

Środowiskowe narażenia zawodowe  
przy obsłudze sieci elektroenergetycznych  
wysokiego napięcia w Polsce

# **Środowiskowe narażenia zawodowe przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia w Polsce**

**Pod redakcją Jolanty Karpowicz i Joanny Bugajskiej**



# Środowiskowe narażenia zawodowe przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia w Polsce

Pod redakcją Jolanty Karpowicz i Joanny Bugajskiej

**CIOP**  **PIB**

Warszawa 2013

Opracowano i wydano w ramach II etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” (2011-2013) finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

#### Autorzy

dr med. Joanna Bugajska, dr hab. inż. Anna Bogdan, dr inż. Zygmunt Grabarczyk,  
dr inż. Krzysztof Gryz, dr inż. Jolanta Karpowicz, dr inż. Piotr Kowalski,  
dr Anna Łuczak, dr inż. Witold Mikulski, dr Tomasz Tokarski, dr inż. Agnieszka Wolska  
– Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
dr hab. inż. Jerzy Marzecki, prof. PW – Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej  
dr Krzysztof Pachocki – Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego Państwowy Zakład  
Higieny  
mgr inż. Szymon Zapadka – SAG Elbud Gdańsk SA

#### Projekt okładki

Jolanta Maj

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy  
– Państwowy Instytut Badawczy  
Warszawa 2013

ISBN 978-83-7373-134-9



Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa  
tel. (22) 623 36 98, fax (22) 623 36 93, 623 36 95, [www.ciop.pl](http://www.ciop.pl)

<b>1. Wstęp</b> .....	7
<b>2. Struktura sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia w Polsce</b> <i>Jerzy Marzecki</i> .....	11
Funkcje elektroenergetycznych układów przesyłowych ■ Budowa układów przesyłowych ■ Typowe układy rozdzielni 110 kV, 220 kV i 400 kV ■ Przykłady typowej struktury sieci przesyłowych i rozdzielczych WN ■ Kierunki/tendencje zmian sieci elektroenergetycznych w Polsce	
<b>3. Charakterystyka prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia</b> <i>Szymon Zapadka</i> .....	45
Rodzaje prac eksploatacyjnych ■ Uwarunkowania prawne prac na urządzeniach elektroenergetycznych ■ Najczęściej wykonywane prace i wykorzystywane urządzenia ■ Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia związane z wykonywanymi pracami ■ Profilaktyka zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia	
<b>4. Psychofizyczne obciążenia pracowników przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia</b> <i>Joanna Bugajska, Anna Łuczak, Tomasz Tokarski</i> .....	77
Charakterystyka środowiska pracy ■ Obciążenie wysiłkiem fizycznym ■ Przykładowe profile obciążenia wysiłkiem fizycznym ■ Obciążenie psychiczne	
<b>5. Czynniki atmosferyczne (mikroklimat i promieniowanie optyczne)</b> <i>Anna Bogdan, Agnieszka Wolska</i> .....	109
Charakterystyka parametrów mikroklimatu w Polsce ■ Procesy wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem ■ Metody oceny obciążenia termicznego pracowników w warunkach atmosferycznych ■ Przykładowe profile narażenia na mikroklimat zimny i gorący ■ Charakterystyka promieniowania słonecznego w Polsce ■ Oddziaływanie promieniowania optycznego na organizm człowieka ■ Metoda oceny narażenia ■ Przykładowe profile narażenia na naturalne promieniowanie optyczne	

- 6. Pole elektryczne i magnetyczne sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia**  
*Krzysztof Gryz, Jolanta Karpowicz* ..... 149
- Pola elektryczne i magnetyczne w otoczeniu sieci elektroenergetycznych WN ■ Bezpośrednie i pośrednie oddziaływanie pól elektrycznych i magnetycznych na organizm człowieka i infrastrukturę techniczną ■ Elektromagnetyczne zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia przy obiektach elektroenergetycznych ■ Przykładowe profile narażenia pracowników na pola elektryczne i magnetyczne
- 7. Wyładowania ulotowe z przewodów linii elektroenergetycznych i związane z nimi zjawiska jonizacji powietrza. Promieniowanie jonizujące w otoczeniu linii**  
*Zygmunt Grabarczyk, Krzysztof Pachocki* ..... 183
- Wyładowania ulotowe w otoczeniu przewodów WN linii elektroenergetycznych ■ Potencjalne zagrożenia wynikające z ulotu z linii WN ■ Czynniki warunkujące poziom zagrożenia zdrowia
- 8. Hałas i drgania mechaniczne na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia**  
*Witold Mikulski, Piotr Kowalski* ..... 213
- Źródła hałasu na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN ■ Charakterystyka stanowisk pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN ■ Metody pomiaru i oceny hałasu na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci ■ Przykładowe profile narażenia na hałas przy obsłudze stacji elektroenergetycznych ■ Oddziaływanie drgań mechanicznych na organizm człowieka ■ Źródła drgań mechanicznych na stanowiskach obsługi sieci elektroenergetycznych WN ■ Charakterystyka prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN w Polsce w aspekcie narażenia na drgania mechaniczne ■ Przykładowe profile narażenia na drgania mechaniczne przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN w Polsce

# 1. Wstęp

---

Korzystanie z urządzeń zasilanych elektrycznie wymaga doprowadzenia z elektrowni energii elektrycznej za pośrednictwem systemu elektroenergetycznego, w którego skład wchodzi m.in. przesyłowe linie elektroenergetyczne i stacje rozdzielcze wysokiego napięcia (WN) – 110, 220 lub 400 kV.

Ze względu na zagrożenie życia związane z porażeniem prądem elektrycznym prace przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN są wykonywane z zachowaniem rygorystycznych procedur bezpieczeństwa przeciwporażeniowego, a także procedur bezpiecznego wykonywania pracy na wysokości na konstrukcjach wsporczych, na których montowane są przewody WN. Dzięki temu wypadki śmiertelnego porażenia prądem elektrycznym i upadku z wysokości podczas obsługi sieci elektroenergetycznych należą do rzadkości. Jednakże towarzyszący tym pracom zespół innych zagrożeń, wynikających z fizycznych uwarunkowań środowiska i psychospołecznej charakterystyki warunków pracy, jest również nieobojętny dla bezpieczeństwa i zdrowia pracowników.

Szeroko znane są zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia pracowników oraz jakości życia wynikające z dysfunkcji psychospołecznych warunków pracy oraz rozbieżności między obiektywną i subiektywną oceną zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia przez pracowników zatrudnionych w różnych sektorach gospodarki. Psychospołeczne warunki pracy oceniane są pod względem wymagań pracy, zakresu posiadanej kontroli w pracy, wsparcia społecznego oraz niepewności pracy, wpływu na decyzje dotyczące własnego miejsca pracy, relacji z klientami, itp. Psychospołeczne i fizyczne warunki pracy wpływają różnie na występowanie dolegliwości mięśniowo-szkieletowych w różnych częściach ciała i ograniczeń funkcjonalnych spowodowanych tymi dolegliwościami.

Ekspozycja na naturalne promieniowanie nadfioletowe, szczególnie w okresie wiosenno-letnim, jest istotnym czynnikiem zagrożenia dla zdrowia pracowników wykonujących prace na wolnym powietrzu i powinna być brana pod uwagę przy ocenie ryzyka zawodowego. Szkodliwe oddziaływanie dotyczy skóry (poparzenia słoneczne, fotostarzenie skóry, zmiany przednowotworowe i rak skóry) oraz oczu (zapalenie rogówki i spojówki, skrzydlik, zaćma). Poziom narażenia na promieniowanie nadfioletowe różnych grup pracowniczych zatrudnionych na zewnętrznych stanowiskach pracy w Polsce jest w okresie wiosenno-letnim wystarczający do



wytworzenia rumienia skóry u III i IV fototypu skóry preadaptowanej. Wielokrotnie powtarzana ekspozycja, szczególnie osób o jaśniejszej karnacji (I i II fototyp), zwiększa ryzyko wystąpienia zmian nowotworowych i raka skóry. Podjęcie działań profilaktycznych w tym zakresie jest zatem konieczne.

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na zdrowie jest nie bez znaczenia, nawet w świetle wyników badań naukowych dotyczących skutków zdrowotnych ekspozycji na słabe pola magnetyczne wśród ludności zamieszkującej w sąsiedztwie linii WN oraz narażenia na promieniowanie radiofalowe użytkowników telefonów komórkowych. W świetle przeglądowych opracowań Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC), Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) oraz Komitetu Naukowego ds. Pojawiających się i Nowo Rozpoznanych Zagrożeń dla Zdrowia (SCENIHR), dotyczących zagrożeń zdrowia związanych z ekspozycją na pola elektromagnetyczne, związek zachorowań z narażeniem na pola elektromagnetyczne jest identyfikowany w statystycznych danych epidemiologicznych, odnoszących się do licznych grup ludzi zamieszkujących w otoczeniu linii energetycznych, bez konkluzji dotyczących indywidualnych osób (w tym pracowników). Zależności między ekspozycją na pole elektromagnetyczne a rozwojem choroby nowotworowej, które udało się ustalić w wyniku licznych badań epidemiologicznych, sprawiły, że IARC w roku 2002 zaklasyfikowała pola magnetyczne małej częstotliwości oraz promieniowanie elektromagnetyczne radiofalowe do czynników przypuszczalnie rakotwórczych (grupa 2B), a pole elektryczne do czynników, których nie można sklasyfikować pod względem działania rakotwórczego (grupa 3).

Słabo rozpoznaną (pod względem fizykochemicznym i zdrowotnym) grupą czynników są zjawiska związane z jednoczesnym występowaniem ulotowej jonizacji powietrza, polowym i dyfuzyjnym ładowaniem elektrycznym aerozolu atmosferycznego w strefie ulotu oraz zjawisk dielektroforetycznych w bardzo silnym polu elektrycznym (natężenie dochodzące do 3 MV/m) w bezpośrednim otoczeniu przewodów linii elektroenergetycznych WN. Na skutek zjawiska dielektroforezy na przewodach elektrycznych lub w ich otoczeniu osadzają się cząstki aerozoli, w tym zawierające promieniotwórcze produkty rozpadu radonu. Z uwagi na bardzo duże natężenia pola elektrycznego przy przewodach można przy nich oczekiwać statystycznie zwiększonego promieniowania jonizującego (zwłaszcza korpuskularnego). Ponadto zwiększone stężenia cząstek naelektryzowanego aerozolu w otoczeniu linii elektroenergetycznych, może powodować zwiększoną depozycję zanieczyszczeń powietrza w drogach oddechowych. Praca na liniach WN pod napięciem może się także wiązać z istotnie zwiększoną ekspozycją na ozon, generowany przez wyładowania ulotowe z przewodów linii.

Hałas i drgania mechaniczne są czynnikami szkodliwymi lub uciążliwymi środowiska pracy, mogącymi prowadzić do powstawania chorób zawodowych, odpowiednio: obustronnego trwałego ubytku słuchu i zespołu wibracyjnego. Hałas o niższych poziomach może być również traktowany jako czynnik uciążliwy, utrudniający lub uniemożliwiający wykonywanie zadań wymagających odpowiedniej koncentracji uwagi. Napowietrzne linie elektroenergetyczne WN, stanowiące zasadniczy element sieci elektroenergetycznych, są źródłem hałasu, związanego głównie z tzw. ulotem. Ulot i towarzyszący mu hałas zależą w dużym stopniu od warunków atmosferycznych. Źródłem zagrożeń wibroakustycznych mogą być również narzędzia stosowane przez pracowników zatrudnionych przy eksploatacji linii elektroenergetycznych WN.

Dla miarodajnej oceny narażenia zawodowego pracowników zatrudnionych przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN istotne znaczenie ma kompleksowa analiza czynników występujących w środowisku pracy. Pomimo braku danych naukowych dotyczących zasad oceny złożonych zagrożeń zawodowych, kiedy to pracownicy są poddani równoczesnemu oddziaływaniu różnorodnych czynników środowiskowych, należy określić parametry narażenia zarówno na czynniki uznawane za dominujące, jak i na inne, dotychczas uważane za marginalne.

Ocena zagrożeń powinna obejmować zarówno te czynniki fizyczne, których oddziaływanie powszechnie budzi niepokój, jak wymuszona pozycja ciała i obciążenie statyczne, promieniowanie nadfioletowe czy pole elektromagnetyczne, jak i inne, takie jak zmienne warunki klimatyczne, ulot elektryczny i psychospołeczne warunki pracy, które łącznie również istotnie wpływają na samopoczucie i zdolność do pracy oraz bezpieczeństwo i zdrowie pracowników.

Niniejsze opracowanie ma na celu zaprezentowanie danych charakteryzujących najszerzej występujące oddziaływania środowiskowe (tzw. profile narażeń), kluczowe dla właściwego rozpoznania natury złożonych zagrożeń zawodowych związanych z pracami wykonywanymi przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN. Przedstawiono również możliwe konsekwencje zdrowotne takich oddziaływań oraz zasady badania parametrów, które są miarami związanych z nimi zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia pracowników.

Ze względu na bogatą literaturę poświęconą zagrożeniom bezpieczeństwa i zdrowia, uznawanym powszechnie za dominujące, takim jak rażenie prądem elektrycznym i upadek z wysokości, zagadnienia takie nie zostały omówione.

Rozpoznanie charakterystyki oddziaływań środowiskowych i warunków psychospołecznych wykonywania pracy przy eksploatacji sieci WN, konieczne do opracowania prezentowanych w pracy profili narażeń, było możliwe dzięki przeprowadzonym badaniom terenowym i ankietowym. Autorzy dziękują kierownictwu

i pracownikom przedsiębiorstw działających w Polsce w obszarze eksploatacji sieci WN za umożliwienie wykonania tych badań, a także pomoc przy ich realizacji. Uzupełnieniem niniejszej monografii jest opracowany również poradnik prezentujący zalecenia i wymagania prawa pracy dotyczące wybranych zagrożeń oraz rozwiązania profilaktyczne ograniczające ich niepożądane konsekwencje dla zdrowia i jakości życia pracowników.

# 2. Struktura sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia w Polsce

Jerzy Marzecki

2.1. Funkcje elektroenergetycznych układów przesyłowych (11)	2.2.2. Linie kablowe (25)
2.1.1. Wprowadzenie (11)	2.2.3. Stacje elektroenergetyczne (26)
2.1.2. Rodzaje sieci elektroenergetycznych (13)	2.3. Typowe układy rozdzielni 110 kV, 220 kV i 400 kV (33)
2.1.3. Zadania sieci przesyłowych (14)	2.4. Przykłady typowej struktury sieci przesyłowych i rozdzielczych WN (39)
2.1.4. Ogólna charakterystyka obecnego stanu sieci przesyłowych w Polsce (15)	2.5. Kierunki/tendencje zmian sieci elektroenergetycznych w Polsce (41)
2.2. Budowa układów przesyłowych (16)	Bibliografia (44)
2.2.1. Linie napowietrzne (16)	

## 2.1. Funkcje elektroenergetycznych układów przesyłowych

### 2.1.1. Wprowadzenie

Powszechność dostępu i korzystanie z zalet energii elektrycznej wymaga sprawnego działania rozbudowanego układu urządzeń do jej wytwarzania, przesyłania i rozdziału. Energia elektryczna dostarczana do naszych domów jest wytwarzana w elektrowniach. W Polsce są to głównie elektrownie ciepłne opalane węglem brunatnym lub kamiennym. Przesyłanie energii z elektrowni do odbiorcy jest możliwe dzięki rozległej sieci linii i stacji elektroenergetycznych. Wiąże się to jednak ze stratami. Zasadniczy sposób zmniejszenia tych strat polega na podwyższaniu napięcia elektroenergetycznych linii przesyłowych.

Zależnie od odległości, na jakie ma być przesyłana energia, różne są wartości stosowanych napięć. Wynoszą one (*Informacje o systemie elektroenergetycznym*):

- od **220 kV do 400 kV** (tzw. najwyższe napięcia), w przypadku przesyłania na duże odległości
- **110 kV** (tzw. wysokie napięcie), w przypadku przesyłania na odległości nieprzekraczające kilkudziesięciu kilometrów
- od **10 kV do 30 kV** (tzw. średnie napięcia), stosowane w lokalnych liniach rozdzielczych.

Podnoszenie napięcia do celów przesyłu, a następnie obniżanie do poziomu, na którym możliwe jest stosowanie elektrycznych urządzeń powszechnego użytku

dostosowanych do napięcia 220/230 lub 380/400 V, wymaga korzystania z systemowych stacji elektroenergetycznych najwyższych napięć, wielu stacji rozdzielczych wysokiego napięcia oraz rozlicznych stacji transformatorowych, zamieniających średnie napięcie (rozdzielcze) na powszechnie stosowane w instalacjach odbiorczych (230/400 V). Wszystkie te obiekty – linie i stacje elektroenergetyczne – składają się na system elektroenergetyczny.

W Polsce istnieje jeden rozległy, krajowy system przesyłowy, zarządzany przez operatora systemu przesyłowego (OSP). Tworzą go połączone w struktury szeregowo-równoległe linie oraz stacje transformatorowo-rozdzielcze 220 kV i 400 kV, a także część linii 110 kV. Krajowy system przesyłowy umożliwia operatorowi realizację wielu ważnych funkcji w systemie elektroenergetycznym, w tym m.in. optymalne dysponowanie (na zasadach rynkowych) mocą jednostek wytwórczych dużych elektrowni, równoważenie bieżącego zapotrzebowania na energię elektryczną w kraju z dostawami tej energii, zarządzanie przepływami mocy w systemie przesyłowym, z uwzględnieniem technicznych ograniczeń w tym systemie, współpracę z innymi (zagranicznymi) operatorami systemów elektroenergetycznych itd. Zasady pracy krajowego systemu przesyłowego są ujęte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP), która ustala m.in. zasady: korzystania z sieci przez odbiorców i wytwórców, prowadzenia ruchu sieciowego i eksploatacji, planowania rozwoju i rozbudowy sieci, bilansowania systemu elektroenergetycznego i zarządzania ograniczeniami systemowymi.

Energia jest dostarczana do odbiorców układami rozdzielczymi za pośrednictwem sieci wysokiego napięcia (WN), średniego napięcia (SN) i niskiego napięcia (nN). W Polsce technicznym zarządzaniem układów rozdzielczych zajmują się spółki dystrybucyjne (SD), których łącznie jest obecnie siedem (sektor ten ulega dalszym przekształceniom własnościowym). Z układów rozdzielczych bezpośrednio zasilani są odbiorcy o różnej wielkości: wielcy (o mocy do kilkudziesięciu megawatów), średni (o mocy do ok. 5 MW) i drobni (o mocy do ok. 80 kW). Podstawowym zadaniem układów rozdzielczych jest ciągłe i bezpieczne dostarczanie odbiorcom energii elektrycznej o dobrych parametrach jakościowych napięcia (częstotliwość napięcia, wartość napięcia, symetria napięć w układach trójfazowych, kształt krzywej napięcia). Zasady pracy każdego systemu dystrybucyjnego reguluje stosowna Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, która zawiera m.in.: szczegółowe warunki korzystania z sieci przez jej użytkowników (odbiorców i wytwórców, innych operatorów itd.) oraz warunki i sposób prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci dystrybucyjnych.

