowanie własne

Na Rys. 7 oznaczono kolorem zielonym odcinek linii głównej SN przewidziany do wyłączenia w celu dokonania planowanych prac eksploatacyjnych lub inwestycyjnych. Układ sieci uniemożliwia dojazd zestawem stacji mobilnej z agregatem pod stanowisko łącznika w trzonie linii (złe warunki terenowe). W związku z powyższym w celu bezprzerwowego zasilania odbiorców oraz bezprzerwowego powrotu do zasilania z sieci dystrybucyjnej konieczne jest ustawienie stacji mobilnej wraz z agregatem prądotwórczym w miejscu dogodnym, umożliwiającym podłączenie stacji do linii i bezpieczne pozostawienie zestawu w czasie pracy (np. parking w pobliżu linii). Po podłączeniu stacji do linii SN w technologii PPN synchronizowany jest zestaw do pracy równoległej wykorzystując do tego układ synchronizacji generatora. Po otwarciu łącznika w trzonie głównym linii, zestaw stacji mobilnej bezprzerwowo przejmuje obciążenie odbiorców. Odcinek linii przewidziany do wyłączenia może być pozbawiony napięcia. Po zakończeniu prac i podaniu napięcia na otwarty

łącznik od strony punktu zasilania, instalujemy lekki bocznik pod stanowiskiem łącznika, który zostaje obustronnie podłączony do linii w technologii PPN. Za pomocą układu automatyki bocznika następuje synchronizacja napięcia zasilanego ze stacji mobilnej do napięcia trzonu linii głównej, zasilanej z GPZ i załączenie wyłącznika. W tym momencie możliwe jest ręczne zamknięcie łącznika w trzonie linii głównej, demontaż bocznika i odstawienie stacji mobilnej wraz z agregatem. Odbiorcy bez zaniku napięcia zostają zasileni z sieci dystrybucyjnej (od GPZ) [10,11]. Wykorzystanie lekkiego bocznika w zestawieniu ze stacją mobilną jest zasadne w przypadkach, gdy stanowisko łącznikowe zlokalizowane jest w miejscu trudnodostępnym np. pole orne, pochyłości terenu, tereny podmokłe, gdzie nie jest możliwy dojazd stacją i agregatem, a możliwe jest przetransportowanie niewielkiego bocznika (400kg) np. samochodem terenowym lub na płozach za pomocą koparki [12,13].

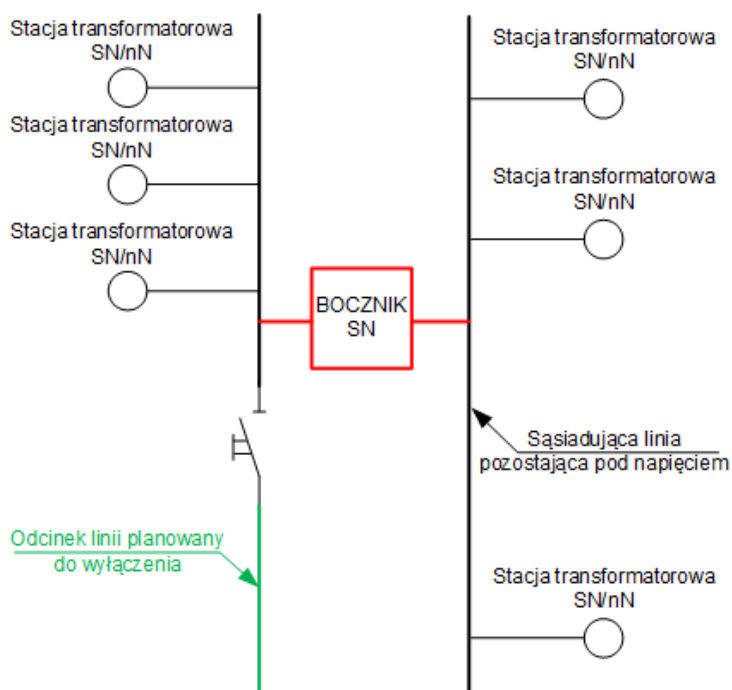
5.2. Zasilenie odbiorców z wykorzystaniem wyłącznie mobilnej stacji transformatorowej



Rys. 8. Wykorzystanie stacji mobilnej do bezprzerwowego zasilania odbiorców w sytuacji dostępu do stanowiska z łącznikiem SN; opracowanie własne

W przypadku przedstawionym na Rys. 8 ustawienie stacji mobilnej i agregatu pod stanowiskiem łącznika jest możliwe. W tym przypadku z zastosowaniem automatyki stacji możliwa jest synchronizacja zarówno przy załączaniu pracy wyspowej jak i powrocie do zasilania z sieci dystrybucyjnej przy braku przerw w dostawie energii dla odbiorców [10,11,12].

5.3. Połączenie czynnej linii SN przebiegającej w pobliżu linii, której część uległa uszkodzeniu lub przewidziana jest do wyłączenia – z zastosowaniem tylko bocznika SN



Rys. 9. Synchronizacja linii SN przy użyciu bocznika SN; opracowanie własne

W przypadku, który przedstawia Rys. 9 dwie niepowiązane napowietrzne linie SN 15 kV przebiegają w niewielkiej odległości obok siebie. Konieczność wyłączenia odcinka linii lub jego awaria (kolor zielony) uniemożliwia zasilanie odbiorców z pozostałej części linii. Przedstawione rozwiązanie pozwala na zasilenie odcinka linii, który pozostałby bez napięcia, z czynnej linii SN bez konieczności jej wyłączenia – przy zastosowaniu bocznika podłączanego w technologii PPN. Zastosowanie innowacyjnego bocznika SN wraz z technologią PPN umożliwia spinanie linii SN bez konieczności wyłączenia napięcia [10,11,13].