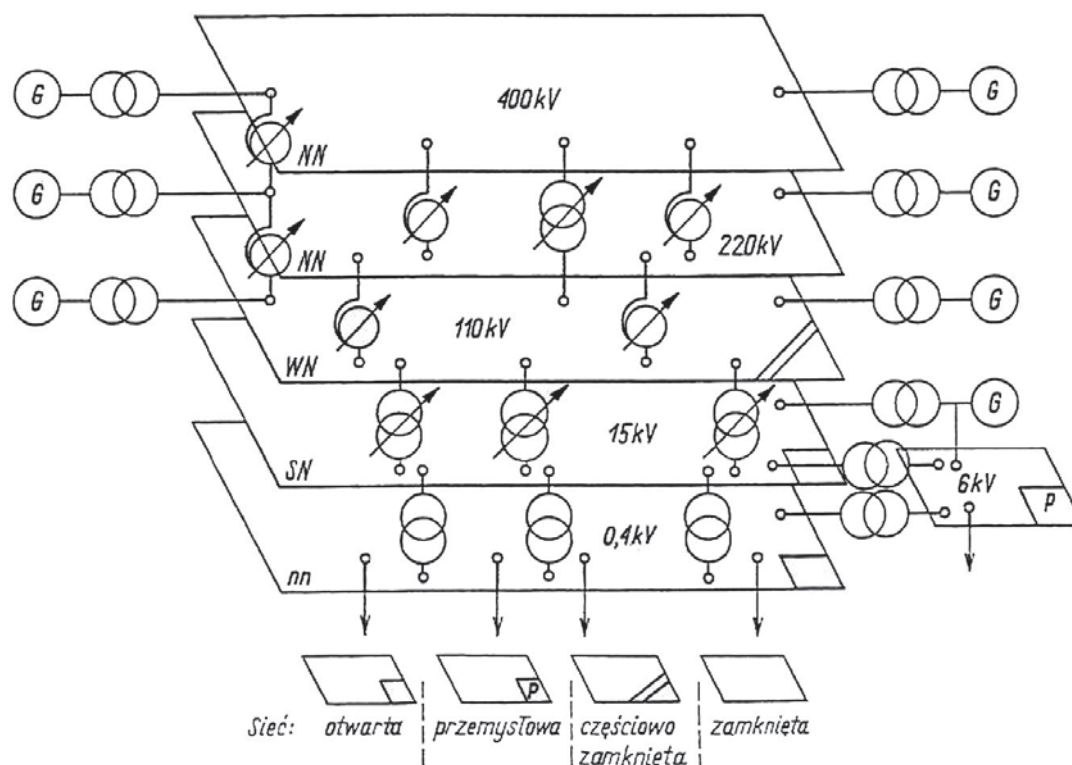
## 2.1.2. Rodzaje sieci elektroenergetycznych

Podstawowym zadaniem sieci elektroenergetycznych jest przesyłanie mocy i energii elektrycznej od źródeł wytwarzania do odbiorców.

Ze względu na pełnione funkcje, rozróżnia się dwa rodzaje sieci elektroenergetycznych.

1. *Sieci przesyłowe*, których elementami są linie i stacje elektroenergetyczne, łączące duże centra wytwarzania energii elektrycznej z centrami zapotrzebowania na tę energię oraz stanowiące połączenia międzyrejonowe lub międzysystemowe.

W krajowym systemie elektroenergetycznym (KSE), w początkowym okresie, rolę sieci przesyłowej odgrywały sieci o napięciu znamionowym 110 kV i 220 kV. W miarę rozbudowy sieci 220 kV, a następnie sieci 400 kV, sieci 110 kV stopniowo zmieniały swą funkcję od przesyłowej do rozdzielczej. Obecnie w KSE funkcję sieci przesyłowej pełnią w zasadzie sieci najwyższych napięć (NN): 220 kV i 400 kV. Połączenia międzysystemowe KSE z systemami sąsiednimi stanowią linie o napięciu znamionowym 220 kV i 400 kV.



Rys. 2-1. Struktura krajowego systemu elektroenergetycznego (Kujaszczyk, 1997)

2. *Sieci rozdzielcze*, których zadaniem jest doprowadzenie energii elektrycznej do odbiorców finalnych (przemysł, odbiorcy bytowo-komunalni). Są to sieci 110 kV,



średnich napięć (SN) i niskiego napięcia (nN). Sieci rozdzielcze są eksploatowane przez spółki dystrybucyjne.

Strukturę KSE przedstawiono na rysunku 2-1.

### 2.1.3. Zadania sieci przesyłowych

Do podstawowych zadań sieci przesyłowych należy zaliczyć (Kujaszczyk, 1997):

- przesyły systematyczne mocy i energii elektrycznej
- przesyły wyrównawcze mocy i energii elektrycznej (kompensacyjne)
- współpracę międzysystemową.

*Przesył systematyczny* polega na przesyłaniu dużych mocy z centrów wytwarzania do centrów odbioru. Przesył ten ma charakter jednokierunkowy. W procesie rozwoju systemu elektroenergetycznego poszukuje się lokalizacji elektrowni w pobliżu centrów odbiorczych. Jednak nie zawsze jest to możliwe i uzasadnione technicznie oraz ekonomicznie. W szczególności dotyczy to wykorzystywania do produkcji energii elektrycznej tanich źródeł energii pierwotnej, których nie można transportować (energia wodna) lub ich transport jest ekonomicznie nieuzasadniony (węgiel brunatny), zlokalizowanych w dużej odległości od centrów odbiorczych. Są to tzw. *lokalizacje wymuszone*. W celu wyprowadzenia mocy z elektrowni zlokalizowanych przy tych zasobach energii pierwotnej jedynym rozwiązaniem jest budowa układów przesyłowych najwyższych napięć prądu przemiennego lub prądu stałego.

Dotychczasowa praktyka w KSE potwierdza regułę, zgodnie z którą do danego napięcia znamionowego sieci przesyłowej powinny być przyłączone bloki o mocy znamionowej zawartej w przedziale:

$$P_{\text{nat}} \leq P_{GN} \leq P_{\text{ter}}$$

gdzie:

$P_{GN}$  – moc znamionowa bloku

$P_{\text{nat}}, P_{\text{ter}}$  – odpowiednio: moc naturalna i moc termiczna linii o danym napięciu znamionowym.

Przykładowo:

- graniczną mocą znamionową bloków przyłączonych do sieci 110 kV jest blok o  $P_{GN} = 200$  MW
- do sieci 220 kV z jednym przewodem na fazę powinny być przyłączone bloki o mocy znamionowej z przedziału 125 ÷ 360 MW, natomiast dla sieci 400 kV właściwy jest blok o mocy znamionowej  $P_{GN} \geq 400$  MW (w warunkach krajowych bloki o mocy znamionowej 360 MW i 500 MW są przyłączone do sieci 220 kV i 400 kV).

*Przesyły wyrównawcze* są wywołane z jednej strony niedyspozycyjnością urządzeń wytwórczych, z drugiej zaś ekonomicznym rozdziałem obciążeń między współpracujące generatory.

Przesyły wyrównawcze są realizowane poprzez układy przesyłowe, łączące między sobą elektrownie, oraz układy przesyłowe międzyrejonowe i międzysystemowe.

#### 2.1.4. Ogólna charakterystyka obecnego stanu sieci przesyłowych w Polsce

Podstawowym środkiem przesyłania mocy i energii elektrycznej są – i pozostaną w przyszłości – linie napowietrzne prądu przemiennego. Rola linii kablowych najwyższych napięć, ze względu na duże koszty w porównaniu z liniami napowietrznymi, ogranicza się do przesyłania energii elektrycznej na terenie dużych aglomeracji miejsko-przemysłowych, gdzie budowa linii napowietrznych jest niemożliwa ze względów technicznych i ochrony środowiska.

Polską sieć najwyższych napięć tworzy infrastruktura sieciowa, w której skład wchodzi (*Informacja o systemie elektroenergetycznym*):

- 241 linii o łącznej długości 13 338 km, w tym:
  - jedna linia o napięciu 750 kV, o długości 114 km
  - 73 linie o napięciu 400 kV, o łącznej długości 5 303 km
  - 167 linii o napięciu 220 kV, o łącznej długości 7 921 km
- 106 stacji najwyższych napięć (NN)
- podmorskie połączenie 450 kV DC Polska-Szwecja o całkowitej długości wynoszącej 254 km.

Linia 750 kV jest linią międzysystemową między systemem elektroenergetycznym Ukrainy i Polski (obecnie jest wyłączona). Łączna długość linii elektroenergetycznych o napięciu 110 kV wynosi ok. 33 000 km.

W polskim systemie elektroenergetycznym rolę sieci przesyłowej odgrywiają sieci o napięciu 220 kV i 400 kV. Pierwsza linia 220 kV została oddana do eksploatacji w 1952 r., a pierwsza linia 400 kV – w 1964 r.

Krajowa sieć przesyłowa jest siecią wielokrotnie zamkniętą. Spełnia ona w zasadzie kryterium niezawodnościowe zgodnie z regułą  $(n - 1)$  w zakresie wyrowadzenia mocy z podstawowych elektrowni oraz zasilania węzłów redukcyjnych 400/110 kV, 220/110 kV. Sieć przesyłowa spełnia kryterium niezawodnościowe zgodnie ze wspomnianą regułą, jeśli w stanie wyjściowym wytrzymuje awaryjne wyłączenie jednego z jej elementów (linii, transformatora, sekcji szyn zbiorczych) bez niedopuszczalnych ograniczeń dotyczących jej funkcji. Oznacza to, że pozostałe w ruchu elementy sieci nie mogą być obciążone ponad granice ustalone jako dopuszczalne i nie może dojść do rozszerzenia się zakłócenia.



Linie 220 kV i 400 kV są budowane jako jedno- lub dwutorowe, przy czym linie 220 kV mają jeden przewód na fazę, natomiast 400 kV – dwa przewody na fazę.

W krajowych sieciach elektroenergetycznych występują różne rodzaje transformatorów. Transformatory blokowe i transformatory potrzeb własnych współpracują z generatorami w elektrowniach. Transformatory lub autotransformatory sprzęgające łączą sieci przesyłowe o różnych poziomach napięcia (400 kV, 220 kV) z sieciami przesyłowo-rozdzielczymi 110 kV. Transformatory redukcyjne łączą sieci WN (110 kV) z sieciami rozdzielczymi SN oraz sieci SN z sieciami nN.

Transformatory stosowane w sieciach wysokich i najwyższych napięć są zwykle budowane jako trójfazowe jednostki napowietrzne (przy bardzo dużych mocach stosuje się niekiedy zestaw trzech jednostek jednofazowych). Ze względu na niższy koszt i mniejsze gabaryty w stacjach elektroenergetycznych powszechnie stosuje się autotransformatory NN/NN i NN/WN. Uzwojenia transformatorów i autotransformatorów najwyższych napięć są połączone w gwiazdę, a punkt neutralny jest z reguły uziemiony. Dodatkowe uzwojenie pomocnicze, połączone w trójkąt, stanowi zasilanie potrzeb własnych stacji oraz służy do przyłączenia urządzeń kompensacyjnych (baterii kondensatorów lub dławików). Napięcia znamionowe transformatorów i autotransformatorów są o kilka procent wyższe od napięć znamionowych sieci i w celu maksymalizacji sprawności transformacji są tak dobrane, aby ich wartość była zbliżona do wartości maksymalnych napięć roboczych sprzęganych sieci. W sieciach NN i WN krajowego systemu elektroenergetycznego stosowane są jednostki o następujących mocach znamionowych (Żmuda, 2012):

- 500, 400, 330 MV·A dla transformacji 400/220 kV (obecnie w Bełchatowie pracuje nowy blok o mocy ponad 800 MV·A)
- 330, 250 MV·A dla transformacji 400/110 kV
- 160 MV·A dla transformacji 220/110 kV.

Obecnie w planach PSE-Operator S.A. przewiduje się stosowanie jednostek o jeszcze większych mocach.

## **2.2. Budowa układów przesyłowych**

### **2.2.1. Linie napowietrzne**

Elektroenergetyczne linie napowietrzne są ważnym elementem układu przesyłowego. Łączą bowiem źródła wytwarzania lub przetwarzania energii elektrycznej

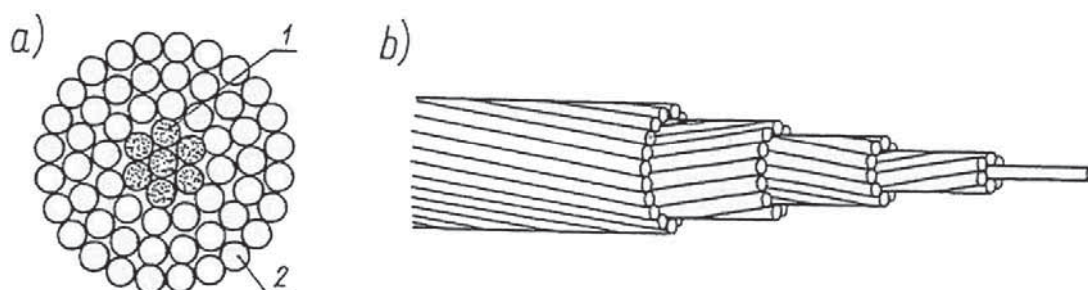
z centrami jej odbioru. Linie napowietrzne stanowią zdecydowaną większość wśród istniejących linii przesyłowych. Linie te – poprowadzone przez rozległe tereny – są narażone na działanie wielu różnorodnych czynników klimatycznych, topograficznych i środowiskowych, których znajomość oraz właściwe uwzględnienie podczas projektowania, budowy i eksploatacji linii ma podstawowe znaczenie dla prawidłowej pracy całego układu.

W liniach napowietrznych izolację stanowi powietrze atmosferyczne. Podstawowymi elementami linii tego typu są: przewody fazowe, przewody odgromowe, konstrukcje wsporcze, izolatory, osprzęt i uziomy słupów.

### Przewody linii napowietrznych

Materiały, z których wykonuje się przewody linii napowietrznych powinny mieć odpowiednie właściwości, tzn. dużą konduktywność, odporność na działanie atmosferyczne i chemiczne, odporność na drgania, dużą wytrzymałość mechaniczną. Najlepiej wymagania te spełnia miedź. Jednak ze względu na jej deficyt i wysoką cenę jest stosowana rzadko. Została zastąpiona przez aluminium, które ma mniejszą konduktywność i mniejszy ciężar właściwy. Mimo konieczności stosowania większych przekrojów, ciężar przewodu aluminiowego jest około dwóch razy mniejszy niż ciężar równoważnego – o takiej samej rezystancji jednostkowej – przewodu miedzianego. Ze względu na stosunkowo małą wytrzymałość mechaniczną przewodów aluminiowych obecnie w liniach przesyłowych stosuje się prawie wyłącznie *przewody stalowo-aluminiowe* (rys. 2-2). Są to linki (przewody wielodrutowe), w których rdzeń stalowy przenosi obciążenia mechaniczne, prąd zaś jest przewodzony głównie przez oplot aluminiowy.

Linki stalowo-aluminiowe mają następujące przekroje znamionowe: 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 350, 400, 525 mm<sup>2</sup>. Budowa przewodów i ich przekroje są znormalizowane. Takie linki oznacza się symbolem AFL.



**Rys. 2-2.** Budowa linki stalowo-aluminiowej AFL-8 525 (Kujarczyk, 1997):  
a) przekrój poprzeczny; b) widok ogólny; 1 – drut stalowy, 2 – drut aluminiowy

Na rysunku 2-2 pokazano przykładową budowę linki stalowo-aluminiowej AFL-8 525. Linka ta składa się z rdzenia stalowego wykonanego z siedmiu drutów stalowych oraz z opłotu aluminiowego utworzonego z trzech warstw drutów aluminiowych (12+18+24) o średnicy znamionowej  $3 \div 5$  mm. Średnica obliczeniowa przewodu wynosi 31,5 mm.

W liniach wysokich napięć 220 kV i 400 kV są stosowane *przewody wiązkowe*. Przewód wiązkowy, tworzący jedną fazę linii, składa się z dwóch linek utrzymywanych w stałej odległości od siebie za pomocą tzw. *odstępników*. Przewody wiązkowe, w porównaniu z pojedynczym przewodem o przekroju takim samym jak łączny przekrój przewodów składowych wiązki, mają następujące podstawowe zalety:

- mniejsze natężenie pola elektrycznego wokół przewodu, dzięki czemu wzrasta napięcie krytyczne ulotu
- mniejszą indukcyjność i większą pojemność, co powoduje zmniejszenie strat napięcia
- możliwość zwiększenia obciążalności linii ze względu na lepsze warunki chłodzenia.

Przewody robocze linii przesyłowych chroni się przed bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi za pomocą *przewodów odgromowych*. Przewody te pełnią funkcję piorunochronu (zwód poziomy) w stosunku do przewodów fazowych i uniemożliwiają bezpośrednie uderzenie pioruna w przewód roboczy, zmniejszając wydatnie przepięcia atmosferyczne. Przewód odgromowy uziemia się na każdym słupie. Takie przewody wykonuje się na ogół, podobnie jak przewody robocze, z linki AFL. W rozwiązaniach specjalnych stosuje się przewody odgromowe z wbudowanym światłowodem, umożliwiające ich wykorzystanie do celów teletransmisyjnych.

Dobór przekroju przewodów linii polega na przeprowadzeniu obliczeń techniczno-ekonomicznych i wyborze takiego rozwiązania, w którym dana moc mogłaby być przesyłana przy najmniejszych kosztach. W obliczeniach należy uwzględnić zarówno koszty inwestycji, jak i eksploatacji. Podstawowe kryteria techniczne, które muszą być uwzględnione w procesie doboru przekroju przewodów linii, to: dopuszczalna obciążalność prądowa długotrwała, dopuszczalna obciążalność prądowa zwarciowa, wytrzymałość mechaniczna, ograniczenie zjawiska ulotu oraz wymagania unifikacji rozwiązań linii.

Panuje powszechna tendencja do ujednolicania i ograniczania liczby stosowanych przekrojów przewodów. Przewody stosowane obecnie w typowych rozwiązaniach linii napowietrznych wysokich napięć podano w tabeli 2-1.

Obciążalność prądową polskich linii napowietrznych 110 ÷ 400 kV podano w tabeli 2-2.

Parametry przewodów stalowo-aluminiowych linii napowietrznych 110 ÷ 400 kV przedstawiono w tabeli 2-3.

**Tabela 2-1.** Przewody stosowane w typowych krajowych rozwiązaniach napowietrznych linii przesyłowych (Witek, 2011)

Napięcie linii, kV	Przewody robocze		Przewody odgromowe	
	typ	przekrój, mm <sup>2</sup>	typ	przekrój, mm <sup>2</sup>
110	AFL-6	120, 185, 240	AFL-6	120, 185, 240
110	AFL-8	525	AFL-1,7	50, 70, 95
220	AFL-8	525	AFL-1,7	70
220	AFL-8	525	AFL-6	120
400	AFL-8	525	AFL-1,7	70
750	AFL-8	525	AFL-1,7	70

**Tabela 2-2.** Obciążalność prądowa polskich linii 110 ÷ 400 kV (w A) dla wybranych przedziałów temperatury otoczenia, w zależności od temperatury granicznej roboczej przewodów w linii (Żmuda, 2012)

Typ i przekrój przewodów roboczych	Temperatura graniczna robocza linii	Przedział temperatury otoczenia	
		0 ÷ 10 °C („zima”)	20 ÷ 25 °C („lato”)
AFL-8,525	40 °C	810	600
	50 °C	930	750
	60 °C	1 040	880
	80 °C	1 240	1 090
AFL-4,350	40 °C	630	470
	50 °C	730	590
	60 °C	810	690
	80 °C	970	850
AFL-6,240	40 °C	495	340
	60 °C	625	510
	80 °C	735	640
AFL-6,185	40 °C	415	295
	60 °C	525	430
	80 °C	615	535
AFL-8,120	40 °C	310	210
	60 °C	390	320
	80 °C	460	400

**Tabela 2-3.** Parametry przewodów stalowo-aluminiowych (AFL) gołych (Żmuda, 2012)

Rodzaj przewodu	Przekrój znamionowy części aluminiowej mm <sup>2</sup>	Przekrój obliczeniowy mm <sup>2</sup>			Obliczeniowa siła zrywająca przewód N	Średnica obliczeniowa przewodu mm <sup>2</sup>	Obliczeniowa rezystancja 1 km przewodu w temp. 20 °C Ω/km
		rdzenia	części aluminiowej	całego przewodu			
AFL-8	350	46,24	356,7	402,9	112 210	26,10	0,0821
	525	67,35	519,5	586,9	158 279	31,50	0,0564
AFL-6	120	20,91	122,6	143,5	44 542	15,65	0,2388
	185	31,67	183,8	215,5	65 714	17,20	0,1593
	240	40,08	236,1	276,2	82 798	21,70	0,1240

### Konstrukcje wsporcze

Przewody linii napowietrznych są zawieszane na odpowiednio zaprojektowanych konstrukcjach wsporczych. Samoistne konstrukcje wsporcze, osadzone w gruncie – bezpośrednio lub pośrednio za pomocą fundamentów – nazywa się *słupami*. Ze względu na przeznaczenie i rodzaj pracy w linii słupy dzielą się na przelotowe, narożne, odporowe, odporowo-narożne, krańcowe i rozgałęźne (*Poradnik inżyniera elektryka*, 2011).

*Słup przelotowy* jest przeznaczony do podtrzymywania przewodów bez przejmowania naciągu lub z przejęciem nieznacznego naciągu i jest ustawiony na szlaku prostym lub na załomie wynikającym z jego wytrzymałości, jednak nieprzekraczającym 5°.

*Słup narożny* jest przeznaczony do podtrzymywania przewodów i przejmowania wypadkowej naciągu wynikającej z kąta załomu, na którym jest ustawiony.

*Słup odporowy* jest przeznaczony do przejmowania naciągu, jest ustawiony na szlaku prostym lub na załomie nieprzekraczającym 5° i stanowi punkt oporowy dla umiejscowienia zakłóceń mechanicznych.

*Słup odporowo-narożny* jest przeznaczony do przejmowania naciągu i spełnia funkcje słupa odporowego oraz narożnego.

*Słup krańcowy* jest przeznaczony do przejmowania jednostronnego naciągu przewodów i jest ustawiony na zakończeniu linii.

*Słup rozgałęźny* jest ustawiony w punkcie rozgałęzienia linii i – w zależności od spełnianej funkcji – łączy cechy różnych rodzajów słupów, np. słup rozgałęźny przelotowo-krańcowy jest dla linii głównej słupem przelotowym, a dla odgałęzienia – krańcowym.

Słup skrzyżowaniowy jest obliczany ze zwiększonym bezpieczeństwem, zgodnie z odpowiednimi postanowieniami normy odnoszących się do skrzyżowań linii z różnymi obiektami.

Obecnie linie napowietrzne projektuje się jedynie na podstawie typowych opracowań. O wyborze właściwej serii słupów decydują: napięcie linii, liczba torów, przekrój przewodów, rodzaj i zagospodarowanie terenu, nośność gruntu. W liniach o napięciu 110 kV i wyższym stosuje się słupy stalowe oraz rurowe.

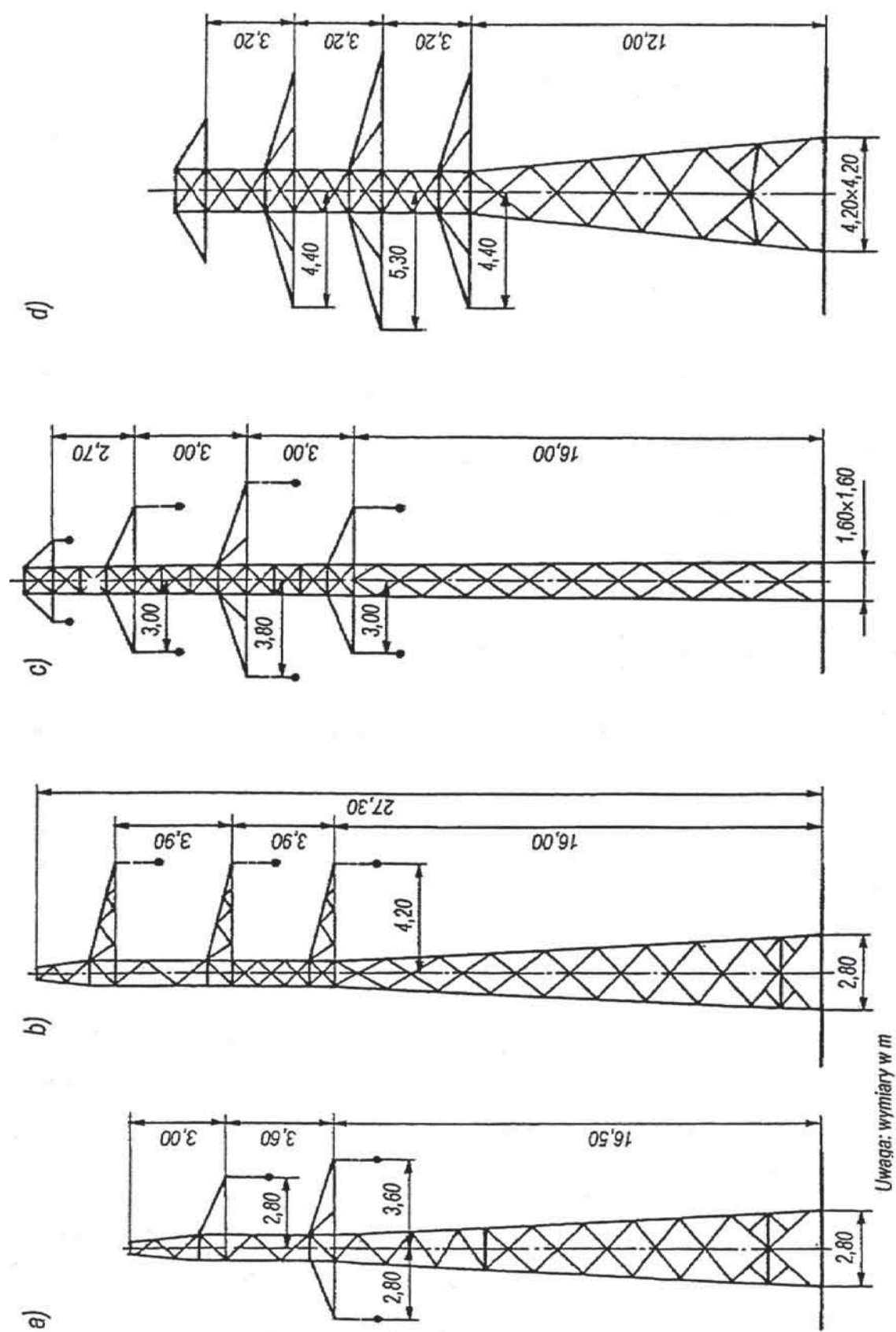
Typowe serie słupów linii wysokich napięć scharakteryzowano w tabeli 2-4.

**Tabela 2-4.** Typowe serie słupów krajowych napowietrznych linii przesyłowych (*Poradnik inżyniera elektryka, 2011*)

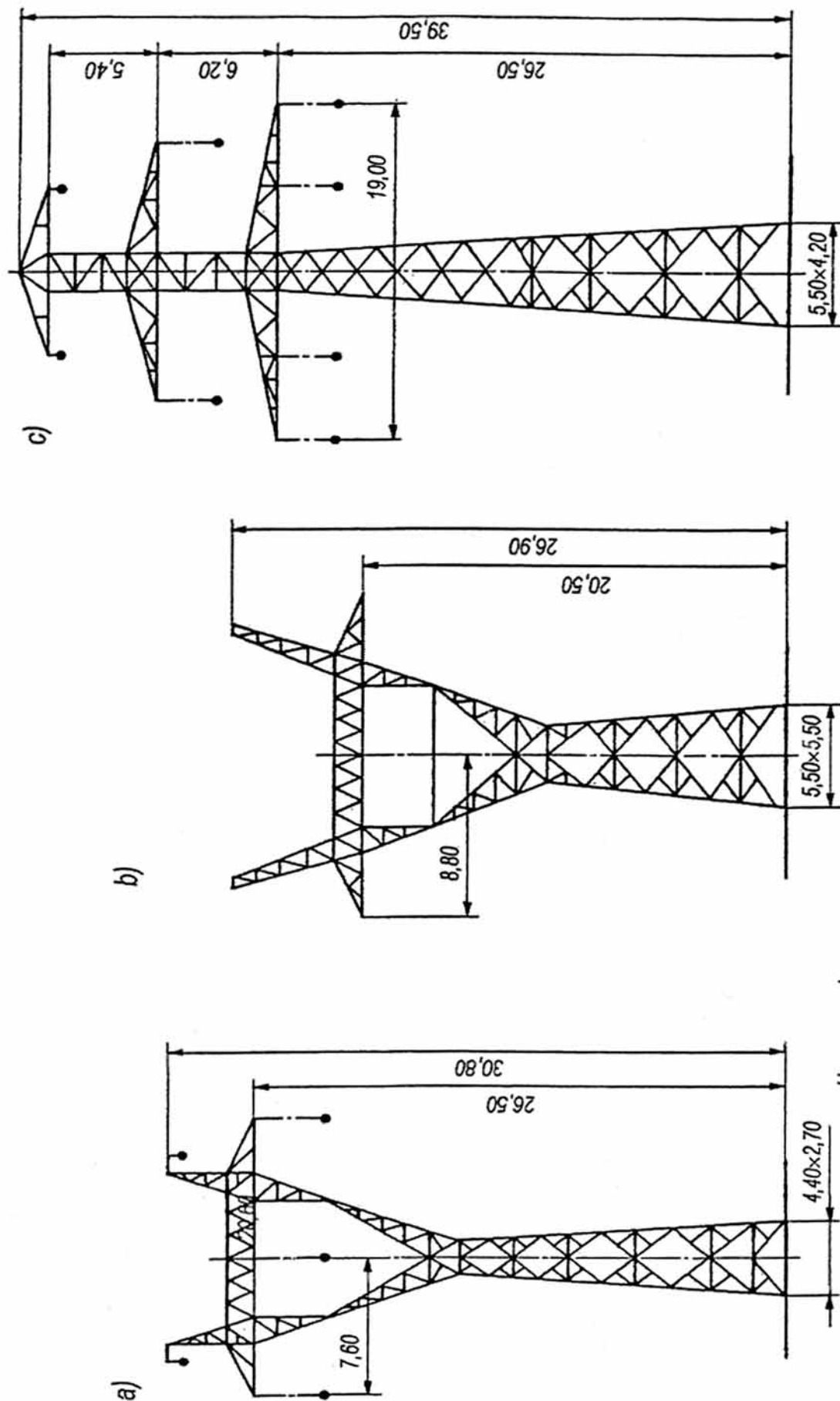
Napięcie znamionowe linii, kV	Seria słupów	Przewody robocze	Przewody odgromowe	Przęsło nominalne m
110	B2 SW24	3 × AFL-6 240 mm <sup>2</sup>	1 × AFL-1,7 70 mm <sup>2</sup>	350
			1 × AFL-6 120 mm <sup>2</sup>	350
	S52 SW52	3 × AFL-8 525 mm <sup>2</sup>	1 × AFL-6 240 mm <sup>2</sup>	370
				320
	OS24 O24	6 × AFL-6 240 mm <sup>2</sup>	2 × AFL-1,7 50 mm <sup>2</sup>	300
				260
220	H52	3 × AFL-8	2 × AFL-1,7 70 mm <sup>2</sup>	450
	HL52	525 mm <sup>2</sup>		310
	M52	6 × AFL-8		450
	ML52	525 mm <sup>2</sup>		
400	Y52	3 × 2 × AFL-8 525 mm <sup>2</sup>	2 × AFL-1,7 70 mm <sup>2</sup>	450
	Z52	6 × 2 × AFL-8 525 mm <sup>2</sup>		

Na rysunkach 2-3, 2-4 i 2-5 przedstawiono sylwetki przykładowych konstrukcji słupów stalowych stosowanych w Polsce.



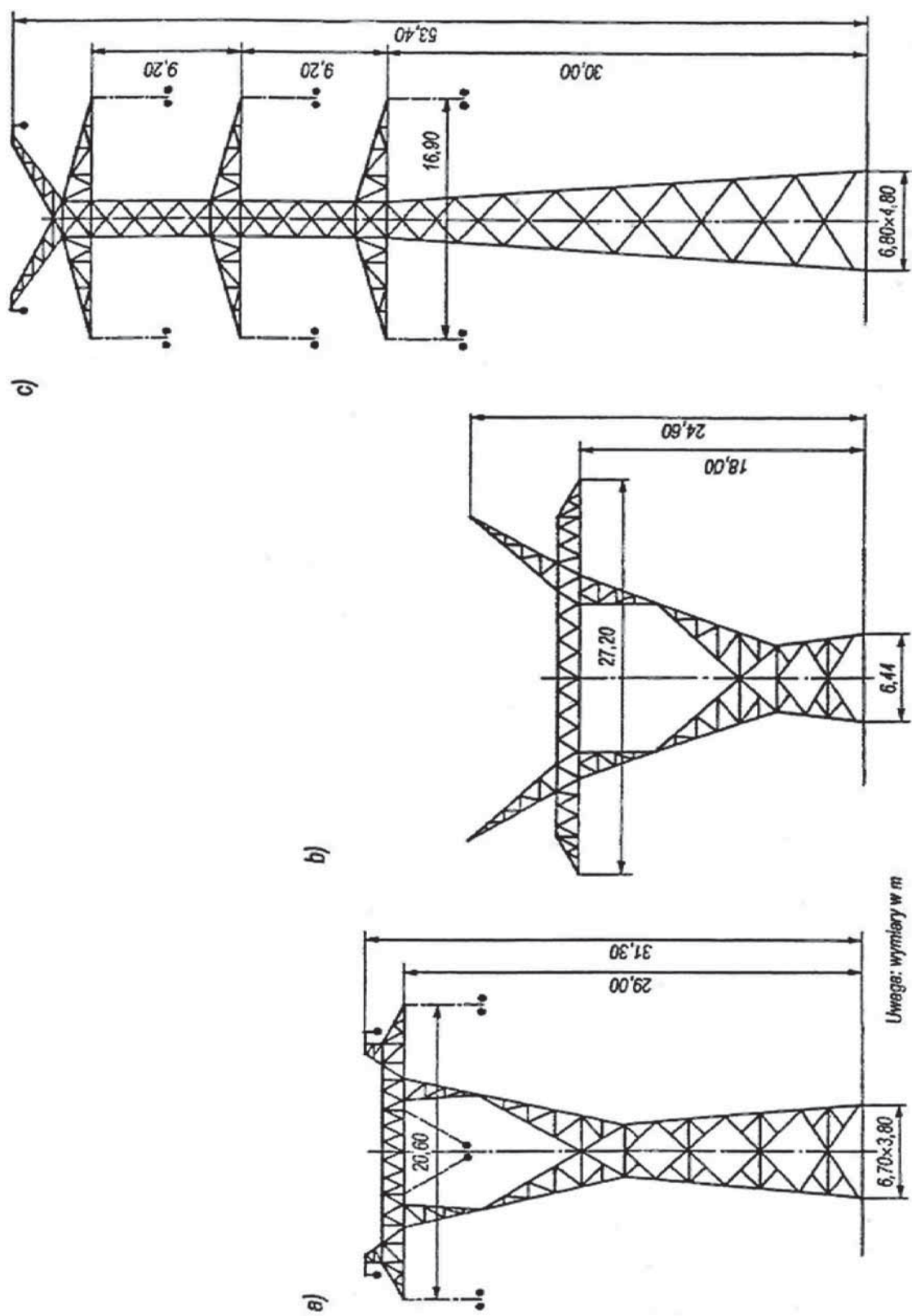


**Rys. 2-3.** Typowe sylwetki słupów stosowanych w sieciach 110 kV: a) słup przelotowy serii B2, b) słup przelotowy, leśny serii B2, c) słup przelotowy serii O24, d) słup odporowo-narozny serii OS24 (*Poradnik inżyniera elektryka*, 2011)



Rys. 2-4. Typowe sylwetki słupów stosowanych w sieciach 220 kV: a) słup przelotowy serii H52, b) słup odporowo-narozny serii H52, c) słup przelotowy serii M52 (Poradnik inżyniera elektryka, 2011)





**Rys. 2-5.** Typowe sylwetki słupów stosowanych w sieciach 400 kV: a) słup przelotowy serii Y52, b) słup odporowo-narozny serii Y52, c) słup przelotowy serii Z52 (Poradnik inżyniera elektryka, 2011)

### 2.2.2. Linie kablowe

W krajowych sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia spotyka się linie kablowe na napięcie 110 kV (ok. 105 km), (*Informacje o systemie elektroenergetycznym*) i linię kablową prądu stałego na napięcie 450 kV.

Linie kablowe 110 kV są wykonywane rzadko i wyłącznie wtedy, kiedy budowa linii napowietrznej jest technicznie niemożliwa. Dotyczy to w szczególności rozwiązań zasilania stacji 110 kV/SN, zlokalizowanych w centrach miast, gdzie wprowadzenie linii napowietrznej ze względu na istniejącą, gęstą zabudowę jest praktycznie niemożliwe. Linie kablowe są znacznie droższe od napowietrznych i ponoszenie znacznych nakładów inwestycyjnych na ich budowę wpływa w konsekwencji na wzrost ceny energii elektrycznej u odbiorcy.

Linia kablowa prądu stałego na napięcie 450 kV jest układem przesyłowym pomiędzy Polską i Szwecją, składającym się z (*Informacje o systemie elektroenergetycznym*):

- jednożyłowego kabla podmorskiego i lądowego z żyłą miedzianą o przekroju  $2 \cdot 100 \text{ mm}^2$ , dostosowanego do przesyłania prądu stałego o wartości 1 330 A
- kabla powrotnego na napięcie znamionowe 20 kV (w części lądowej jednożyłowego o przekroju żyły miedzianej  $1 \cdot 100 \text{ mm}^2$ , a w części morskiej dwóch kabli o przekrojach żył miedzianych  $630 \text{ mm}^2$ )
- dwóch stacji przekształtnikowych na obu końcach linii kablowej prądu stałego.

Długość linii wynosi ponad 254 km.

W sieciach 110 kV są obecnie stosowane kable z polietylenu usieciowanego zastępujące kable olejowe.

Przekrój żył roboczych w kablach jest dobierany stosownie do dopuszczalnego obciążenia prądowego. W warunkach krajowych kable 110 kV są wykonywane jako jednożyłowe o izolacji:

- papierowej, nasyconej olejem izolacyjnym, z wewnętrznym przepływem oleju pod niewielkim ciśnieniem (starsze inwestycje)
- z polietylenu usieciowanego (kable krajowe i importowane).

Kable z polietylenu usieciowanego stosowane w kraju mają przekroje: 185, 240, 300, 400, 500, 630 i  $800 \text{ mm}^2$ .

### 2.2.3. Stacje elektroenergetyczne

#### Podstawowe elementy stacji

Stacja elektroenergetyczna pełni funkcję węzła sieci elektroenergetycznej przy rozdziale energii elektrycznej lub zbioru węzłów sieci w sytuacji transformacji i rozdzielania energii elektrycznej.

W każdej stacji wyróżnia się składniki główne (zespoły elementów) charakteryzujące się określonym przeznaczeniem. Najważniejsze z nich to (Dołęga, 2007):

- szyny zbiorcze
- pola rozdzielni
- stanowiska transformatorów (transformatornie)
- stanowiska przekształtników
- pomieszczenia urządzeń pomocniczych
- nastawnie (sterownie).

*Szyny zbiorcze* są miejscem połączenia linii oraz transformatorów i tworzą w ten sposób węzeł sieciowy. W zależności od wielkości stacji, liczby linii i transformatorów oraz roli stacji w systemie elektroenergetycznym systemy szyn zbiorczych mogą być ukształtowane w różnorodny sposób. Są stosowane układy z pojedynczym, podwójnym, a nawet potrójnym systemem szyn. Poszczególne fragmenty szyn mogą być podzielone na sekcje. Są również realizowane rozwiązania bezszynowe.