6. Wnioski

Współczesny odbiorca energii wymaga wysokiej niezawodności jej dostaw. Nieciągłość zasilania energią elektryczną powoduje straty gospodarcze. U odbiorcy przemysłowego straty z powodu niewykonania produkcji lub jej nieterminowego wykonania, u odbiorcy komunalnego z powodu ograniczenia jego aktywności. Z tego też powodu bardzo istotnym obecnie zagadnieniem stają się nowatorskie rozwiązania pozwalające w znacznym stopniu skrócić lub całkowicie wyeliminować przerwy w dostawie energii elektrycznej. Przedstawiony w artykule „Zestaw Stacji Mobilnej z Bocznikiem SN” skonstruowany w PGE Dystrybucja jest pierwszym w Polsce rozwiązaniem, które umożliwia prowadzenie prac eksploatacyjnych, inwestycyjnych lub naprawczych na sieciach SN bez zaniku napięcia dla odbiorców. Jak już wspomniano istotą opatentowanego zestawu są rozwiązania pozwalające na synchronizację pierwotną a także wtórną. Całość wspomagana jest przez moduł kontroli kierunku wirowania faz pomiędzy stronami przełączeniowymi. Zaproponowane rozwiązania znacząco wyprzedzają dostępne na rynku rozwiązania. Opisany we wstępie MUZ ma możliwość synchronizacji jedynie pierwotnej, a więc w momencie przejmowania obciążenia. Brak synchronizacji wtórnej skutkuje zanikiem napięcia dla odbiorców podczas powrotu do zasilania z sieci dystrybucyjnej. Wykonanie Mobilnej Stacji Transformatorowej jako kompaktowego urządzenia w zamkniętej obudowie podnosi bezpieczeństwo użytkowania co więcej zmniejsza jej rozmiary. Dodatkowo, ułatwia manewrowanie w terenie. Rozwiązanie zespołu Grupy Tauron ma większą kubaturę, gabaryty przyczepy uniemożliwiają dojazd i zainstalowanie MUZ w miejscach trudnodostępnych co ogranicza zastosowanie całego zestawu. Prezentowany bocznik SN posiada taką samą funkcjonalność w zakresie synchronizacji i bezprzerwowego łączenia co stacja transformatorowa. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie bocznika jako niezależnego urządzenia. W połączeniu z niewielką kubaturą, wagą 400kg i zainstalowanymi płozami daje niemalże pewność zastosowania w każdym terenie. Zaprezentowany w artykule zestaw jest owocem 50-letniego doświadczenia w stosowaniu mobilnych stacji transformatorowych oraz wyciągniętych wniosków z wcześniejszych konstrukcji. Całość rozwiązań zarówno konstrukcyjnych jak i funkcjonalnych została sprawdzona w terenie. Prace, które przeprowadzono na czynnych liniach potwierdziły słuszność zastosowanych rozwiązań.

Literatura

- [1] Banasik K., Chojnacki A., *Skutki gospodarcze niedostarczenia energii elektrycznej do odbiorców komunalno-bytowych*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2018.

- [2] Musiał E., *Zasilanie rezerwowe z zespołów spalinowo-elektrycznych*, Automatyka-Elektryka-Zakłócenia 9(12), 8–20, 2012.
- [3] Chojnacki A., *Analiza porównawcza wskaźników oraz właściwości niezawodnościowych elektroenergetycznych linii napowietrznych i kablowych średniego napięcia*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2019.
- [4] Kozyra J., Ostapiuk E., Hebda K., *Wybrane aspekty prac pod napięciem w sieciach średniego napięcia*, Wydawnictwo „Spatium”, Radom 2018.
- [5] Kacejko P., Machowski J., Kowalik R., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, 2nd ed. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2009.
- [6] Machowski J., Kacejko P., Miller P., *Przywracanie zdolności przesyłowej sieci po ruchowym lub awaryjnym odstawieniu linii*, Rynek Energii 4(101), 28–37, 2012.
- [7] Machowski J., Kacejko P., *Udary prądowe przy zamykaniu układów pierścieniowych sieci przesyłowej*, Przegląd Elektrotechniczny 87(8), 114–120, 2011.
- [8] Musiał E., *Ochrona przeciwporażeniowa w instalacjach zasilanych z zespołów prądotwórczych spalinowo-elektrycznych*, INPE, 170–171, 2013.
- [9] Wiatr J., *Uproszczony projekt tymczasowego zasilania osiedla mieszkaniowego z wykorzystaniem mobilnego zespołu prądotwórczego*, elektro.info 1–2/2017.
- [10] *Instrukcja ruchu i eksploatacji agregatów niestacjonarnych*, PGE Dystrybucja, Lublin 2017.
- [11] *Instrukcja organizacji i wykonywania prac pod napięciem w sieci dystrybucyjnej o napięciu powyżej 1 kV do 30 kV*, PGE Dystrybucja, 2016.
- [12] *Stacja transformatorowa mobilna typu STLm-mobile*, Dokumentacja techniczno-ruchowa, Lublin 2019.
- [13] *Bocznik synchronizujący*, Dokumentacja techniczno-ruchowa, Lublin 2019
- [14] *N SEP-E-004* Wydanie II Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa, 2004.
- [15] Opis patentowy nr PL 232628, *Mobilne urządzenie zasilające średniego napięcia*, Tauron, 2016.
- [16] Opis patentowy nr PL 168063, *Sposób i układ do przełączania elektroenergetycznych linii zasilających*, REFA, Świebodzice, 1992.
- [17] <https://pgedystrybucja.pl/o-spolce/aktualnosci/Centrala/mobilna-stacja-transformatorowa-pge-dystrybucja-skroci-przerwy-w-dostawach-energii-elektrycznej-podczas-awarii>, (10.03.2020).