Do szyn zbiorczych są przyłączone *pola rozdzielni*. Pole rozdzielni składa się z toru prądowego oraz wyposażenia toru w urządzenia główne i pomocnicze wraz z konstrukcjami wsporczymi oraz przegrodami. Rozróżnia się podstawowe typy pól rozdzielni:

- liniowe (napowietrzne lub kablowe)
- transformatorowe
- łącznika szyn (sekcyjne i systemowe).

Pola te biorą udział w transformacji i rozdziale energii elektrycznej.

W rozdzielni wyróżnia się także pola niezawierające elementów głównego toru prądowego. Do tej grupy zalicza się pola:

- pomiarowe
- potrzeb własnych
- odgromowe
- uziemiające szyn.

*Stanowiska transformatorów* są to miejsca usytuowania transformatorów wraz z układami awaryjnego odprowadzenia czynnika izolacyjnego oraz układami i instalacjami pomocniczymi, jak np. instalacja automatycznego zraszania transformatora.

*Pomieszczenia urządzeń pomocniczych* to miejsca usytuowania akumulatorni i rozdzielni potrzeb własnych operacyjnego prądu stałego oraz pomocniczego napięcia przemiennego, sprężarek, zbiorników z powietrzem lub gazem izolacyjnym itp.

Bezpośrednio z urządzeniami pola, zlokalizowanymi w rozdzielni, są związane *układy sterowania i nadzoru* urządzeń pola oraz współpracujących linii i transformatorów.

W stacjach elektroenergetycznych występują różne grupy urządzeń, takie jak: transformatory, szyny zbiorcze, łączniki, przekładniki, urządzenia ochrony napięciowej, urządzenia telefonii energetycznej nośnej (TEN), urządzenia do ograniczania mocy i prądów zwarciovych, izolatory.

Łączniki stanowią najliczniejszą i najbardziej zróżnicowaną grupę aparatów występujących w stacjach elektroenergetycznych. Należą do nich: wyłączniki, odłączniki, rozłączniki, uziemniki, bezpieczniki i zwierniki.

W stacjach elektroenergetycznych powszechnie występują przekładniki prądowe, przekładniki napięciowe i przekładniki kombinowane.

Do ochrony przeciwprzepięciowej wykorzystuje się tam ograniczniki przepięć, odgromniki i iskierniki.

Urządzenia TEN stosuje się w stacjach 110 kV, 220 kV i 400 kV.

Do ograniczenia mocy i prądów zwarciovych najczęściej wykorzystuje się dławiki zwarciove.

## **Struktury i konfiguracje stacji**

Zespół urządzeń stacji elektroenergetycznej można podzielić na grupy urządzeń głównych i pomocniczych. Do najważniejszych elementów obwodów głównych zalicza się: szyny zbiorcze, transformatory, łączniki, przekładniki, ograniczniki przepięć (odgromniki), dławiki i inne. Struktura połączeń elektrycznych poszczególnych elementów tworzy *układ stacji*. Układ połączeń elektrycznych stacji powinien być ustalony po określeniu jej zadań w systemie, sposobu zasilania i lokalizacji. Układy połączeń stacji mogą być klasyfikowane na podstawie różnych kryteriów podziału. Najbardziej istotny jest podział ze względu na sposób rozwiązania połączeń między liniami przyłączonymi do stacji i występującymi w niej transformatorami.

Struktura połączeń poszczególnych pól rozdzielni zależy zarówno od rozwiązania układu szyn zbiorczych, jak i przeznaczenia pola.

### **Pojedynczy system szyn zbiorczych**

Pojedynczy system szyn zbiorczych jest stosowany w rozdzielniach 110 kV i 220 kV, niebędących ważnymi ogniwami systemu elektroenergetycznego.

Rozwiązanie to jest proste, lecz wymaga odstawienia całych szyn zbiorczych w razie uszkodzenia szyn lub prac wymagających zbliżenia się do nich. Często w celu poprawy elastyczności pracy stacji dokonuje się podziału szyn zbiorczych (sekcjonowania) przez zainstalowanie odłącznika (rys. 2-6a). Natomiast, gdy przewiduje się pracę z trwałym podziałem szyn i możliwość rezerwy ukrytej (zasilania rezerwowego z drugiej sekcji szyn zbiorczych), wówczas stosuje się wyłączniki sekcjonujące szyny rozdzielni.

Szyny zbiorcze są prostym i niezawodnym elementem stacji. Urządzeniami wymagającymi stosunkowo częstych zabiegów konserwacyjnych są łączniki, a w szczególności wyłączniki. Układ z rysunku 2-6a nie zapewnia możliwości przeprowadzania napraw i przeglądów wyłączników czy też przekładników prądowych lub napięciowych w polu linii lub transformatora, bez konieczności odstawienia z pracy tej linii czy transformatora.

Rozbudowa układu o *szynę pomocniczą* (rys. 2-6a), połączoną polem sprzęgającym z szyną podstawową, umożliwi odstawienie z pracy każdego z pól rozdzielni, w celu przeprowadzenia konserwacji lub naprawy przez zastosowanie szyny pomocniczej oraz pola sprzęgającego. Niedogodnością rozdzielni z pojedynczym systemem szyn zbiorczych jest występowanie przerw w zasilaniu w przypadku uszkodzenia zarówno szyn zbiorczych, jak i urządzeń bezpośrednio przyłączonych do szyn – głównie odłączników. Sekcjonowanie szyn zbiorczych ogranicza wprawdzie występowanie przerw do liczby odbiorów zasilanych z uszkodzonej sekcji, lecz nie eliminuje wady układu.

### **Podwójny i potrójny system szyn zbiorczych**

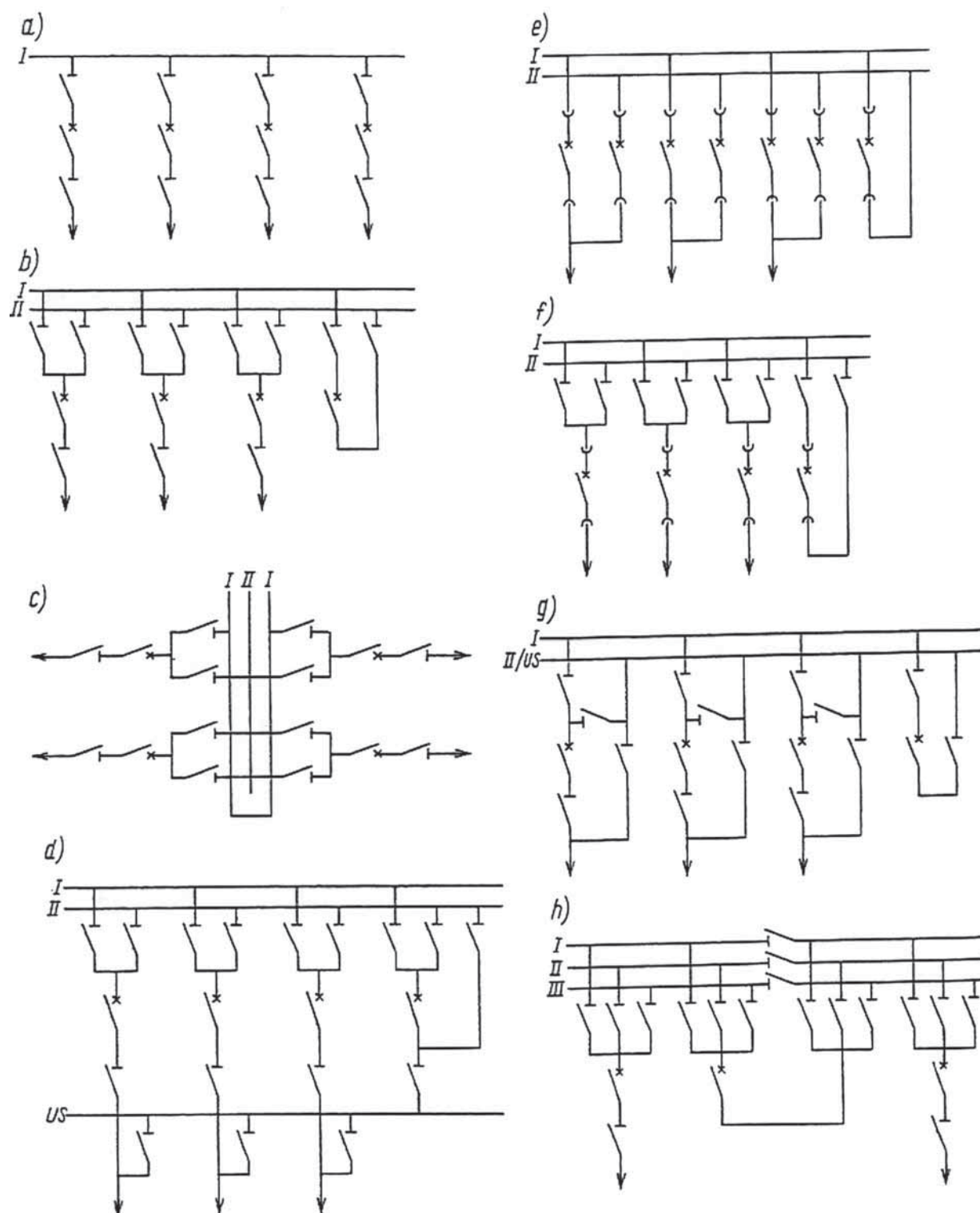
W rozdzielniach z *podwójnym systemem szyn* występuje połączenie każdego pola z dwoma systemami za pomocą odłączników (rys. 2-6b, f). Ponadto systemy szyn zbiorczych są połączone ze sobą za pomocą wyłącznika systemowego (sprzęgłowego), (rys. 2-6e, f i rys. 2-6a÷e). Układy z podwójnym systemem szyn zbiorczych są stosowane w stacjach wymagających dużej niezawodności zasilania.

Możliwości ruchowe układu z podwójnym systemem szyn zbiorczych zwiększają się dzięki zastosowaniu sekcjonowania co najmniej jednego systemu za pomocą odłącznika lub wyłącznika. System niesekcjonowany odgrywa zwykle rolę systemu rezerwowego. Sekcjonowanie systemu umożliwia realizację wielu połączeń, lecz jeszcze bardziej komplikuje obsługę rozdzielni i stwarza możliwość powstania zakłóceń spowodowanych błędami w realizacji czynności łączeniowych.

Odmianą podwójnego systemu szyn zbiorczych jest tzw. *układ U* (rys. 2-6c). Umożliwia on zastosowanie jednej podziałki (przestrzeni pola) szyn zbiorczych do wyprowadzenia linii w dwóch przeciwnych kierunkach. Układ ten jest stosowany



w rozdzielniach 110 kV i 220 kV o dużej liczbie linii i ograniczonym terenie przeznaczonym na rozdzielnię. Wadą układu  $U$  jest utrudniony dostęp do wewnętrznego systemu szyn zbiorczych podczas pracy systemu zewnętrznego.



**Rys. 2-6.** Układy połączeń rozdzielni (Dołęga, 2007): a) pojedynczy system szyn zbiorczych; b), f) podwójny system szyn zbiorczych; c) układ  $U$ ; d) podwójny system szyn zbiorczych z szyną pomocniczą  $US$ ; e) podwójny system szyn zbiorczych w układzie dwuwycłaznikowym; g) pojedynczy system szyn zbiorczych z szyną pomocniczą  $US$ , h) potrójny system szyn zbiorczych

Kolejnym sposobem zwiększenia elastyczności ruchowej i eksploatacyjnej jest stosowanie układu z *potrójnym systemem szyn zbiorczych* (rys. 2-6h). Dwa systemy są wykorzystywane jako robocze, trzeci jako rezerwowy. Rozdzielnie trójsystemowe są mniej zawodne w porównaniu z dwusystemowymi, jednak korzyści z ich stosowania są niewielkie. Do wad tych rozwiązań należy jeszcze większa złożoność przełączeń i możliwość dokonania błędnych manipulacji. Układ jest stosowany zarówno w dużych rozdzielniach należących do elektrowni, jak i w strefach dużego zabrudzenia. Obecnie rozwiązania z potrójnym układem szyn zbiorczych są stosowane bardzo rzadko w rozdzielniach 220 kV i 400 kV.

W rozdzielniach o szczególnie dużych wymaganiach niezawodnościowych korzystano z rozwiązań z podwójnym systemem szyn zbiorczych oraz z wyposażeniem w dwa wyłączniki w jednym polu rozdzielni. Było to rozwiązanie z jawną rezerwą wyłącznikową w każdym polu (rys. 2-6e).

### **Rozwiązania konstrukcyjne stacji – wymagania ogólne**

Pod względem konstrukcyjnym stacje elektroenergetyczne wysokich napięć dzieli się na wewnętrzne i napowietrzne.

Stacje wewnętrzne można podzielić na: stacje osłonięte z izolacją powietrzną i stacje hermetyzowane z izolacją gazową SF<sub>6</sub>.

Stacje hermetyzowane wykonuje się powszechnie jako wewnętrzne z racji bardzo dużych kosztów przystosowania urządzeń obwodu głównego i układów sterowniczych do warunków napowietrznych. Taka stacja może być usytuowana w specjalnie do tego celu wybudowanej lekkiej hali.

Stacje napowietrzne są realizowane na podstawie dwóch układów (Dołęga, 2007):

- średniowysokie, w których aparatura łączeniowa jest umieszczona na wysokości nie mniejszej niż 3 m, a pozostałe urządzenia są nisko za ogrodzeniami
- wysokie, w których odłączniki są umieszczone na wysokości 8 ÷ 10 m, a pozostała aparatura jest instalowana w układach pionowych jedna nad drugą.

Rozdzielnie średniowysokie buduje się w ten sposób, że urządzenia są rozmieszczane na konstrukcjach tak, aby personel obsługi mógł poruszać się bezpiecznie na terenie stacji – z zachowaniem dopuszczalnych odległości od części urządzeń znajdujących się pod napięciem.

Rozdzielnie wysokie zajmują znacznie mniej miejsca w porównaniu z analogicznym układem średniowysokim, ale są znacznie droższe.

W Polsce spotyka się przede wszystkim rozwiązania średniowysokie rozdzielni napowietrznych. Sporadycznie spotykane są rozwiązania wysokie, wymuszone

głównie względami technicznymi wynikającymi z ograniczenia wielkości terenu przeznaczonego na budowę stacji elektroenergetycznej.

Do charakterystycznych cech stacji napowietrznych należą (Dołęga, 2007):

- brak budynku dla aparatury rozdzielczej
- łatwość budowy i rozbudowy
- stosunkowo krótki czas budowy
- przejrzystość układu stacji
- zależność warunków eksploatacji od warunków zewnętrznych
- zajmowanie dużego terenu
- konieczność stosowania rozbudowanej ochrony odgromowej.

Stacje w wykonaniu wewnętrznym na ogół stosuje się w wypadku napięć do 30 kV, z wyjątkiem stacji słupowych, oraz tam, gdzie jest to uzasadnione innymi względami. W dużych aglomeracjach miejskich takie rozwiązania stosuje się niekiedy również w stacjach 110 kV.

Stacje wewnętrzne, w odróżnieniu od napowietrznych, cechują następujące właściwości (Dołęga, 2007):

- niezależność warunków eksploatacji od warunków atmosferycznych
- potrzebny niewielki teren
- łatwiejszy dobór lokalizacji
- stosunkowo długi cykl budowy
- trudność rozbudowy
- duże skupienie urządzeń sprzyjające rozprzestrzenianiu się awarii
- konieczność wznoszenia budynku o odpowiedniej kubaturze.

Koszt stacji wewnętrznej dla napięć niższych niż 30 kV jest mniejszy niż stacji napowietrznej. Dla napięć powyżej 30 kV stacje napowietrzne są tańsze od wewnętrznych.

Wymaganie dotyczące minimalnych odległości między elementami urządzeń pod napięciem oraz między tymi elementami a ziemią w rozdzielniach wewnętrznych i napowietrznych o różnych napięciach znamionowych ściśle określają odpowiednie przepisy i normy (Dołęga, 2007; *Poradnik inżyniera elektryka*, 2011).

Rozdzielnie z sześćfluorkiem siarki ( $SF_6$ ) buduje się jako rozdzielnie, w których poszczególne bieguny (fazy) szyn zbiorczych są prowadzone w oddzielnych osłonach (izolacja jednobiegunowa) lub jako rozdzielnie, w których wszystkie fazy są umieszczone we wspólnej osłonie (izolacja trójbiegunowa).

Rozdzielnie o izolacji jednobiegunowej odznaczają się mniejszą zawodnością i są nieco droższe w stosunku do tych z izolacją trójbiegunową. Dodatkowo w wypadku zastosowania izolacji jednobiegunowej nie występują zwarcia międzyfazo-



we, niższe są też przepięcia oraz bardziej równomierny jest rozkład pola elektrycznego. Na osłony trzeba używać materiałów niemagnetycznych.

Rozdzielnie o izolacji trójbiegunowej zajmują mniejszy obszar, a na ich osłony można stosować stal.

Aparatura łączeniowa (wyłączniki, rozłączniki, odłączniki, uziemniki) i inne urządzenia w rozdzielniach z SF<sub>6</sub> różnią się od tradycyjnych, instalowanych w rozdzielniach napowietrznych i wewnątrzowych. Opracowane zostały nowe urządzenia, najczęściej o znacznie mniejszych wymiarach, przeznaczone tylko do tego typu rozdzielni.

Elementy rozdzielni zawierające różne urządzenia są konstruowane w postaci modułów umożliwiających budowę rozdzielni o dowolnym układzie szyn zbiorczych, a także o dowolnym wyposażeniu pól i różnym sposobie zasilania.

Schematy głównych rozdzielni z SF<sub>6</sub> są wybierane spośród rozwiązań tradycyjnych. Najczęściej realizuje się rozdzielnie w układach szynowych (pojedynczy system szyn zbiorczych, podwójny system szyn zbiorczych i ich modyfikacje).

Pola wyposaża się najczęściej w wyłączniki. Spotyka się też rozdzielnie z 3/2 lub 2 wyłącznikami na jedno pole. W rozdzielniach z sześćfluorkiem siarki przyjęto zasadę instalowania uziemników między wszystkimi odłącznikami a wyłącznikami oraz stosowania pełnej wzajemnej blokady i uzależnienia działania wszystkich łączników, uniemożliwiającego wykonanie błędnych czynności łączeniowych.

Rozdzielnie z SF<sub>6</sub> są budowane głównie z przeznaczeniem do współpracy z liniami kablowymi. Transformatory w stacjach z takimi rozdzielniami są lokalizowane w bliskiej odległości od nich. W celu uniknięcia stosowania krótkich odcinków linii kablowych często zasilają się je za pomocą przewodów szynowych w obudowie z izolacją gazową SF<sub>6</sub>.

Stosowanie rozdzielni z SF<sub>6</sub> daje sporo korzyści. Jedną z głównych jest bardzo mały teren przez nie zajmowany; zwykle jest to kilka procent terenu potrzebnego na stację napowietrzną o podobnym układzie połączeń. Kubatura takich stacji wynosi tylko kilkanaście procent kubatury stacji wewnątrzowej w wykonaniu tradycyjnym.

Stacje z sześćfluorkiem siarki mogą być zlokalizowane w budynkach wolno stojących, których architektura nawiązuje do istniejącej zabudowy, lub na zabudowanych terenach miejskich i przemysłowych. Często umieszcza się je w pomieszczeniach piwnicznych dużych budynków biurowych, handlowych, w istniejących halach fabrycznych i innych.

Podstawowa bariera w stosowaniu rozwiązań rozdzielni z SF<sub>6</sub> wynika z faktu, że koszt samych urządzeń jest znacznie większy niż w wypadku stacji w tradycyjnym wykonaniu. Rozdzielnie z SF<sub>6</sub> są jednak coraz powszechniej stosowane w dużych aglomeracjach miejskich.

Stacje 110 kV są budowane jako napowietrzne i wewnątrzowe, a stacje 220 kV i 400 kV jako napowietrzne. W Polsce jedna stacja 220/110 kV – Warszawa-Towarowa – jest stacją wewnątrzową.

## 2.3. Typowe układy rozdzielni 110 kV, 220 kV i 400 kV

### Rozdzielnie 110 kV

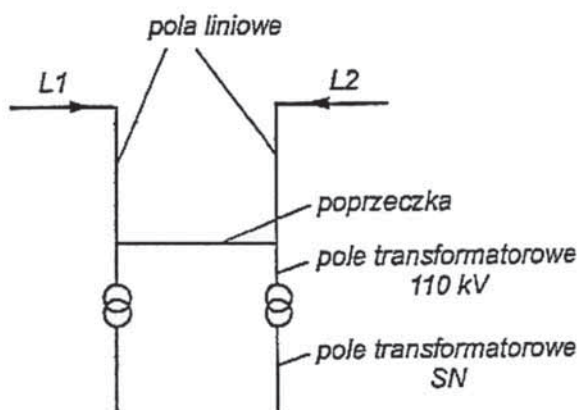
W układach rozdzielni 110 kV, w zależności od pełnionej funkcji w systemie i wielkości stacji, sposobu zasilania oraz rodzaju zasilanych odbiorców i odbiorników, są stosowane różne układy połączeń, projektowane tak, aby spełniały postawione wymagania przy technicznie i ekonomicznie uzasadnionych nakładach inwestycyjnych.

Rozdzielnie o napięciu 110 kV ogólnie można podzielić na:

- rozdzielnie odbiorcze, przeznaczone głównie do pobierania energii z sieci 110 kV
- rozdzielnie zasilająco-rozdzielcze, przeznaczone do zasilania sieci 110 kV energią z sieci NN lub z elektrowni.

### Układy bezszynowe rozdzielnic 110 kV

Układy te stosuje się w ciągach liniowych 110 kV, gdy rozdzielnice są zasilane przez nie więcej niż dwie linie 110 kV. Ze względu na kształt noszą one nazwę układów H. Przykład rozdzielnicy H z podaniem nazw pól przedstawiono na rysunku 2-7.



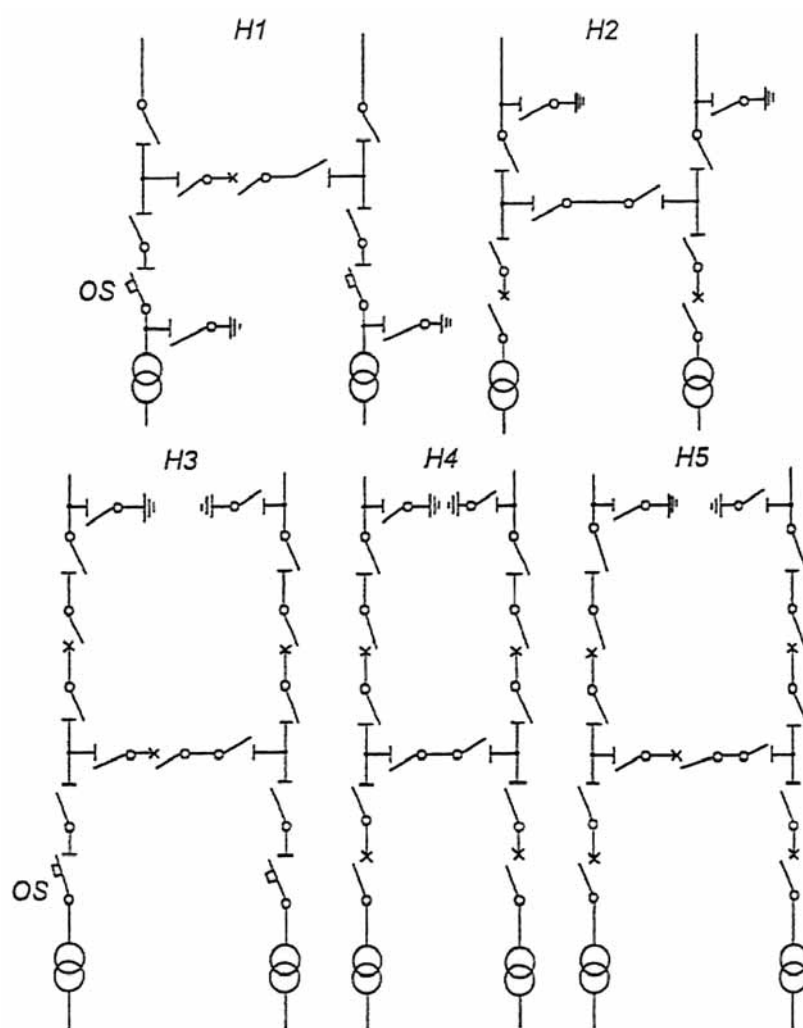
Rys. 2-7. Model rozdzielnicy bezszynowej 110 kV o układzie H

Rozdzielnice o układzie H nie mają szyn zbiorczych. Są proste, tanie i bardzo chętnie stosowane jako rozdzielnice 110 kV w stacjach 110/SN, zasilanych z ciągów linii napowietrznych 110 kV, lub w stacjach z aparaturą w izolacji SF<sub>6</sub>.

W układzie H wyłączniki mogą być umieszczone w polach transformatorowych, w polach liniowych oraz w poprzeczce. W zależności od liczby wyłączników zainstalowanych w rozdzielni rozróżnia się układy: jednowyłącznikowe (H1), dwuwyłącznikowe (H2), trójwyłącznikowe (H3) i czterowyłącznikowe (H4), (rys. 2-8). Umieszczenie wyłączników w polach transformatorowych, polach liniowych i poprzeczce daje najbogatsze rozwiązanie – H5. Jest ono bardzo kosztowne ze względu na wysokie koszty wyłączników (wraz z urządzeniami sterującymi).

Układ H1 z jednym wyłącznikiem w poprzeczce ze względu na dużą zawodność jest wycofywany z eksploatacji.

Układ H2 z wyłącznikami w polach transformatorowych stosuje się tylko w szczególnych przypadkach rozdzielnic bez przepływu mocy przez poprzeczkę bądź przy zasilaniu rozdzielnic z dwóch odczepów od linii dwutorowej, bądź przy zasilaniu z dwóch oddzielnych linii jednotorowych. W rozwiązaniu tym w razie jakiegokolwiek pojedynczego uszkodzenia w obrębie rozdzielnic 110 kV pozostaje zawsze jedno źródło zasilania (linia-transformator).



**Rys. 2-8.** Układy bezszynowe stacji 110 kV – układy H; OS – odłącznik szybki (automatyczny), (Marzecki, 2007)

W przyszłościowych rozwiązaniach będą stosowane układy H3, H4 i H5. Instaluje się je w stacjach przelotowych w ciągach liniowych pętlowych lub dwuliniowych, wyposażonych w dwa transformatory 110 kV/SN. Układ H3 (rys. 2-8) jest wyposażony w trzy wyłączniki w polach liniowych i poprzeczce. Stosowany jest powszechnie w przypadku zasilania mniejszych transformatorów w sieciach rejonowych 110 kV oraz w mniejszych miastach i osiedlach. W uzasadnionych sytuacjach przy krótkich liniach 110 kV wyłączniki w układzie H3 mogą być umieszczane w polach transformatorowych. Decyduje o tym fakt częstszego uszkodzania się transformatora niż krótkiego odcinka linii.

W stacjach GPZ wyposażonych w jednostki transformatorowe 110 kV/SN dużej mocy rzędu 40, 63 MV·A, zasilających duże osiedla i miasta średniej wielkości, buduje się rozdzielnice 110 kV o układzie H4 i H5. Wyłączniki umieszcza się w polach transformatorowych i w polach liniowych.

### **Układy szynowe rozdzielnic 110 kV**

Układy te w stacjach 110 kV/SN są rzadziej stosowane niż prostsze układy H. Kryterium narzucającym ich stosowanie jest konieczność zainstalowania w stacji GPZ trzeciego transformatora 110 kV/SN lub wprowadzenia do stacji więcej niż dwu linii 110 kV. W rozwiązaniach tych stosuje się pojedyncze układy szyn zbiorczych dzielone na dwie sekcje z wyłącznikiem szynowym sekcyjnym.

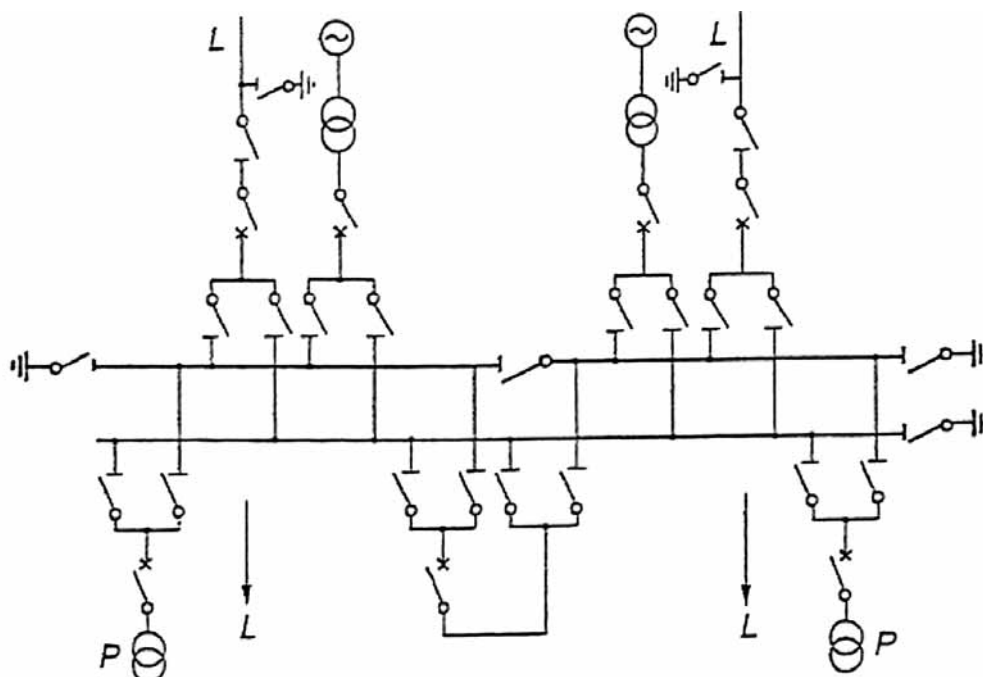
W węzłach sieci 110 kV w stacjach 400 kV/110 kV lub w stacjach 220 kV/110 kV stosuje się natomiast podwójne, a nawet potrójne systemy szyn. W przypadku systemu potrójnego instaluje się *szynę obejściową*.

Wyprowadzanie mocy z elektrowni lokalnych powoduje również konieczność stosowania rozdzielnic szynowych.

Odmienny układ mają rozdzielnice 110 kV służące do zasilania sieci 110 kV z lokalnych elektrowni. Rozdzielnice te muszą być wyposażone w dwa systemy szyn zbiorczych. Ten dość skomplikowany układ rozdzielnic jest podyktowany koniecznością wykonywania łączy eksploatacyjnych poszczególnych bloków energetycznych. Na rysunku 2-9 przedstawiono układ takiej rozdzielnicy stosowany do wyprowadzania mocy poniżej 100 MW. Układ do wyprowadzania mocy 100 ÷ 300 MW jest podobny. Różni się jedynie liczbą pól liniowych (6 zamiast 4) oraz liczbą pól generatorowych (4 zamiast 2).

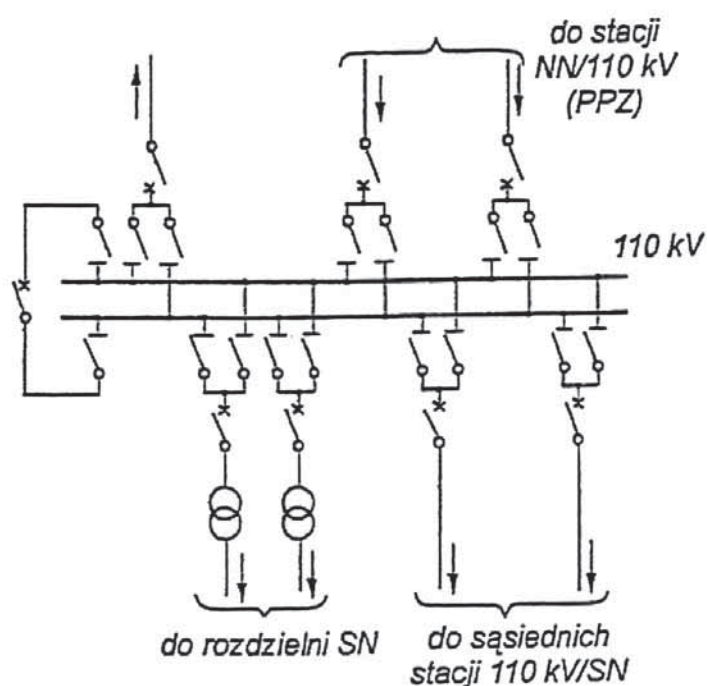
W sieciach 110 kV budowane są również rozdzielnice 110 kV dwuszynowe (trójszynowe). Mają one zastosowanie w węzłach sieci 110 kV lub w punktach zasilania sieci 110 kV z sieci najwyższych napięć (NN). Na rysunku 2.10 przedstawiono przykład rozdzielnicy węzłowej 110 kV starszego typu. Jest ona wyposażona w dwa systemy szyn zbiorczych z wyłącznikiem sprzęgłowym poprzecznym.

Rozdzielnica jest zasilana ze stacji NN/110 kV. Następuje w niej rozdział mocy elektrycznej na ciągi liniowe 110 kV. Mogą być też zainstalowane transformatory 110 kV/SN.



**Rys. 2-9.** Rozdzielnica szynowa 110 kV służąca do zasilania sieci 110 kV z lokalnych elektrowni; L – linia, P – transformator potrzeb własnych (Marzecki, 2007)

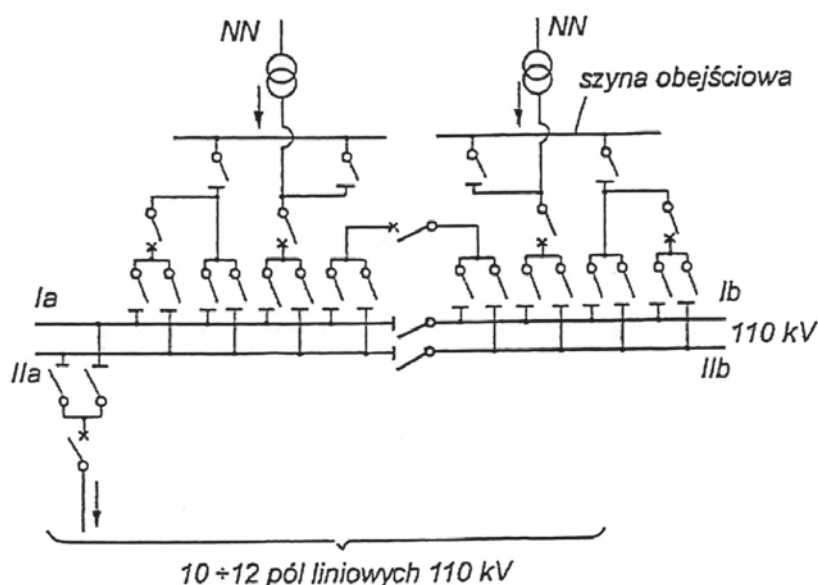
Podobną budowę mają rozdzielnice 110 kV w stacjach transformatorowo-rozdzielczych 220/110 kV. Przy zasilaniu rozdzielnicy z dwóch jednostek autotransformatorowych 220/110 kV o mocy poniżej 200 MV·A każda stosuje się podwójny system szyn zbiorczych ze sprzęgłem poprzeczno-podłużnym.



**Rys. 2-10.** Rozdzielnica 110 kV z podwójnym systemem szyn zbiorczych stosowana w węzłach sieci (Marzecki, 2006)



W stacjach NN/110 kV z jednostkami transformatorowymi 250 MV·A i 330 MV·A stosowane są rozwiązania indywidualne. Rozdzielnice 110 kV są wówczas wyposażone w szyny obejściowe. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 2-11.



**Rys. 2-11.** Rozdzielnica szynowa z podwójnym systemem szyn zbiorczych stosowana w stacjach NN/110 kV (Marzecki, 2006)

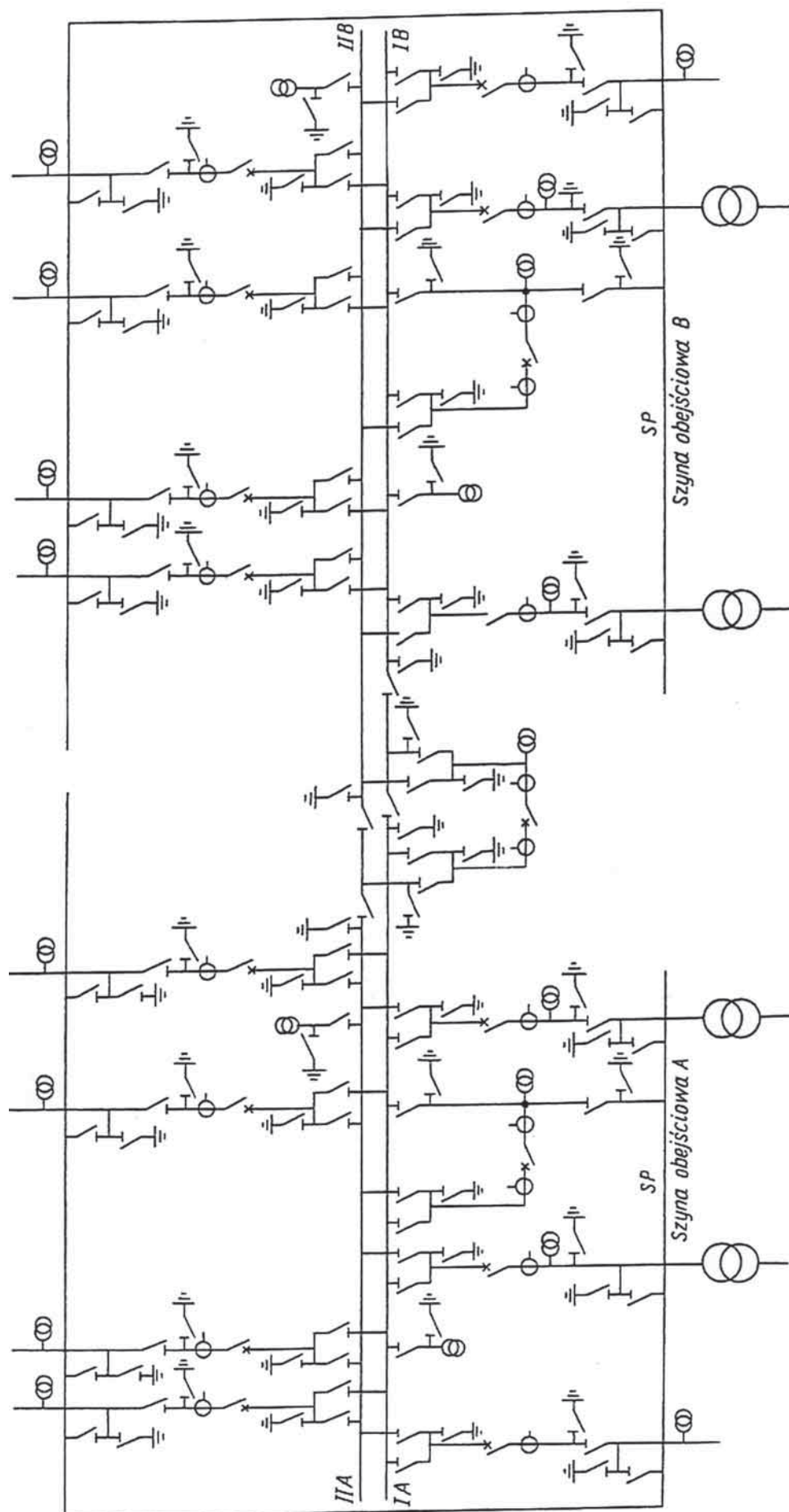
### Rozdzielnie 220 kV i 400 kV

Rozdzielnie 220 kV i 400 kV są zlokalizowane w stacjach NN. Mają one kluczowe znaczenie dla funkcjonowania krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE). Rozdzielnie te, podobnie jak powiązana z nimi sieć przesyłowa, należą do operatora sieci przesyłowej – spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

Sieć przesyłowa w Polsce obejmuje napięcia 220 kV i 400 kV, przy czym za perspektywiczną i rozwojową uznaje się sieć 400 kV. Realizuje ona w KSE główne zadanie przesyłania energii. Sieć 220 kV nie jest obecnie rozbudowywana i liczba stacji 220 kV utrzymuje się na stałym poziomie. W stacjach 400 kV stosuje się zazwyczaj rozbudowane układy połączeń, bogato wyposażone w wyłączniki. Rozdzielnie 400 kV dzieli się na: sieciowe i przy elektrowniach. Najprostszym układem połączeń realizowanym w pierwszym etapie budowy stacji 400 kV dla rozdzielni sieciowych jest blok linia-transformator (L-T).