Symulacja działania algorytmów genetycznych obciążonych chorobami genetycznymi

Streszczenie: Algorytmy genetyczne bazując na zjawiskach zachodzących w przyrodzie dostarczają satysfakcjonujące rozwiązanie wybranego problemu w ograniczonym czasie uruchomienia. Wykorzystując zdefiniowane przez medycynę choroby uwarunkowane genetycznie, występujące przy kolejnych pokoleniach organizmów żywych opisano sposoby upośledzeń wraz z implementacją w języku wysokiego poziomu.

Słowa kluczowe: algorytm, genetyczny, choroba, mutacje, upośledzenie

Simulation of the performance of genetic algorithms burdened with genetic diseases

Abstract: Genetic algorithms based on nature provide a satisfactory solution to a selected problem in a limited execution time. The paper describes the ways of handicaps and their programming implementation in a high-level programming language.

Keywords: algorithm, genetic, disease, mutations, handicap

1. Wstęp

Algorytm genetyczny (GA) to losowa metoda globalnego wyszukiwania rozwiązania i optymalizacji, opracowana przez naśladowanie biologicznego mechanizmu ewolucji organizmów biologicznych. Bazuje na teorii ewolucji Darwina i teorii genetyki Mendla. Wykorzystywany jest głównie w sytuacjach, gdy nie jest znany sposób rozwiązania problemu lub nie jest możliwy do wykonania (np. w akceptowalnym czasie) natomiast znany jest sposób oceny jakości rozwiązania.

Podstawowe pojęcia to:

*⁽¹⁾Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska;

⁽²⁾Katedra i Oddział Kliniczny Chorób Wewnętrznych, Wydział Nauk o Zdrowiu w Bytomiu, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach;

- *Chromosom* – uporządkowany ciąg genów. Ich długość jest zależna od zdefiniowanego problemu w danym zadaniu. Organizmy żywe posiadają chromosomy o długości nawet do kilku tysięcy genów;
- *populacja* – grupa równocześnie występujących osobników o określonej liczbie;
- *ewolucja* – populacja (zbiór rozwiązań danego problemu) stopniowo dostosowuje się do środowiska oraz zadanych warunków w wyniku czego kolejne elementy wykazują większą wartość dla funkcji jakości. Ewolucja organizmów odbywa się w postaci populacji składającej się z danej liczby elementów;
- *selekcja* (selection) – podstawowy element algorytmu genetycznego – służy do wybierania osobników z populacji z zdefiniowanym prawdopodobieństwem. Ogólnie rzecz biorąc proces selekcji to proces oddający prawdopodobieństwo przetrwania;
- *rozmnażanie* (reproduction) – proces podczas którego następuje produkcja nowego pokolenia. W zależności od zdefiniowanego algorytmu, zdefiniowanego prawdopodobieństwa oraz zmiennych losowych fragmenty materiału genetycznego przenoszone są do nowo wyprodukowanej komórki dla każdego z potomków w populacji. Wykorzystywany może zostać proces replikacji, krzyżowania, mutacji oraz ich zdefiniowanej kombinacji opartej na prawdopodobieństwie.
- *replikacja* (replication) – proces podczas którego następuje stworzenie nowego potomka, a nowa komórka dziedziczy geny starej komórki.
- *krzyżowanie* (crossover) – materiał genetyczny jest przecinany w tym samym miejscu w dwóch chromosomach, a uzyskane ciągi są łączone krzyżowo, tworząc dwa nowe chromosomy;
- *mutacja* (mutate) – proces (z bardzo małym prawdopodobieństwem), podczas którego, podczas reprodukcji występują błędy na poszczególnych genach przez co wytworzony zostaje zmieniony chromosom posiadający nowe cechy; Przyjmuje się, że każdy wytworzony chromosom w algorytmie genetycznym jest równocześnie jednym z rozwiązań problemu przetwarzanego przez algorytm genetyczny.

2. Implementacja algorytmu

W celu zapewnienia porównywalności otrzymywanych wyników zdefiniowano jeden problem, który jest rozwiązywany przez wszystkie z poniższych implementacji. Zadanie dotyczy obliczania pierwiastka 3 stopnia z dowolnej liczby naturalnej $k > 0$. Zadanie nie posiada prostej metody szybkiego obliczania w odróżnieniu do obliczania pierwiastka kwadratowego, które można zrealizować przy pomocy metody Newtona-Raphsona (metodą stycznych).

W analizowanym przykładzie przyjęto $k=100$, $L=20$, $chN=2$, $probMutation = 0,05$, $deltaStop = 0,05$ gdzie
 k – liczba naturalna, dla której wyszukiwane jest rozwiązanie,
 L – liczba chromosomów w pokoleniu,
 $deltaStop$ – dopuszczalna dokładność, po osiągnięciu której algorytm kończy działanie
 chN – liczba naturalna określająca krotność występowania danego chromosomu, domyślnie - 2 (u człowieka występują 22 pary autosomów, np. u ludzi z zespołem Downa 21. chromosom występuje w trójce a nie w parze);
 $probMutation$ – prawdopodobieństwo z którym nastąpi proces mutowania – w funkcji `mutate()`.
Funkcja zatrzymania zwraca wartość `true` w przypadku, gdy minimum 2 chromosomy $\{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$ posortowane malejąco pod względem funkcji dopasowania w danym pokoleniu spełniają warunek:
 $abs(x_1 * x_1 * x_1 - k) < deltaStop$,
Poniżej opisane zostały kolejne etapy algorytmu.