W małych rozdzielniach sieciowych 400 kV stosuje się układy wielobokowe: w kształcie trójkąta w przypadku dwóch linii i jednego transformatora oraz w kształcie czworoboku przy dwóch liniach i dwóch transformatorach.

W dużych rozdzielniach sieciowych 400 kV z trzema lub czterema liniami oraz dwoma transformatorami stosuje się układy o zwiększonych wymaganiach dotyczących pewności zasilania. Takie rozdzielnie są realizowane na bazie układów z podwójnym sekcjonowanym systemem szyn zbiorczych w postaci 2S+S0 lub w postaci wielowylącznikowej 2W lub 3/2W.



**Rys. 2-12.** Duża rozdzielnia o napięciu 220 kV i podwójnym sekcjonowanym systemie szyn zbiorczych, z dwuczęściową szyną pomocniczą (obojętnościową), (Dofęga, 2007)

W rozdzielniach 400 kV zlokalizowanych przy elektrowniach układy połączeń należy rozpatrywać indywidualnie.

Rozdzielnie 220 kV dzieli się na:

- małe – do 4 odejść
- średniej wielkości – 5-6 odejść
- duże – powyżej 6 odejść.

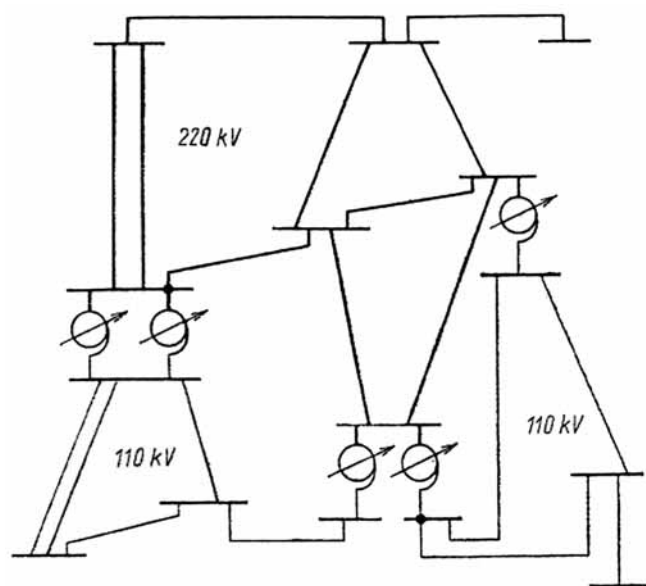
W małych rozdzielniach 220 kV zwykle stosuje się układ jednoblokowy (L-T), a w przypadku dwóch linii i dwóch transformatorów – układ mostkowy typu H4 lub H3.

W rozdzielniach 220 kV średniej wielkości zaleca się przyjmować układ z podwójnym sekcjonowanym systemem szyn zbiorczych i z jednym łącznikiem systemowo-sekcyjnym. W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się stosowanie układu 2S z częściową szyną obejściową dla niektórych lub wszystkich pól.

W dużych rozdzielniach 220 kV na ogół stosuje się układ z podwójnym sekcjonowanym systemem szyn zbiorczych, z dwuczęściową szyną obejściową oraz z jednym łącznikiem systemowo-sekcyjnym i dwoma łącznikami systemowo-obejściowymi szyn. Schemat takiej rozdzielni przedstawiono na rysunku 2-12.

## 2.4. Przykłady typowej struktury sieci przesyłowych i rozdzielczych WN

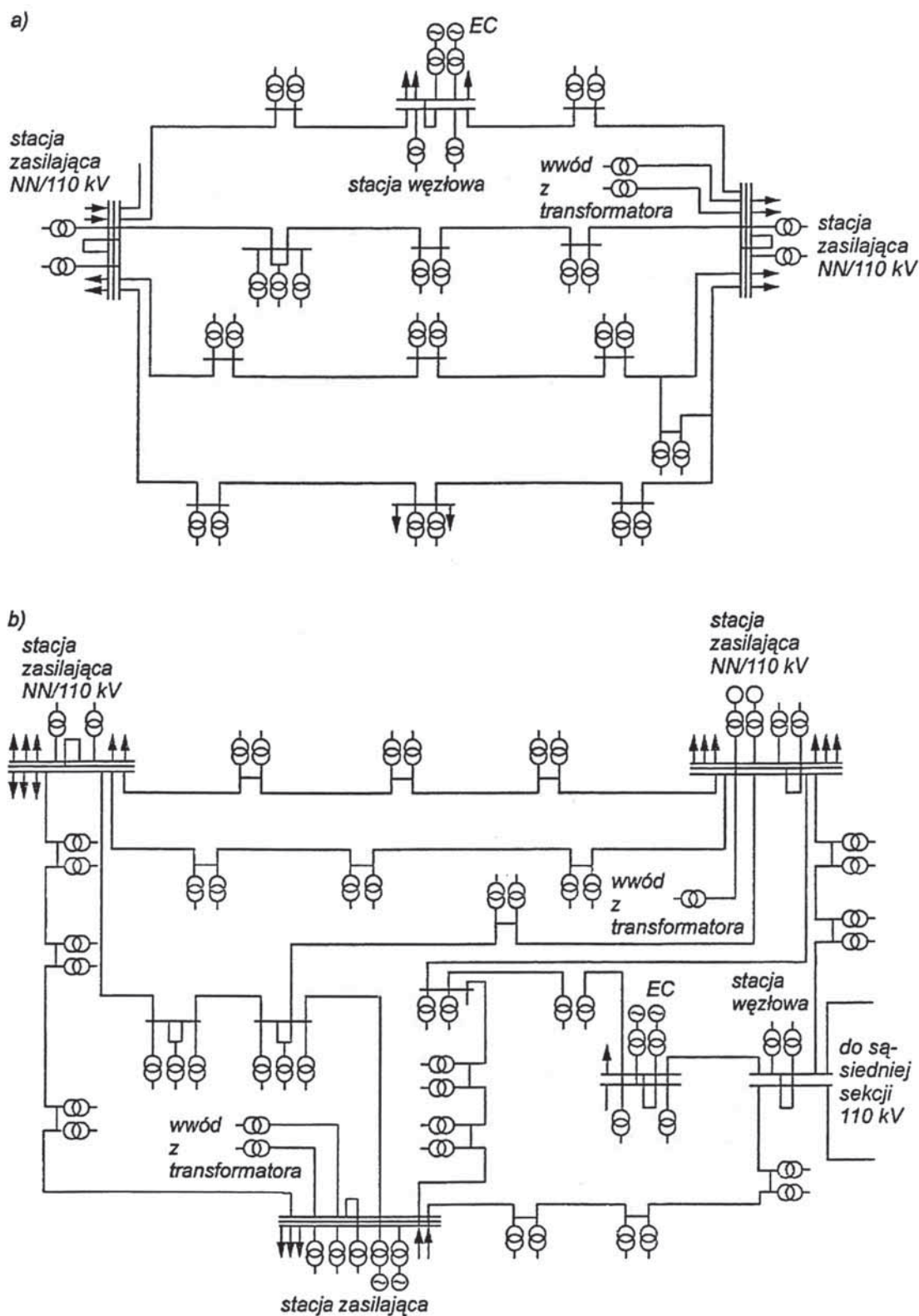
Sieć przesyłowa 400 kV, 220 kV i 110 kV pracuje w strukturze zamkniętej. Oczka tej sieci są utworzone przez linie jedno- i dwutorowe (rys. 2-13).



Rys. 2.13. Sieć zamknięta



Z sieci 400 kV i 220 kV są zasilane sieci rozdzielcze terenowe 110 kV oraz aglomeracje miejskie i wielkie zakłady przemysłowe. Na rysunku 2-12 pokazano schematycznie zasilanie sieci terenowej 110 kV, a na rysunku 2-14 wielkiej aglomeracji miejskiej.



Rys. 2-14. Modele sieci dla miast powyżej 100 tys. mieszkańców: a) sieć miasta 100 ÷ 250 tys. mieszkańców, b) sieć miasta 250 ÷ 500 tys. mieszkańców (Marzecki, 2006)

Najczęściej spotykanymi strukturami miejskiej sieci rozdzielczej 110 kV są:

- a) układ kratowy (o bokach stanowiących trójkąty bądź czworoboki, zamknięty lub otwarty)
- b) układ pętlowy (zamknięty lub otwarty).

## 2.5. Kierunki/tendencje zmian sieci elektroenergetycznych w Polsce

Potrzeby w zakresie rozbudowy sieci przesyłowej wynikają z prognoz wzrostu zapotrzebowania odbiorców na moc i energię elektryczną, wymagań odbiorców w zakresie pewności zasilania oraz inwestycji niezbędnych do przyłączenia i wyprowadzenia mocy z nowych jednostek wytwórczych. Ponadto potrzeby takie są związane z postanowieniami dyrektywy 2009/28/WE dotyczącej udziału OZE (odnawialne źródła energii) w produkcji energii elektrycznej oraz wymagań odnoszących się do rozbudowy połączeń transgranicznych. Na przyszłe koszty funkcjonowania systemu przesyłowego w warunkach rynkowych istotny wpływ będą miały podejmowane dzisiaj decyzje o wysokości nakładów na jego rozwój. Celem powinna być minimalizacja łącznych kosztów wytwarzania i przesyłania energii elektrycznej.

Spółka Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A., odgrywająca na obszarze Polski rolę operatora systemu przesyłowego, obserwuje w ciągu ostatnich 5 lat znaczne zainteresowanie przyłączeniami do KSE, głównie instalacji farm wiatrowych. Planowane przyłączenia dotyczą zarówno sieci wysokich napięć (110 kV), jak i sieci najwyższych napięć – 220 kV i 400 kV. Moce przyłączeniowe instalacji farm wiatrowych planowanych do przyłączenia do sieci 110 kV operatorów systemów dystrybucyjnych zawierają się od 5 MW do 200 MW, a do sieci operatora systemu przesyłowego od 42 MW do 1 560 MW (*Plan rozwoju w zakresie ...*, 2010).

Analizy systemowe opracowywane na rzecz przyłączeń jednostek wytwórczych, zarówno o charakterze konwencjonalnym jak i OZE, wykazują potrzebę rozbudowy sieci przesyłowej, budowę linii 400 kV i 110 kV oraz potrzebę zwiększenia zdolności przesyłowych istniejących linii. Koordynacja rozbudowy sieci dotyczy obecnie ustalenia wspólnych inicjatyw obejmujących budowę bądź rozbudowę węzłów sieciowych NN/110 kV oraz rozwiązywania problemów rozbudowy sieci, w tym zwiększania przepustowości linii wynikającego z potrzeby przyłączenia jednostek wytwórczych zgodnie z określonymi warunkami przyłączenia. Radykalne

zmiany w rozbudowie sieci zamkniętej mogą nastąpić w wyniku wniosków płynących ze wspólnie realizowanych z OSD (operator sieci dystrybucyjnej) analiz pracy sieci oraz tworzenia planów rozwoju obejmujących sieć zamkniętą (o napięciu 110, 220 i 400 kV), (*Plan rozwoju w zakresie ...*, 2010). W strategii rozbudowy sieci zamkniętej przyjęto generalną zasadę rozbudowy sieci o napięciu 400 kV, stanowiącej szkieletową i oczkową sieć przesyłową z odciążeniem funkcji przesyłowych pełnionych dotychczas w wielu obszarach przez sieć o napięciu 110 kV. Przyjęto również zasadę, że w obszarach intensywnie zurbanizowanych, np. w aglomeracjach miejskich, w których nie ma możliwości rozbudowywania sieci 400 kV, będzie rozwijana sieć 220 kV, która na najtrudniejszych odcinkach może być budowana w postaci linii kablowych.

W sieci 110 kV, a zwłaszcza w liniach napowietrznych, konieczne jest podjęcie działań zmierzających do zlikwidowania tzw. „wąskich gardeł” na przesyle spowodowanych w większości ciągów liniowych niejednorodnością przekrojów przewodów fazowych na poszczególnych odcinkach linii.

W budownictwie linii elektroenergetycznych, podobnie jak w innych dziedzinach techniki, poszukiwane są nowe, lepsze rozwiązania odpowiadające rosnącym wymaganiom, szczególnie w zakresie ochrony środowiska. Podstawowym problemem, jaki napotyka inwestor, jest uzyskanie zgód na budowę lub przebudowę napowietrznych linii elektroenergetycznych. Dotychczas stosowane rozwiązania konstrukcji wsporczych linii 110 kV, 220 kV i 400 kV w Polsce to słupy kratowe. Nowe rozwiązania konstrukcji słupów, tj. słupy rurowe, ułatwiają pozyskanie zgody właścicieli gruntów na ich posadowienie. Lepszą ochronę środowiska zapewnia także budowa *linii wielotorowych* (liczba torów większa od dwóch), *linii wielonapięciowych*, *linii wąskogabarytowych* (w tym także tzw. linii leśnych o pionowym układzie przewodów) oraz *linii nadleśnych*.

Pod pojęciem „linie wielotorowe” jest rozumiane zgromadzenie więcej niż dwóch torów elektrycznych różnych napięć na jednej konstrukcji wsporczej. Przy rozbudowie sieci elektroenergetycznej, w związku z niewystarczającą ilością tras linii, a przede wszystkim w dużych aglomeracjach i na „wrażliwych” (pod względem krajobrazu) terenach, od wielu lat zachodzi konieczność koncentracji obwodów elektrycznych na jednej trasie, przy większej koncentracji niż linia dwutorowa. Współczesna tendencja prowadzenia na jednej trasie wielu obwodów elektrycznych ze zróżnicowanymi poziomami napięć: 110 kV, 220 kV, 400 kV, czasami należących do różnych właścicieli, występuje przykładowo w Niemczech, gdzie zamiast 400 kV stosuje się napięcie 380 kV. Taki sposób budowy mógł bowiem zostać zastosowany bez wystąpienia negatywnych skutków dla niezawodności przesyłania energii elektrycznej tylko dlatego, że inwestorzy starają się już od kilku lat zmieniać dotychcza-

sowy klasyczny sposób budowy linii napowietrznych wysokiego napięcia. Polega to między innymi na stosowaniu nowych rozwiązań budowlanych i nowych sylwetek słupów i jednoczesnym dotrzymaniu zobowiązań określonych w przepisach prawa energetycznego co do zapewnienia bezpiecznej dostawy energii po korzystnych cenach tak, aby nie tylko były uwzględnione aspekty techniczne i ekonomiczne, lecz również by ingerencja w środowisko naturalne była jak najmniejsza. Jednakże z dzisiejszego punktu widzenia przedstawione tu sposoby budowy to już granica możliwości konstrukcyjnych i ze względu na uwarunkowania mechaniczne i elektryczne nie jest możliwa dalsza koncentracja torów na słupach kratowych.

Rozwiązaniem tej sytuacji, ograniczającym budowę „monstrualnych” konstrukcji wsporczych, jest zatem zastosowanie słupów rurowych do budowy linii najwyższych i wysokich napięć oraz przewodów wysokotemperaturowych.

Zwiększenie zapotrzebowania na energię elektryczną w obszarach dużych aglomeracji miejskich wymusza stosowanie konstrukcji stacji zajmujących możliwie niewielki teren, bezpiecznych ekologicznie i spełniających warunki niezawodnej dostawy energii elektrycznej. Można przewidywać, że rozdzielnie wewnętrzne wysokich napięć będą budowane jako budowle podziemne połączone sieciami kablowymi, dla wybranych lokalizacji.

Należy oczekiwać rozwoju konstrukcji rozdzielni gazowych z SF<sub>6</sub> w kierunku dalszego zmniejszania ich wymiarów, poprzez mniej zawodne konstrukcje osłon izolacyjnych i podwyższanie ciśnienia, z podgrzewaniem gazu w celu uniemożliwienia jego kondensacji w niskiej temperaturze. Ze względu na silną toksyczność związków chemicznych powstających podczas działania łuku elektrycznego w obecności metalu i SF<sub>6</sub> występuje zagrożenie skażeniem terenu w wyniku eksplozji wyłącznika z gasiwem SF<sub>6</sub>. Problem ten musi zostać rozwiązany w najbliższym czasie przez zastosowanie odpowiednich materiałów na komory gaszące i styki, niepowodujących powstawania silnie toksycznych związków, lub też przez zastosowanie konstrukcji mechanicznych uniemożliwiających eksplozję komory gaszącej bądź poszukiwanie innego rodzaju medium izolacyjnego.

Stacje napowietrzne, w warunkach krajowych, będą budowane jeszcze przez wiele lat. Podstawowym problemem do rozwiązania w konstrukcjach stacji jest ograniczenie potrzeby wykonywania zabiegów konserwacyjnych. W celu zmniejszenia liczby i wymiarów konstrukcji stacji oraz poprawy jej niezawodności do powszechnego użytku najprawdopodobniej wejdzie oszynowanie rurowe.

Poprawa niezawodności oraz trwałości aparatury i urządzeń napowietrznych powinna spowodować eliminację wszelkich zabiegów konserwacyjnych przez okres co najmniej 10 lat eksploatacji stacji. W najbliższych latach powstaną zapewne zestawy urządzeń umożliwiające bezawaryjną i bezobsługową pracę stacji



przez 15–20 lat. Rozbudowa układów zdalnego nadzoru nowoczesnej stacji umożliwi ciągłą obserwację i diagnostykę urządzeń, czyli zapobiegnie ewentualnej awarii.

Przewiduje się, że przyszłościowe stacje elektroenergetyczne, z racji zwiększającego się poboru mocy przy jednoczesnych utrudnieniach lokalizacyjnych oraz wymaganiach środowiskowych, będą znacznie mniejsze, przy czym kryteria projektowe powinny obejmować następujące aspekty (*Poradnik inżyniera elektryka*, 2011):

- redukcję nakładów i kosztów inwestycji
- minimalizację kosztów eksploatacji i utrzymania
- ograniczenie liczby komponentów urządzeń stacyjnych
- kompaktowość aparatury
- mniejszy wpływ stacji na środowisko naturalne
- stosowanie magistrali w sieciach komputerowych oraz zintegrowanych rodzajów zabezpieczeń i sterowania
- stosowanie serwomechanizmów, czujników i przetworników światłowodowych prądowych i napięciowych
- zwiększenie bezpieczeństwa personelu.