2.1. Utworzenie populacji początkowej (initialize)

W pierwszym kroku algorytmu następuje inicjalne zdefiniowanie populacji inicjalnej – zbioru osobników, w którym każdy zapisany jest jako uporządkowany ciąg znaków.

Dla każdego elementu inicjalnej populacji zostaje wygenerowana pseudolosowa wartość *value* z zakresu $<0;k>$ z jednostajnym (równomiernym) rozkładem prawdopodobieństwa. Znak liczby (wartości) przechowywany jest jako oddzielna zmienna typu `boolean` *valueSign*, na kształt allosomów – chromosomów płci. Zmienna ta może być zaburzana np. przy funkcji odpowiadającej za wprowadzenie do algorytmu zaburzeń w liczbie chromosomów.

Wykorzystywana domyślnie funkcja losowania (`GetRandomNotSecure`) wartości jest deterministyczna. Dlatego została wykorzystana funkcja `GetRandomInt` oraz `GetRandomDouble`, które można uznać za bezpieczną funkcję losowania zmiennej.

```
private static double GetRandomNotSecure(int min, int max)
{
    Random rnd = new Random();
    int value = rnd.Next(min, max);
    return value;
}
private static int GetRandomInt(int min, int max)
{
    using (System.Security.Cryptography.RNGCryptoServiceProvider rng =
new System.Security.Cryptography.RNGCryptoServiceProvider())
    {
```

```

        // Krok 1: Wypełnij losowymi bitami zmienną 4-bitową
        byte[] randomNumber = new byte[4];
        rng.GetBytes(randomNumber);
        // Krok 2: Zwróć wartość z podanego w parametrach zakresu
        int value = BitConverter.ToInt32(randomNumber, 0);
        return Math.Abs(value % max + min);
    }
}
private static double GetRandomDouble()
{
    using (System.Security.Cryptography.RNGCryptoServiceProvider rng =
    new System.Security.Cryptography.RNGCryptoServiceProvider())
    {
        // Krok 1: Wypełnij losowymi bitami zmienną 8-bitową
        var bytes = new Byte[8];
        rng.GetBytes(bytes);
        // Krok 2: Dokonaj przesunięcia bitowego w lewo (11) oraz
        // podzielić przez bit przesunięty o 53 w lewo (bazując na mantysie
        // liczby zmiennoprzecinkowej Double tj. 1 bit + 52 bitów)
        var ul = BitConverter.ToUInt64(bytes, 0) / (1 << 11);
        Double d = ul / (Double)(1UL << 53);
        return d;
    }
}

```

2.2. Część iteracyjna – powtarzana dla każdego chromosomu w każdej populacji aż do spełnienia funkcji zatrzymania

Funkcja iteracyjna `reproduction()` tworzy populację, która składa się z L chromosomów. Dla każdego wykonywane jest:

- replikacja `replication()` 3 chromosomów (w swoich parach $chN = 2$) o największej wartości funkcji dopasowania;
- dokonanie niezależnego wyboru 2 rodziców za pomocą funkcji wybierania `selection()` rodziców z określonym prawdopodobieństwem;
- dokonanie krzyżowania chromosomów za pomocą funkcji `crossover()` spójnie w swoich parach. Funkcja losuje pozycję w zapisie dziesiętnych, w której będzie dokonywany podział. Dla przykładowych dwóch wartości: 14,587474 oraz 42,496370 oraz zmiennej `cutPosition=5` zwróci:
String head = "14,58"
String tail = "6370",
co w wyniku zwróci wartość 14,586370.

Chromosomy występują w identycznych parach. Na skutek wad genetycznych mogą się różnić lub nawet zmieniać swoją liczebność.

Do szkieletu funkcji dodawane są dodatkowe instrukcje w zależności od symulowanej choroby. Domyślne, poprawne wywołanie funkcji `Crossover_disease` przyjmuje w parametrze $xk = 2$;

- wywołania funkcji mutowania z zadany m prawdopodobieństwem. Choroby związane z mutowaniem (dostępne w słowniku listOfDiseases mogą wyst pi  niezależnie z zadany m prawdopodobieństwem w słowniku). W przypadku wywołania funkcji z parametrem mutate(-1) nie następuje  adne dodatkowe losowanie mutowanie. W innym przypadku prawdopodobieństwo będzie wynosiło statystycznie probMutation;

```

        public override void mutate(double _probMutation)
    {
        double choose;
        int choose2;
        if (_probMutation == -1)
            double v = double.Parse(value);

        Dictionary<string, int> listOfDiseases = new
        Dictionary<string, int>() {
            { "deletion", 20000 },
            { "duplication", 30000 },
            { "inversion", 30000 },
            { "translocation", 40000 },
            { "insertion", 20000 },
            { "onlyOneMutated", 27500 },
            { "X-linkedRecessiveInheritance", 30000 },
        };

        foreach (KeyValuePair<string, int> _lod in listOfDiseases) {
            int mutate_prob = GetRandomInt(0, 15000);

            if (mutate_prob == Math.Round((Double)_lod.Value / 2))
            {
                Mutate_disease(v, _lod.Key, _lod.Value);
            }
        }
    } else
    {
        {
            choose = GetRandomDouble();
            if (choose <= _probMutation)
                v += GetRandomDouble() - 0.5;
        }
        else {
            choose2 = GetRandomInt(1,value.Length-1);
            if (value[choose2]!='(',')') {
                value = value.Substring(0, choose2-1) +
                    GetRandomInt(0, 9) + value.Substring(choose2);
            }
        }
    }
}

```

```

        GenLog _log = new GenLog("MUTATE ", probMutation,
choose, choose2, DateTime.Now.ToString("yyyy-MM-dd hh:mm:ss"));
        global_history_collection.Add(_log);