## Bibliografia

- Dołęga W. (2007) *Stacje elektroenergetyczne*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Informacje o systemie elektroenergetycznym* [online]. PSE Operator SA, Konstancin-Jeziorna [dostęp: 2012-09-20] <http://www.pse-operator.pl>.
- Kujaszczyk S. i in. (1997) *Elektroenergetyczne układy przesyłowe*. Warszawa, WNT.
- Marzecki J. (2006) *Elektroenergetyczne sieci miejskie*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Marzecki J. (2007) *Terenowe sieci elektroenergetyczne*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji.
- Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2010-2025*. Opracowanie – wyciąg (2010) [online]. PSE Operator SA, Konstancin-Jeziorna [dostęp: 2012-09-20] <http://www.pse-operator.pl>.
- Poradnik inżyniera elektryka* (2011) Praca zbiorowa. T. 3. Warszawa, WNT.
- Witek B. (2011) *Projektowanie elektroenergetycznych układów przesyłowych*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Żmuda K. (2012) *Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

# 3. Charakterystyka prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Szymon Zapadka

<b>3.1. Rodzaje prac eksploatacyjnych (45)</b>	<b>3.3.6. Montaż oszynowania stacji z przewodami linkowymi (68)</b>
<b>3.1.1. Typowe prace na liniach elektroenergetycznych (47)</b>	<b>3.3.7. Wymiana urządzeń pierwotnych na stacji WN (69)</b>
<b>3.1.2. Typowe prace w rozdzielniach elektroenergetycznych (49)</b>	<b>3.3.8. Układanie kabli w kanałach i tunelach kablowych (70)</b>
<b>3.2. Uwarunkowania prawne prac na urządzeniach elektroenergetycznych (52)</b>	<b>3.3.9. Pomiary kontrolne na obiektach WN (71)</b>
<b>3.3. Najczęściej wykonywane prace i wykorzystywane urządzenia (59)</b>	<b>3.3.10. Kontrola i uzupełnianie oleju izolacyjnego w urządzeniach energetycznych (72)</b>
<b>3.3.1. Zakładanie oplotu naprawczego na przewody robocze i odgromowe (60)</b>	<b>3.4. Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia związane z wykonywanymi pracami (73)</b>
<b>3.3.2. Wymiana izolatora (60)</b>	<b>3.5. Profilaktyka zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia w praktyce codziennej (74)</b>
<b>3.3.3. Wymiana mostka prądowego (63)</b>	<b>Bibliografia (75)</b>
<b>3.3.4. Naprawa konstrukcji słupa kratowego (64)</b>	
<b>3.3.5. Montaż przewodów roboczych i odgromowych (67)</b>	

## 3.1. Rodzaje prac eksploatacyjnych

W XXI wieku każde gospodarstwo domowe i zakład produkcyjny w mniejszym lub większym stopniu jest uzależniony od energii elektrycznej. Pomędzy odbiorcami i wytwórcami energii elektrycznej znajduje się szereg urządzeń służących do przesyłu oraz rozdziału energii. Wszystkie te elementy jako całość stanowią system elektroenergetyczny.

W systemie elektroenergetycznym, ze względu na pełnioną funkcję, można wyróżnić:

- urządzenia do wytwarzania energii elektrycznej
- sieci przesyłowe (linie i stacje 220 kV i 400 kV)
- sieci dystrybucyjne (linie i stacje o napięciu 0,4 ÷ 110 kV).

Obecnie w Polsce odchodzi się od standardu 220 kV – nowe obiekty są budowane na napięciu 400 kV.

Linie elektroenergetyczne dystrybucyjne coraz częściej są budowane jako kablowe. Przesądza o tym walory estetyczne, bezpieczeństwo lub też brak miejsca na prowadzenie linii napowietrznych.

Konstrukcja podstawowa urządzeń stacyjnych i liniowych jest zbliżona. Składają się na nią:



- przewody gołe lub izolowane
- izolatory
- konstrukcje nośne w postaci słupów na liniach lub specjalne konstrukcje stacyjne
- fundamenty, na których jest posadowiona konstrukcja
- uziemienia ochronne i robocze.

W liniach sieci napowietrznych nieizolowanych stosuje się izolację separującą elementy przewodzące znajdujące się pod napięciem od konstrukcji nośnych uziemionych, do których jest swobodny dostęp z poziomu ziemi. Izolacja jest tym dłuższa, im większe jest napięcie urządzenia.

Sieci dystrybucyjne są to sieci niskiego i średniego napięcia, gdyż moce przesyłane takimi urządzeniami nie są duże, a odległości przesyłu są małe. Sieciami dystrybucyjnymi zarządzają spółki obszarowe, tzw. zakłady energetyczne, takie jak ENERGA, ENEA itp.

W ramach przedsiębiorstw zarządzających sieciami są prowadzone prace eksploatacyjne na urządzeniach elektroenergetycznych. Prace eksploatacyjne można podzielić na trzy zasadnicze rodzaje, zależnie od ich zaawansowania:

- oględziny – polegają na obserwacji i ocenie elementów linii bez wchodzenia na urządzenie oraz bez wykonywania pomiarów i badań
- przeglądy – polegają na bardziej szczegółowej kontroli stanu urządzeń, często po wyłączeniu napięcia wykonuje się badania diagnostyczne i konserwacje odtwarzające sprawność linii bądź stacji
- remonty – prace mające na celu modernizację linii, stacji, wykonywane na podstawie opracowanej wcześniej dokumentacji technicznej.

Jako czwarty rodzaj prac na liniach i stacjach elektroenergetycznych można jeszcze wymienić prace awaryjne. Są to prace powstałe w wyniku działania obcych sił niszczących i polegają na jak najszybszym przywróceniu urządzenia do pracy.

Oględziny są prowadzone cyklicznie, zależnie od wewnętrznych instrukcji obowiązujących w danym zakładzie. Podczas oględzin należy sprawdzić poszczególne elementy urządzeń oraz ich otoczenie, a zwłaszcza:

- stan fundamentów i konstrukcji wsporczych
- stan izolacji i osprzętu sieciowego
- stan przewodów
- stan tablic ostrzegawczych oraz informacyjnych
- stan technicznych środków ochrony odgromowej i przeciwporażeniowej
- stan odejść kablowych
- stan styków w łącznikach
- odległości elementów pod napięciem od innych elementów postronnych, takich jak drzewa

- zagospodarowanie terenu w pobliżu linii i stacji
- kompletność zamków i ogrodzeń
- występowanie prowadzonych robót budowlanych w pobliżu linii
- stan i gotowość potrzeb własnych prądu przemiennego
- stan prostowników oraz baterii akumulatorów
- zgodność położenia przełączników automatyki z aktualnym układem połączeń stacji
- działanie oświetlenia elektrycznego (zasadniczego i awaryjnego) stacji
- stan techniczny transformatorów, przekładników, wyłączników, odłączników, dławików gaszących, rezystorów i ograniczników przepięć
- gotowość ruchową układów zabezpieczeń, automatyki i sygnalizacji oraz central telemechaniki
- stan i gotowość ruchową aparatury i napędów łączników
- działanie łączy teletechnicznych
- stan zewnętrzny izolatorów i głowic kablowych
- poziom gasiwa lub czynnika izolacyjnego w urządzeniach.

Przeglądy, podobnie jak oględziny, wykonuje się cyklicznie, jednak ich zakres jest dużo większy i są wykonywane przy urządzeniach wyłączonych spod napięcia.

Przeгляд linii lub jej odcinka polega na kompleksowym wykonaniu zabiegów diagnostycznych (pozwalających na możliwie pełną ocenę stanu technicznego poszczególnych jej elementów) oraz zabiegów konserwacyjnych odtwarzających sprawność eksploatacyjną obiektu.

Przeglądy rozdzielni polegają na okresowym sprawdzaniu stanu technicznego elementów stacji, wykonywaniu zabiegów konserwacyjno-remontowych i profilaktycznych oraz wymianie zużytych elementów i części. Zakresy przeglądów urządzeń stacji powinny wynikać z przeprowadzonych oględzin i oceny stanu technicznego urządzeń.

### 3.1.1. Typowe prace na liniach elektroenergetycznych

Najczęściej występującym elementem systemu elektroenergetycznego są linie elektroenergetyczne. Linie elektroenergetyczne łączą ze sobą elektrownie z dużymi stacjami systemowymi na poziomie najwyższych napięć oraz stacje systemowe z mniejszymi stacjami, tzw. głównymi punktami zasilania (GPZ). Linie dochodzące do GPZ najczęściej są liniami o napięciu 110 kV.

Linie elektroenergetyczne są prostymi elementami systemu elektroenergetycznego. Ich budowa zasadniczo opiera się na podstawowym modelu. W ziemi są za-

kopane fundamenty, na których jest zamontowana konstrukcja, najczęściej stalowa. Na rysunku 3-1 przedstawiono sylwetkę słupa jednotorowej linii 220 kV.



**Rys. 3-1.** Słup mocny linii 220 kV wraz z izolacją i przewodami

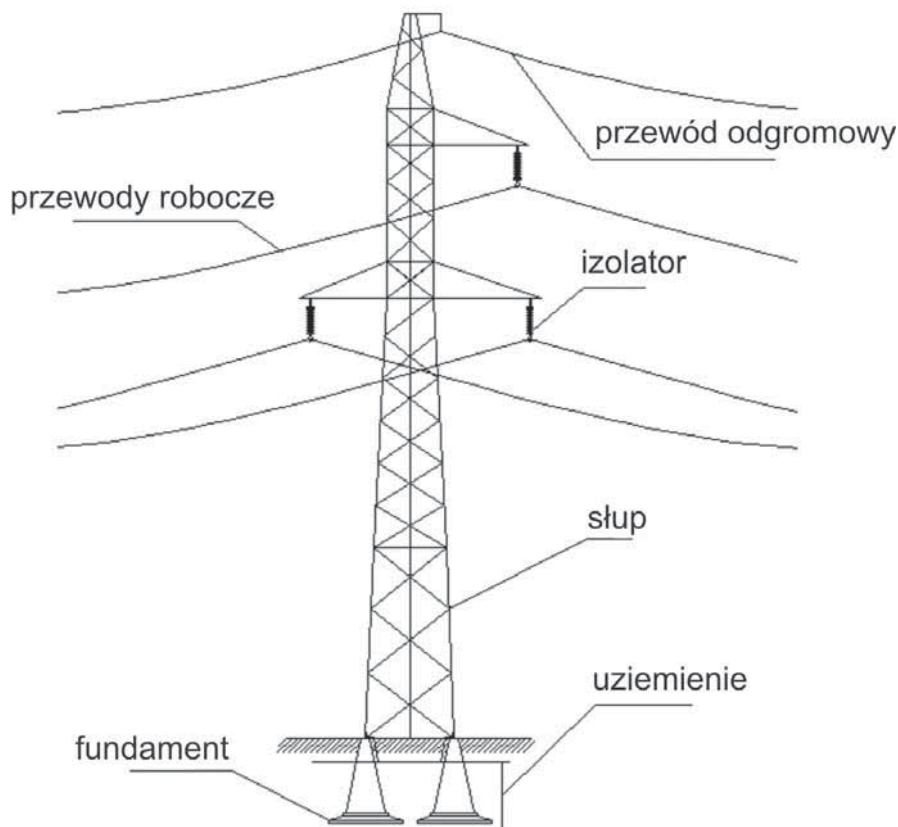
Do konstrukcji słupów są podwieszane izolatory z osprzętem liniowym. Do izolatorów jest podwieszony przewód roboczy. Na liniach o napięciu wyższym lub równym 110 kV dodatkowo jest zastosowana ochrona odgromowa w postaci jednego lub dwóch przewodów odgromowych połączonych metalicznie z konstrukcją słupa. Na rysunku 3-2 pokazano sylwetkę słupa jednotorowej linii napowietrznej o napięciu 110 kV.

Bardzo często są stosowane przewody odgromowe skojarzone z włóknami światłowodowymi OPGW (ang. *optical ground wire*). Na wielu liniach, szczególnie 110 kV, są zamontowane dielektryczne samonośne przewody światłowodowe ADSS (ang. *All-dielectric self-supporting*).

Wpływ na gabaryty linii ma napięcie, to ono decyduje o długości przerwy izolacyjnej (długości izolatorów), a także o wysokości słupów i o odległości bezpiecznej przewodów roboczych od innych obiektów zlokalizowanych w pobliżu linii.

Wszystkie prace wykonywane na liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia (WN) dotyczą ich podstawowych elementów. Na prace remontowe na liniach WN składa się zazwyczaj następujący zakres robót:

- wymiana przewodu odgromowego na przewód odgromowy skojarzony z włóknami światłowodowymi
- wymiana izolacji i osprzętu izolatorowego
- regulacja zwisów przewodów, wymiana osprzętu przewodowego
- wymiana przewodów roboczych i odgromowych
- odbudowa uziemień
- zabezpieczanie antykorozyjne konstrukcji słupów
- naprawa zakratowań lub wymiana całych elementów konstrukcji stalowych
- naprawa fundamentów.



Rys. 3-2. Słup przelotowy jednorodowej linii 110 kV

### 3.1.2. Typowe prace w rozdzielniach elektroenergetycznych

W systemie elektroenergetycznym rozdzielnie elektroenergetyczne (rys. 3-3) występują rzadziej niż linie. Stacje elektroenergetyczne są zbudowane punktowo i skupiają po kilka linii elektroenergetycznych.





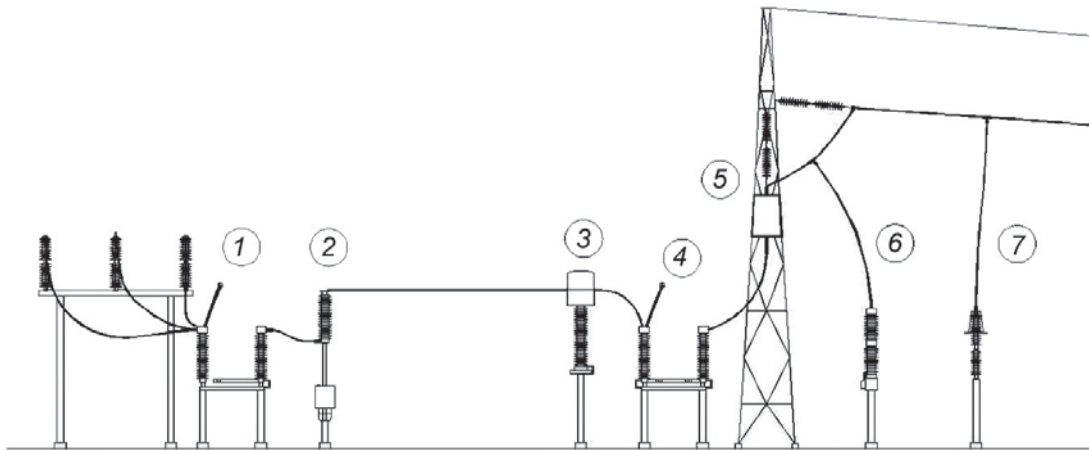
**Rys. 3-3.** Widok ogólny rozdzielni 110 kV

Budowa rozdzielni jest bardzo złożona. W skład rozdzielni wchodzi: nastawnia (budynek, w którym jest zlokalizowana aparatura pomiarowa, sterująca, zabezpieczeniowa), transformatory, cała aparatura pierwotna. W skład aparatury pierwotnej wchodzi takie urządzenia, jak: odłączniki, wyłączniki, uziemniki, przekładniki, układy szyn. Niezawodność i pewność zadziałania na rozdzielniach elektroenergetycznych jest bardzo duża, dzięki odpowiednio zróżnicowanej budowie stacji. Na rysunku 3-4 przedstawiono przykładowy układ pola liniowego rozdzielni 220 kV.

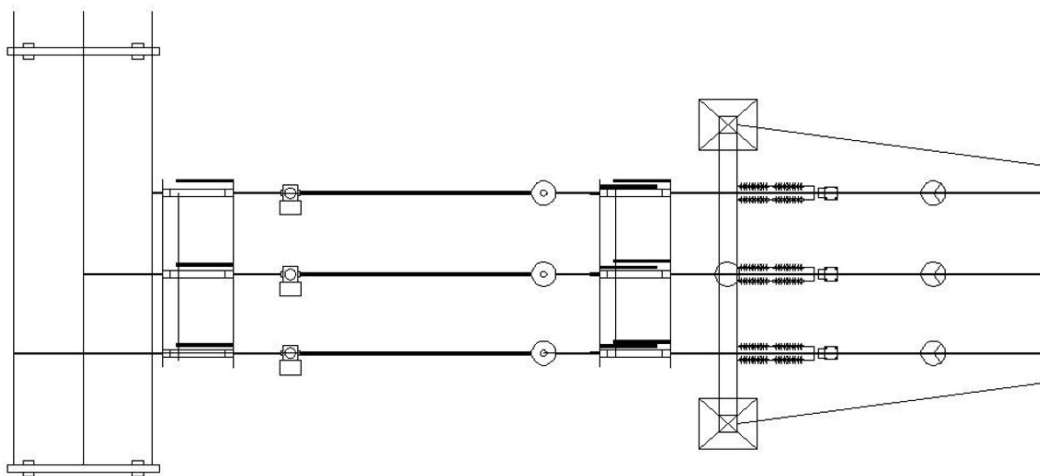
Im więcej elementów torów prądowych może pracować niezależnie lub też zamiennie, tym pewność zasilania jest większa, a jednocześnie powierzchnia zajmowana przez stację i koszt wykonania też są większe.

Coraz częściej ze względów urbanistycznych buduje się stacje elektroenergetyczne wewnętrzne. Podstawową izolacją w takich rozwiązaniach jest gaz SF<sub>6</sub>. Stacje takie są bardziej kompaktowych rozmiarów i możliwe jest ich umieszczenie na mniejszej powierzchni. Mniejsze rozdzielnie GPZ często są budowane na osiedlach, przy galeriach handlowych, wśród zabudowań.

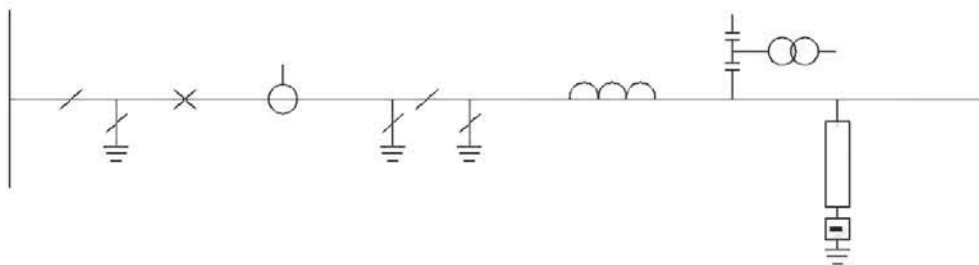
a)



b)



c)



**Rys. 3-4.** Schemat pola liniowego stacji o napięciu 220 kV. a) widok pola w przekroju; b) widok pola z góry; c) schemat elektryczny układu połączeń. 1 – odłącznik z uziemnikiem jednego bieguna, 2 – wyłącznik, 3 – przekładnik prądowy, 4 – odłącznik z uziemnikiem dwóch biegunów, 5 – dławik do komunikacji WCZ, 6 – przekładnik napięciowy, 7 – ogranicznik przepięć

Najczęściej wykonywane prace remontowe na rozdzielniach elektroenergetycznych to:

- modernizacja zabezpieczeń
- wymiana izolacji i osprzętu liniowego



- czyszczenie izolatorów
- odbudowa uziemień
- uzupełnianie oleju transformatorowego
- wymiana kabli sterowniczych
- modernizacja urządzeń łączności
- remonty budynków na terenie stacji.

### 3.2. Uwarunkowania prawne prac na urządzeniach elektroenergetycznych

Prace w warunkach szczególnego zagrożenia zdrowia i życia ludzkiego powinny być wykonywane środkami całkowicie zabezpieczającymi oraz na podstawie *pisemnego polecenia wykonania pracy* (zwanego dalej *poleceniem*).

Bez *polecenia* mogą być wykonywane tylko prace związane z ratowaniem zdrowia lub życia ludzkiego, urządzeń przed zniszczeniem oraz prace eksploatacyjne określone w zatwierdzonych do stosowania instrukcjach eksploatacyjnych, wykonywane przez uprawnionych i upoważnionych pracowników.

Żadnych prac na urządzeniach elektroenergetycznych WN nie można wykonywać podczas wyładowań atmosferycznych. W warunkach słabej widoczności, silnego wiatru, mgły oraz śnieżyicy można przeprowadzać tylko prace przy usuwaniu awarii.