```

```

        value = String.Format("{0:00.000000}", v);
    }

```

- sprawdzenie funkcją `check_health()` oraz `check_health_population()` stanu pojedynczych chromosomów oraz kondycji całej populacji. Gdy zostanie wykryta któraś ze zdefiniowanych nieprawidłowości (któryś wzorzec choroby genetycznej) na poziomie funkcji `check_health()` następuje wylosowanie zmiennej typu `double` `prob_aod`, która zostanie porównana ze zmienną sterującą `acceptanceOfDisease` ustawioną domyślnie na 0,1. W przypadku, gdy `prob_aod < acceptanceOfDisease` następuje terminacja danego potomka i ponowne wygenerowanie nowego w jego miejsce w danej populacji.

```

public int check_health(Population _population)
{
    double prob_aod = GetRandomDouble();
    double acceptanceOfDisease = 0.1;
    foreach (Chromosome c in (Population) _population) {
        Boolean healthy_sick = check_chromosome(c);
        if (healthy_sick == true && prob_aod < acceptanceOfDisease)
        {
            Chromosome parent1 = selection();
            Chromosome parent2 = selection();
            Chromosome newChild = reproductionChild(parent1,
parent2);
            c.replaceChild(newChild);

            GenLog _log = new GenLog("CHECK_HEALTH_REPLACE",
parent1,parent2,newChild, DateTime.Now.ToString("yyyy-MM-dd
hh:mm:ss"));
            global_history_collection.Add(_log);
        }
    }
    return 0;
}

```

- posortowania wszystkich elementów w populacji malejąco zgodnie z wynikiem funkcji dopasowania `getFitness()`

```

public override double getFitness() {
    double x = double.Parse(value);
    fitness = -1 * Math.Abs(x * x * x - k);
}

```

```

    return fitness;
}

```

- dodanie do zmiennej globalnej `global_history_collection` całej instancji opisującej szczegółowo daną populację (w tym wartości, funkcji dopasowania, wartość zmiennych losowych definiujących wybór dokonywania operacji, liczbę iteracji).

3. Rodzaje chorób genetycznych

3.1. Aberracje liczbowe

U człowieka spotykane są trisomie:

- chromosomu 13 (powoduje zespół Patau), którego częstość występowania wynosi około 1:5000 [1];
- chromosomu 18 (powoduje zespół Edwardsa), którego częstość występowania wynosi około 1:8000 urodzeń [2];
- chromosomu 21 (powoduje zespół Downa), którego częstość występowania jest zależna od wieku matki. U matek, które nie przekroczyły 28. roku życia, z zespołem Downa rodzi się jedno dziecko na tysiąc, u matek czterdziestoletnich częstość ta wynosi jeden do stu, a u starszych nawet jeden do pięćdziesięciu[3];
- chromosomu 23 (powoduje Zespół XYY, Zespół XXX, Zespół Klinefeltera);

tetrasomie:

- chromosomu 9 (powoduje Tetrasomię 9p);
- chromosomu 12 (powoduje Zespół Pallistera-Killiana);
- chromosomu 18 (powoduje Tetrasomię 18p);
- chromosomu 21 (powoduje rzadką formę zespołu Downa);

pentasomie:

- pentasomia chromosomu X (XXXXX)

Stopień obciążenia chorobą genetyczną jest bardzo trudny do ujęcia w wymiernych kategoriach i precyzyjnego określenia ilościowego.

Symulację ww. chorób można wykonać dodając wewnątrz funkcji `Crossover()` funkcję `Crossover_disease(xk,d_prob)` podając zestaw parametrów, gdzie:

`xk` (gdzie $xk \geq 0$) – liczba całkowita odpowiadających chromosomów (2 – domyślna wartość, 3 – trisomia, 4 – tetrasomia, 5 – pentasomia, 1 – allosomia);

d_prob – liczba zmiennoprzecinkowa odpowiadająca prawdopodobieństwu wystąpienia choroby, gdzie $d_prob \in (0;1>$. Dla $xl=2$ parametr d_prob nie jest brany pod uwagę.

Do weryfikacji poprawności budowania chromosomu na końcu funkcji `reproduction()` dodana została funkcja `check_health(Population _population)`, która wykorzystuje funkcję `check_chromosome(Chromosome c)` do zbadania wszystkich zaburzeń.

Implementacja sprawdzająca polega na sprawdzeniu każdego genu w chromosomie pod kątem identyczności. Dotyczy to również zmiennej `ValueSign`.

Implementacja zaburzająca polega na losowej zmianie liczebności x_k z zadaniem prawdopodobieństwem oraz zmianą bitów poszczególnych chromosomów np. w danej parze.

3.2. Zaburzenia w liczbie chromosomów płci

Wśród chorób genetycznych częste są również zaburzenia w liczbie chromosomów płci. Odwzorowaniem tej choroby jest modyfikacja zmiennej `ValueSign` w trakcie wykonywania się algorytmu. W przypadku, gdy takie zaburzenie ma miejsce i dotyczy potomka o wysokiej wartości funkcji dopasowania (`getFitness()`) następuje wyraźny spadek wydajności algorytmu.

Implementacja sprawdzająca polega na sprawdzeniu zmiennej `ValueSign`. Implementacja zaburzająca polega na losowej zmianie wartości z zadaniem prawdopodobieństwem.

3.3. Nieprawidłowości/aberracje strukturalne

Poza mutacjami liczbowymi chromosomów choroby genetyczne wywołują również aberracje strukturalne. Polegają one na nieprawidłowej budowie chromosomu. Największe prawdopodobieństwo ich wystąpienia istnieje w okresie podziału komórki, gdy chromosomy są rozdzielane do nowo powstających komórek. Najczęściej spotykane choroby związane z aberracjami strukturalnymi, powstają w wyniku przerwania ciągłości chromosomu, a więc odłamania się jego odcinka[5]. Taki odłamany odcinek może połączyć się ponownie z tym samym lub innym chromosomem, co powoduje powstanie:

- delecję (deletion) – utrata części chromosomu lub została ona usunięta;
- deficyjencję – utrata końcowej części chromosomu lub została ona usunięta;
- duplikacji (duplication) – część chromosomu jest zduplikowana, co skutkuje dodatkowym materiałem genetycznym;
- inwersji (inversion) – część chromosomu odrywa się, odwraca się do góry nogami i ponownie przyłącza, dlatego materiał genetyczny jest odwrócony;
- translokacji (translocation) – część jednego chromosomu jest przenoszona na inny chromosom;

- insercji (insertion) – część jednego chromosomu została usunięta z jego normalnego miejsca i wstawiona do innego chromosomu;
- pierścienie (ring) – część chromosomu oderwała się i utworzyła okrąg lub pierścień. Może się to zdarzyć z utratą materiału genetycznego lub bez [4].

Przykład chorób związanych z nieprawidłowościami strukturalnymi:

- Zespół ustno-twarzowo-palcowy - częstą przyczyną jest translokacja części chromosomu 6 do 1;
- Zespół Wolfa-Hirschhorna - wywołany jest częściową delecją krótkiego ramienia chromosomu 4;
- Zespół kociego krzyku – wywołany jest delecją krótkiego ramienia chromosomu 5. Częstość występowania zespołu szacowana jest od 1:15 000 do 1:50 000 żywych urodzeń [7];
- Zespół Williamsa – wywołany jest mikrodelecją krótkiego ramienia chromosomu 7;
- Zespoły Angelmana oraz Pradera-Williego – wywołane są mikrodelecją chromosomu 15;
- Chromosom „Filadelfia” – wywołane delecją jednego ramienia chromosomu 21;
- Zespół Di George’a – wywołany jest mikrodelecją krótkiego ramienia chromosomu 22;

Najbardziej zaawansowana część implementacyjna ulokowana w `mutate()` oraz `Mutate_disease(v,_lod.Key,_lod.Value)`. Zarówno mechanizm zaburzający jak i sprawdzający sprawdza poprawność wykonania programu. W większości przypadków przy prawdopodobieństwie występowania choroby na poziomie 1: 20 000 – 1:50 000 nie były w stanie zakłócić pracy algorytmu.

W przypadku zwiększenia prawdopodobieństwa wystąpienia upośledzenia do 1:10 oraz 1:2 wprowadzone choroby prowadziły do znacznie wolniejszego przebywania ewolucji lub prowadziły to tworzenia pokoleń, które miały duże gorsze wartości funkcji dopasowania niż poprzednie pokolenia.

```

=====Population 10=====
1 : chromosome=24,83921300 fitness=-15225,4592
2 : chromosome=24,48085300 fitness=-14571,6730
3 : chromosome=24,43799600 fitness=-14494,7536
4 : chromosome=24,43757700 fitness=-14494,0029
5 : chromosome=24,42416400 fitness=-14469,9856
6 : chromosome=24,42416400 fitness=-14469,9856
7 : chromosome=24,19416400 fitness=-14062,2371
8 : chromosome=24,15921300 fitness=-14000,9492
9 : chromosome=24,15421300 fitness=-13992,1960
10 : chromosome=24,15421300 fitness=-13992,1960
11 : chromosome=24,15416400 fitness=-13992,1102
12 : chromosome=24,15112000 fitness=-13986,7831
13 : chromosome=24,08370500 fitness=-13869,1473
14 : chromosome=24,02926400 fitness=-13774,6299
15 : chromosome=24,02926400 fitness=-13774,6299
16 : chromosome=24,02599600 fitness=-13768,9698
17 : chromosome=23,98136700 fitness=-13691,8272
18 : chromosome=23,96599300 fitness=-13665,3191
19 : chromosome=23,96599300 fitness=-13665,3191
20 : chromosome=23,96599300 fitness=-13665,3191

```

Rys. 1. Widok pokolenia nr 10 w przypadku obarczenia populacji inicjalnej współczynnikiem chorób aberracji strukturalnych – wolne uczenie

```

=====Population 10=====
1 : chromosome=1111111110000000,76547900 fitness=-137174211244170000000000000000000000000000000000000,0000
2 : chromosome=11111111110000067,41739500 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
3 : chromosome=11111111110000072,12004800 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
4 : chromosome=11111111110000072,19005400 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
5 : chromosome=11111111110000072,16547900 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
6 : chromosome=11111111110000067,18685300 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
7 : chromosome=11111111110000044,12004800 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
8 : chromosome=11111111110000051,76128400 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
9 : chromosome=11111111110000027,96114900 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
10 : chromosome=11111111110000022,53519900 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
11 : chromosome=11111111110000022,18035200 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
12 : chromosome=11111111110000022,18685300 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
13 : chromosome=11111111110000018,53539500 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
14 : chromosome=11111111110000013,72882900 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
15 : chromosome=11111111110000000,000000 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
16 : chromosome=11111111110000005,50157500 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
17 : chromosome=11111111110000000,000000 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
18 : chromosome=11111111110000000,000000 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
19 : chromosome=11111111110000000,000000 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000
20 : chromosome=11111111110000000,000000 fitness=-13717421124417000000000000000000000000000000000000,0000

```

Rys. 2. Widok pokolenia nr 10 w przypadku obarczenia populacji inicjalnej współczynnikiem chorób aberracji strukturalnych – błędy w krzyżowaniu

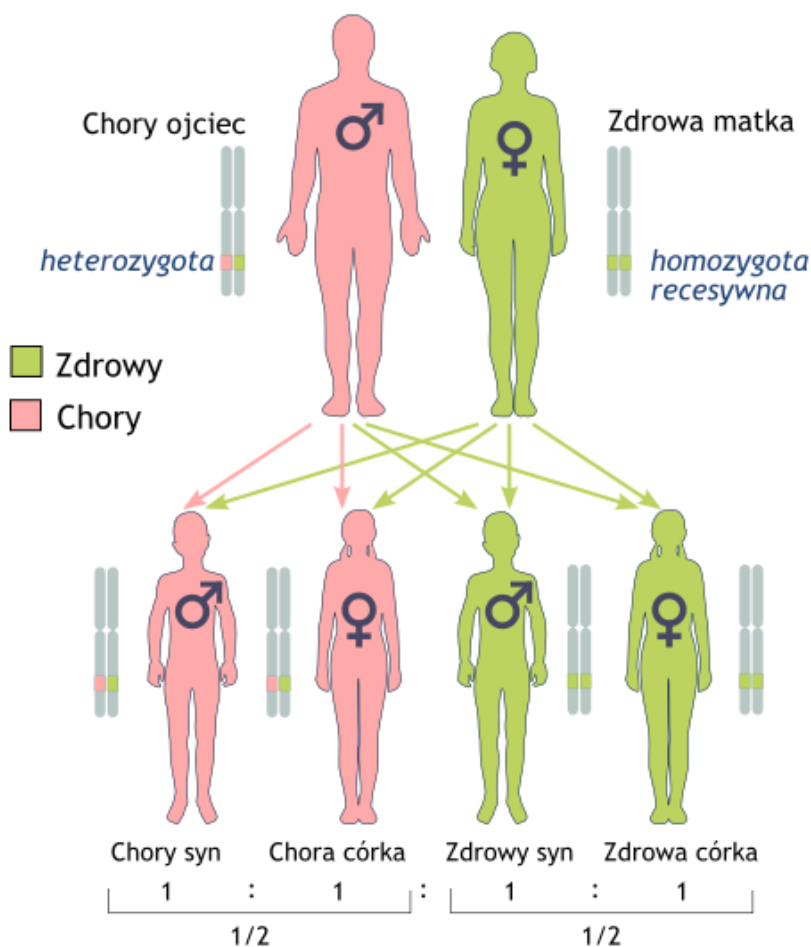
3.4. Choroby jednogenowe

Choroby z tej grupy dziedziczą się zwykle zgodnie z prawami Mendla, a mutacje je powodujące dotyczą pojedynczych genów. Są one głównie związane z wystąpieniem mutacji w genach zlokalizowanych w DNA jądrowym. W zależności od tego, w jakim chromosomie zaszła mutacja (autosomie czy heterosomie) wyróżnia się choroby autosomalne i sprzężone z płcią. Ze względu

na charakter dziedzicznej cechy, choroby genetyczne jednogenowe dzieli się na dziedziczone dominująco i recesywnie[6]. Dostępne w ramach funkcji `mutate()` z parametrem `onlyOneMutated`.

3.5. Sprzężone z płcią recesywne oraz sprzężone z płcią dominujące

Sprzężenie z płcią najczęściej oznacza wystąpienie mutacji w genie zlokalizowanym w chromosomie X, ponieważ homologiczny chromosom Y zawiera mniej genów, jest znacznie krótszy. Większość z tych genów warunkuje rozwój męskich zarodków zgodnie z ich genetyczną płcią, a mutacje w obrębie tych genów zazwyczaj skutkują bezpłodnością, dlatego nie są przekazywane potomstwu.



Rys. 3. Sposób dziedziczenia autonomicznego dominującego (AD)

Dostępne w ramach funkcji `mutate()` z parametrem `X-linkedRecessiveInheritance`.

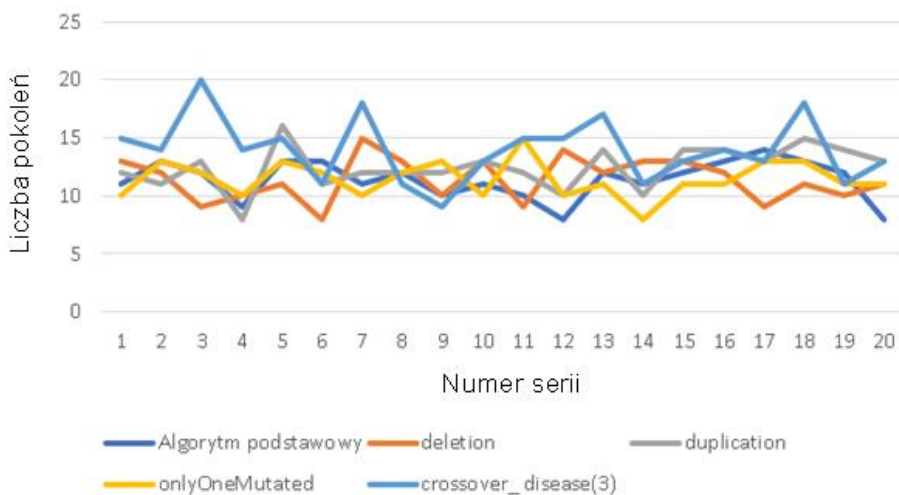
4. Analiza

Jak to w przypadku algorytmów opartych na zmiennych losowych (pseudolosowych) wyniki uzależnione są od przypadku. Dla uśrednienia wyników należy przeprowadzić wiele symulacji i uśrednić wyniki.

Zakłócenia jakie wywoływały kolejne funkcje zostały przedstawione w Tab. 1 i Rys. 4. W kontekście całych badań przy bardzo małym prawdopodobieństwie wystąpienia kolejnych wad genetycznych (zamieszczonych w funkcji `mutate()`) wyniki są bardzo zbliżone.

Tab. 4. Liczba pokoleń niezbędnych do zakończenia algorytmu ($k=100$, $L=20$, $chN=2$, $probMutation = 0,05$, $deltaStop= 0,05$); opracowanie własne

Pokolenie/ nr symulacji	Algorytm podstawowy	deletion	duplication	onlyOne Mutated	crossover_ disease(3)
1	11	13	12	10	15
2	13	12	11	13	14
3	12	9	13	12	20
4	9	10	8	10	14
...					
20	8	11	13	11	13
Średnia	11	11	12	11	16



Rys. 4. Liczba pokoleń niezbędnych do zakończenia algorytmu ($k=100$, $L=20$, $chN=2$, $probMutation=0,05$, $deltaStop=0,05$) dla 20 prób; opracowanie własne

Tab. 2. Liczba pokoleń niezbędnych do zakończenia algorytmu ($k=100$, $L=20$, $chN=2$, $probMutation=0,3$, $deltaStop=0,05$); opracowanie własne

Pokolenie/ nr symulacji	Algorytm podstawowy	deletion	duplication	onlyOne Mutated	crossover_ disease(3)
1	8	10	11	11	12
2	16	13	13	11	17
3	12	7	14	12	9
4	2	10	9	8	12
...					
20	4	10	11	13	15
Średnia	8	10	11	12	14

Tab. 3. Liczba pokoleń niezbędnych do zakończenia algorytmu ($k=100$, $L=5$, $chN=2$, $probMutation=0,05$, $deltaStop=0,05$); opracowanie własne

Pokolenie/ nr symulacji	Algorytm podstawowy	deletion	duplication	onlyOne Mutated	crossover_ disease(3)
1	21	14	15	18	21
2	10	17	19	27	17
3	20	12	13	19	22
4	8	12	20	20	21
...					
20	4	13	17	16	19
Średnia	19	17	17	19	23

Szczegóły analizy dostępne dzięki rejestrowaniu szczegółów kolejnych operacji w każdej z populacji dzięki klasie GenLog pozwoliły stwierdzić, iż w przypadku jednego z pokoleń nastąpiło wytworzenie pentasomii ($chN=5$) co przełożyło się na 1,7 razy wolniejsze osiągnięcie do końca algorytmu. Zwielokrotnienie danego chromosomu (od 3 dodatkowe) powoduje problem z prawidłowym dziedziczeniem, a potomstwo w konsekwencji jest obciążone dziedziczącą się wadą genetyczną.

Zaobserwowano, iż w przypadku zwiększenia prawdopodobieństwa (Tab. 2) mutacji do 0.3 uzyskiwane wyniki stały się lepsze. Tab. 3 przedstawia wyniki po czterokrotnym zmniejszeniu liczby generowanych osobników w każdym z pokoleń ($L=5$, $probMutation = 0,05$). Wyniki są porównywalnie gorsze od 60-70%. W mniejszej populacji jest dużo większa szansa, że potomstwo będzie obciążone chorobą rodzica.

5. Wnioski

Algorytmy genetyczne mogą być wykorzystywane do rozwiązywania zagadnień, które są trudne do wyliczenia analitycznego/algebraicznego. Istnieje nieskończenie wiele możliwości implementacji i konfiguracji cech w takim algorytmie. Z moich obserwacji wynika, że dla skomplikowanych obliczeń jest możliwe nieintencjonalne pojawianie się błędów/upośledzeń wyników. Może to wynikać z zaokrąglania liczb zmiennoprzecinkowych, błędnych założeń lub chociażby błędów kompilatora programowego. Dobrym przykładem jest generator pseudolosowy używany w języku C#, który przy każdym wywołaniu programu zwraca identyczne wartości „losowe”.

Chociaż otrzymywane wyniki obliczania pierwiastka 3 stopnia dla wybranego $k=100$ są zadowalające to należy zwrócić uwagę, że zarówno w przypadku

algorytmów genetycznych jak i sieci neuronowych kluczowe jest dobieranie parametrów tak, aby algorytm był efektywny dla różnych wartości parametru k . Dostęp do historycznych wyników pozwoliłby na dynamiczne zmienianie parametrów stałych algorytmu. Podejście predykcyjne pozwoliłoby zapewnić, by algorytm zachowywał się stabilnie dla przy dużej zmienności parametrów wejściowymi (np. obliczenie wartości pierwiastka 3 stopnia dla liczby 9 oraz 100000. Sądzę, iż warto się zastanowić nad zmianą reprezentacji danych w chromosomach, co powinno poprawić wyniki i przyspieszyć działanie algorytmu genetycznego.

Dodatkowo warto opracować bardziej skuteczną metodę porównywania konsekwencji przy różnym chN dla każdego z osobników i pomiędzy pokoleniami.

Literatura

- [1] Best G.R., *Best: Patau syndrome*, Medscape <https://emedicine.medscape.com/article/947706>, (16-07-2020),
- [2] Szczapa J., *Neonatologia*, Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2000.
- [3] www.dsrf-uk.org, (12.07.2020).
- [4] Rieger, R., Michaelis A., „*Mutacja*”. *Glosariusz genetyki i cytogenetyki: klasyczna i molekularna*, Nowy Jork, Springer-Verlag, 1968.
- [5] Boczkowski K., *Zarys genetyki medycznej: podręcznik dla studentów medycyny*, Wyd. 2. zmienione i uzupełnione, Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 1990.
- [6] Mainardi P, *Cri du Chat syndrome*, Orphanet Journal of Rare Diseases”, 1 (33), 2006.
- [7] Williams T.N., Obaro S.K., *Sickle cell disease and malaria morbidity: a tale with two tails*, Trends in Parasitology 27 (7), 2011.