Pracownicy pełniący stanowiska funkcyjne, takie jak: poleceniodawca, koordynator, dopuszczający oraz nadzorujący prace, muszą posiadać aktualne świadectwo kwalifikacyjne do pracy przy urządzeniach i instalacjach energetycznych, uwzględniające odpowiedni poziom napięcia.

Wydawanie poleceń i dopuszczanie do pracy zgodnie z *poleceniem* jest realizowane przez odpowiednie służby prowadzące eksploatację urządzeń i instalacji energetycznych. Zakład zarządzający eksploatacją urządzeń i instalacji jest zobowiązany do prowadzenia ewidencji osób, którym zostało udzielone upoważnienie do wydawania *poleceń* oraz zakres kompetencji.

*Polecenie* powinno w szczególności określać:

- zakres, rodzaj, miejsce i termin pracy
- środki i warunki do bezpiecznego wykonania pracy
- liczbę pracowników skierowanych do pracy
- pracowników odpowiedzialnych za organizację i wykonanie pracy, pełniących funkcję:
  - koordynującego lub dopuszczającego, przez podanie stanowiska służbowego lub imiennie

- kierownika robót, nadzorującego lub kierującego zespołem pracowników – imiennie
- planowane przerwy w czasie pracy.

Poleceniodawca jest to pracownik upoważniony pisemnie przez prowadzącego eksploatację urządzeń i instalacji energetycznych do wydawania *poleceń*, posiadający ważne świadectwo kwalifikacyjne na stanowisku dozoru.

Do obowiązków poleceniodawcy należy:

- przygotowanie *polecenia* pisemnego
- określenie, w porozumieniu z wykonawcą, zakresu, rodzaju, miejsca, terminu wykonania pracy i planowanych przerw w pracy
- określenie środków i warunków do bezpiecznego wykonania pracy
- określenie liczby pracowników skierowanych do pracy
- określenie pracowników odpowiedzialnych za organizację i wykonanie pracy pełniących funkcje: kierownika robót i nadzorującego – imiennie, koordynującego – imiennie lub stanowiskowo, dopuszczającego – imiennie lub stanowiskowo
- prowadzenie ewidencji poleceń.

Koordynującym powinien być pracownik komórki organizacyjnej sprawującej dozór nad ruchem urządzeń i instalacji energetycznych, przy których będzie wykonywana praca (np. dyspozytor), posiadający ważne świadectwo kwalifikacyjne na stanowisku dozoru.

Do obowiązków koordynującego należy:

- skoordynowanie wykonawstwa poleconych prac określonych w *poleceniu* z ruchem urządzeń i instalacji elektroenergetycznych
- określenie czynności łączeniowych związanych z przygotowaniem miejsca pracy
- wydanie zezwolenia na przygotowanie miejsca pracy, dopuszczenie do pracy i likwidację miejsca pracy
- uzyskanie od dopuszczającego informacji o dopuszczeniu do pracy
- podjęcie decyzji o uruchomieniu urządzeń i instalacji elektroenergetycznych, przy których była wykonywana praca
- zapisywanie w dzienniku operacyjnym ustaleń wynikających z powyższych decyzji.

Dopuszczającym jest wyznaczony przez poleceniodawcę pracownik posiadający ważne świadectwo kwalifikacyjne na stanowisku eksploatacji i upoważniony pisemnie przez prowadzącego eksploatację urządzeń i instalacji energetycznych do wykonywania czynności łączeniowych w celu przygotowania miejsca pracy.

Do obowiązków dopuszczającego należy:

- uzyskanie od koordynującego zezwolenia na rozpoczęcie przygotowania miejsca pracy

- przygotowanie miejsca pracy
- uzyskanie od koordynującego zezwolenia na dopuszczenie do wykonywania pracy
- dopuszczenie do wykonywania pracy
- sprawdzenie zakończenia pracy
- zlikwidowanie miejsca pracy po jej zakończeniu i poinformowanie o tym koordynującego.

Poleceniodawca może wyznaczyć nadzorującego, jeżeli pracę będzie wykonywać zespół pracowników niebędący zespołem pracowników kwalifikowanych lub kierujący zespołem nie posiada świadectwa kwalifikacyjnego oraz jeżeli poleceniodawca uzna to za konieczne ze względu na szczególny charakter i warunki wykonywania pracy. Nadzorującym jest pracownik pełniący tylko funkcję nadzoru, niebiorący udziału w wykonywaniu pracy.

Do obowiązków nadzorującego należy:

- sprawdzenie przygotowania miejsca pracy i przyjęcie go od dopuszczającego, jeśli zostało przygotowane właściwie
- zaznajomienie nadzorowanych pracowników z warunkami bezpiecznego wykonywania pracy
- sprawowanie ciągłego nadzoru nad pracownikami, aby nie przekraczali granicy wyznaczonego miejsca pracy oraz ustaleń określonych w *poleceniu*
- powiadomienie dopuszczającego o zakończeniu pracy.

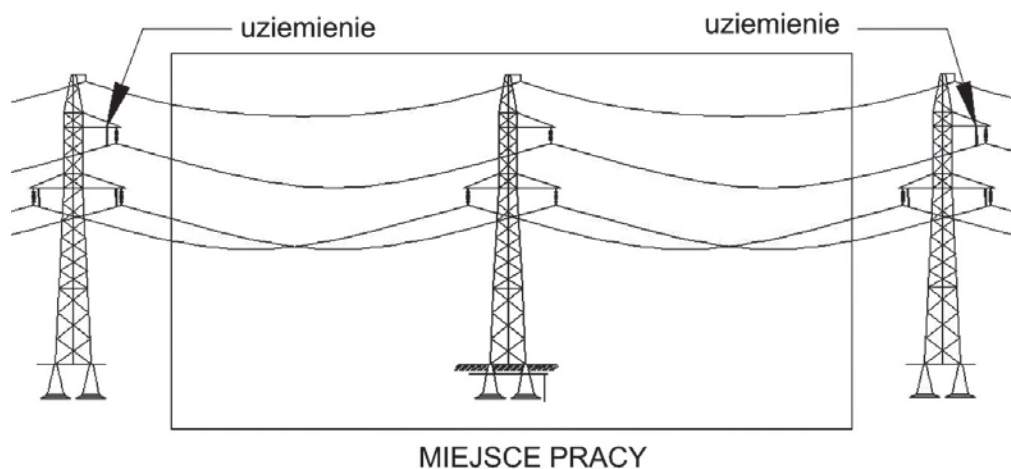
Prace w miejscu wykonywania robót prowadzi kierujący zespołem pracowników kwalifikowanych. Funkcję tę powinien pełnić pracownik posiadający ważne świadectwo kwalifikacyjne, właściwe dla określonego w *poleceniu* zakresu pracy oraz rodzaju urządzeń i instalacji energetycznych, przy których praca będzie wykonywana. Jednakże w przypadku zespołu niebędącego zespołem pracowników kwalifikowanych funkcję kierującego zespołem pracowników może pełnić osoba nieposiadająca świadectwa kwalifikacyjnego, ale mająca umiejętności zawodowe w zakresie wykonywanej pracy, przeszkolona w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy.

Do obowiązków kierującego należy:

- dobranie pracowników o umiejętnościach zawodowych odpowiednich do wykonywania polecanej pracy
- zapewnienie wykonywania pracy w sposób bezpieczny
- egzekwowanie od członków zespołu stosowania właściwych środków ochrony indywidualnej, odzieży i obuwia roboczego oraz właściwych narzędzi i sprzętu
- nadzorowanie przestrzegania przez podległych pracowników przepisów bhp i ochrony środowiska.

Przed przystąpieniem do pracy na obiekcie elektroenergetycznym, zgodnie z *poleceniem*, należy upewnić się o braku napięcia i zabezpieczyć miejsce pracy.

Dopuszczający, zgodnie z *poleceniem*, przygotowuje miejsce pracy dla brygad właściwych wykonujących prace przy urządzeniach i instalacjach energetycznych. Na rysunku 3-5 został przedstawiony schemat obrazujący wydzielenie miejsca pracy.



Rys. 3-5. Schemat organizacyjny miejsca pracy

Jedną z podstawowych czynności jest upewnienie się co do braku napięcia i odpowiednie zabezpieczenie urządzenia poprzez zamontowanie z obu stron zasilania uziemiaczy przenośnych. Następnie należy umieścić tablice informacyjne o miejscu pracy oraz odpowiednio wygrodzić miejsce pracy. Po spełnieniu wszystkich wymogów zawartych w *poleceniu* i upewnieniu się o braku zagrożeń miejsce pracy jest przekazywane brygadam montażowym, z dokonaniem wpisu w *poleceniu*. Każda ze stron ma swój egzemplarz *polecenia* – zarówno dopuszczający, jak i kierujący zespołem pracowników/nadzorujący. Po zakończeniu prac montażowych teren jest przekazywany dopuszczającemu wraz z dokonaniem wpisu w *poleceniu* i dopuszczający likwiduje miejsce pracy. Dopuszczający przystępuje do likwidacji miejsca pracy po upewnieniu się, że wszyscy pracownicy oraz sprzęt opuścili stanowisko pracy, a urządzenie nadaje się do załączenia. Od momentu oświadczenia o zakończeniu prac pracownikom brygad montażowych nie wolno wykonywać żadnych prac.

### Prace przy urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych wg Rozporządzenia Ministra Gospodarki (2013)

Prace przy urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych, w zależności od zastosowanych metod i środków zapewniających bezpieczeństwo pracy, mogą być wykonywane:

- przy całkowicie wyłączonym napięciu
- w pobliżu napięcia
- pod napięciem.

W tabeli 3-1 przedstawiono minimalne odległości od elementów będących pod napięciem, które stanowią zewnętrzne granice strefy pracy pod napięciem oraz pracy w pobliżu napięcia.

**Tabela 3-1.** Minimalne odstępy w powietrzu od nieosłoniętych urządzeń i instalacji elektrycznych lub ich części znajdujących się pod napięciem, wyznaczające zewnętrzne granice strefy prac (*Rozporządzenie Ministra Gospodarki...*, 2013)

Napięcie znamionowe urządzeń kV	Minimalny odstęp w powietrzu wyznaczający zewnętrzną granicę strefy	
	praca pod napięciem mm	praca w pobliżu napięcia mm
≤ 1	bez dotyku	300
3	60	1120
6	90	1120
10	120	1150
15	160	1160
20	220	1220
30	320	1320
110	1000	2000
220	1600	3000
400	2500	4000
750	5300	8400

Prace w pobliżu napięcia powinny być wykonywane z użyciem środków zabezpieczających pracownika, odpowiednich do warunków występujących w miejscu wykonywania pracy.

Prace pod napięciem należy wykonywać z wykorzystaniem odpowiednio dobranej technologii pracy oraz środków ochronnych i narzędzi przewidzianych w instrukcji wykonywania tychże prac.

Najczęściej wykonuje się prace przy urządzeniach wyłączonych spod napięcia.

Prace przy urządzeniach i instalacjach energetycznych mogą być wykonywane tylko z zastosowaniem sprawdzonych metod i technologii. Dopuszcza się wykonywanie prac z wykorzystaniem nowych metod i technologii, jednak pod warunkiem przestrzegania specjalnie dla nich opracowanych instrukcji.

### **Strefy działania maszyn i urządzeń wg normy PN-EN 50341-3**

W pobliżu linii elektroenergetycznej dopuszcza się pracę urządzeń dźwigowych i przeładunkowych, transportowo-przeładunkowych o stałym miejscu lokalizacji, jak również maszyn i urządzeń przeznaczonych do robót ziemnych, maszyn i urzą-

dzeń do eksploatacji i przeładunku kopalni itp. Dla takich urządzeń są wyznaczone strefy działania, ładunku, w których może się poruszać maszyna lub urządzenie.

Strefa działania urządzenia jest to przestrzeń wyznaczona skrajnymi położeniami elementów urządzenia łącznie z przemieszczanym ładunkiem, z uwzględnieniem możliwości rozkołysania. Skrzyżowanie linii elektroenergetycznych z ustalonymi strefami działania maszyn i urządzeń dźwigowych jest dopuszczalne dla linii o napięciu wyższym niż 45 kV tylko wtedy, gdy natężenie pola elektrycznego na obszarze działania dźwigni oraz przy kabinie operatora nie przekracza 10 kV/m, a na odsłoniętych stanowiskach operatorów maszyn nie przekracza 1 kV/m.

W tabeli 3-2 zostały podane minimalne odległości pionowe i poziome ustalonych stref działania maszyn od linii elektroenergetycznych WN.

**Tabela 3-2.** Minimalne odległości poziome i pionowe przewodów linii elektroenergetycznych od ustalonych stref działania dźwigni i urządzeń przeładunkowych, takich jak urządzenia dźwigowo-transportowe, maszyny i urządzenia do robót ziemnych itp. (PN-EN 50341-3-22:2010)

Napięcie znamionowe linii elektroenergetycznej kV	Odległość pozioma przewodu skrajnego nieziemionego linii od ustalonej strefy działania dźwigni lub urządzeń przeładunkowych	Odległość pionowa przewodów linii napowietrznej od ustalonej strefy działania dźwigni lub urządzeń przeładunkowych	
		posiadających przekładnie linowe	nieposiadających przekładni linowych
		co najmniej, m	
> 45 ÷ 110	10	6+Del	3+Del
> 110 ÷ 400	20	8+Del	4+Del

gdzie:

Znamionowe napięcie linii, kV	Del, m
110	0,85
220	1,70
400	2,80

Dźwignice i urządzenia przeładunkowe znajdujące się w mniejszej odległości poziomej od linii niż podano w tabeli 3-2 należy uziemić. Uziemieniem spełniającym warunki normy jest styk między kołami stalowymi jezdnyymi a uziemionymi szynami stalowymi. Jeśli maszyna ma koła gumowe, powinna być wyposażona w łańcuchy elektrostatyczne.



### **Zasady bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych wg *Rozporządzenia Ministra Infrastruktury* (2003)**

Niedopuszczalne jest sytuowanie stanowisk pracy, składowisk wyrobów i materiałów lub maszyn i urządzeń budowlanych bezpośrednio pod napowietrznymi liniami elektroenergetycznymi lub w odległości mniejszej niż:

5 m – dla linii o napięciu znamionowym  $> 1 \div 15$  kV

10 m – dla linii o napięciu znamionowym  $> 15 \div 30$  kV

15 m – dla linii o napięciu znamionowym  $> 30 \div 110$  kV

30 m – dla linii o napięciu znamionowym  $> 110$  kV.

Dźwigi samojezdne, koparki i inne urządzenia ruchome, które mogą zbliżyć się na niebezpieczną odległość do napowietrznych lub kablowych linii elektroenergetycznych, powinny być wyposażone w sygnalizator napięcia.

Eksploatacja urządzenia w odległościach mniejszych niż wyżej wymienione może odbywać się wyłącznie na podstawie polecenia wydanego obsłudze urządzenia przez kierownictwo przedsiębiorstwa zarządzającego urządzeniem elektroenergetycznym WN, z zachowaniem warunków:

- wyłączenia linii spod napięcia i jej skutecznego uziemienia przez eksploatującego tę linię (powinno być widoczne z pozycji pracy obsługującego urządzenie)
- niewyłączenia linii spod napięcia, jeżeli eksploatujący daną linię wyrazi na to zgodę oraz określi warunki techniczne i organizacyjne zapewniające bezpieczną pracę urządzenia oraz zapewni nadzór techniczny.

### **Strefy ochronne dla pracy ludzi wg *Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej* (2002)**

Najwyższe dopuszczalne stężenia i natężenia czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy zostały określone w *Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r.*

W otoczeniu źródeł pól elektromagnetycznych powinny być wyznaczone i oznakowane, zgodnie z Polską Normą, obszary występowania silnych pól elektromagnetycznych jako trzy strefy ochronne:

- niebezpieczna, rozumiana jako obszar, w którym przebywanie pracowników jest zabronione. Są to obszary o wartościach natężenia pola elektrycznego powyżej 20 kV/m oraz obszary o wartościach natężenia pola magnetycznego powyżej 2000 A/m
- zagrożenia, rozumiana jako obszar, w którym dopuszczone jest przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach przez czas ograniczony, pod warunkiem spełnienia wymagań dotyczących dopuszczalnego

wskaźnika ekspozycji. Są to obszary o wartościach natężenia pola elektrycznego  $10 \div 20$  kV/m. W tej strefie doza dopuszczalna pola elektrycznego wynosi  $800$  (kV/m)<sup>2</sup>h. W odniesieniu do natężenia pola magnetycznego są to obszary o wartościach  $200 \div 2\ 000$  A/m. W tej strefie doza dopuszczalna pola magnetycznego wynosi  $0,32$  (kA/m)<sup>2</sup>h

- pośrednia, rozumiana jako obszar, w którym dopuszczone jest przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach w ciągu całej zmiany roboczej. Są to obszary o wartościach natężenia pola elektrycznego  $5 \div 10$  kV/m oraz obszary o wartościach natężenia pola magnetycznego  $67 \div 200$  A/m.

**Obszar poza zasięgiem stref ochronnych jest obszarem strefy bezpiecznej.**

### 3.3. Najczęściej wykonywane prace i wykorzystywane urządzenia

Sieci elektroenergetyczne są bardzo rozległe, a warunki, w jakich pracują – różnorodne, jednakże elektrownie, rozdzielnie i linie energetyczne muszą pracować ciągle, bez przerw. Aby możliwa była praca urządzeń elektroenergetycznych, potrzebne jest nieustanne działanie zakładów zarządzających danymi urządzeniami w zakresie utrzymania obiektów w ruchu. Sieć elektroenergetyczna stale się zmienia, są budowane nowe obiekty, istniejące stare są rozbierane i na ich miejsce powstają nowsze, sprawniejsze urządzenia. Linie i rozdzielnie elektroenergetyczne są poddawane oględzinom, przeglądom, remontom oraz dużym modernizacjom z wykorzystaniem coraz to nowszych rozwiązań technicznych.

Jedną z najczęstszych czynności są naprawy awaryjne i remonty przywracające sprawność urządzeniom pracującym i jeszcze się niekwalifikującym do przebudowy lub modernizacji.

Do najczęściej wykonywanych prac eksploatacyjnych na liniach i rozdzielniach wysokich napięć można zaliczyć takie prace, jak:

- zakładanie oplotu naprawczego na przewody
- wymiana izolatora na linii lub stacji WN
- wymiana mostka prądowego
- naprawa konstrukcji słupa kratowego
- montaż przewodów roboczych i odgromowych
- montaż oszynowania stacji przewodami linkowymi
- wymiana urządzeń pierwotnych na stacji WN

- układanie kabli w kanałach i tunelach kablowych na terenie rozdzielni
- pomiary kontrolne na obiektach WN.

### 3.3.1. Zakładanie oplotu naprawczego na przewody robocze i odgromowe

Przewody robocze i odgromowe są wykonywane jako linka spleciona AFL. Centrycznie jest umieszczona linka stalowa (Fe) nośna, a wokół znajdują się warstwy oplotu z aluminium (Al) lub ze stopów aluminium, który przewodzi prąd elektryczny. Pod wpływem działania sił zewnętrznych czasami dochodzi do uszkodzenia pojedynczych drutów w oplotie aluminiowym zewnętrznym. W takich przypadkach stosuje się złącza naprawcze oplotowe bądź też zaprasowywane.

Złącza zakłada się na przewody z wykorzystaniem podnośnika lub też monter dojeżdża do uszkodzenia na specjalnym wózku przystosowanym do jeżdżenia po przewodach energetycznych.

Jeżeli uszkodzenie warstwy zewnętrznej przewodu nie przekracza 75%, stosuje się oploty naprawcze. Są one przeznaczone do naprawy poza punktem podparcia przewodów AFL i przewodów wyprodukowanych na bazie aluminium. Oploty przywracają pełną przewodność i mechaniczną wytrzymałość przewodu. Oploty chronią przewody AFL i jednorodne przed uszkodzeniem na skutek zgięcia, otarcia i przepalenia od łuku elektrycznego.

### 3.3.2. Wymiana izolatora

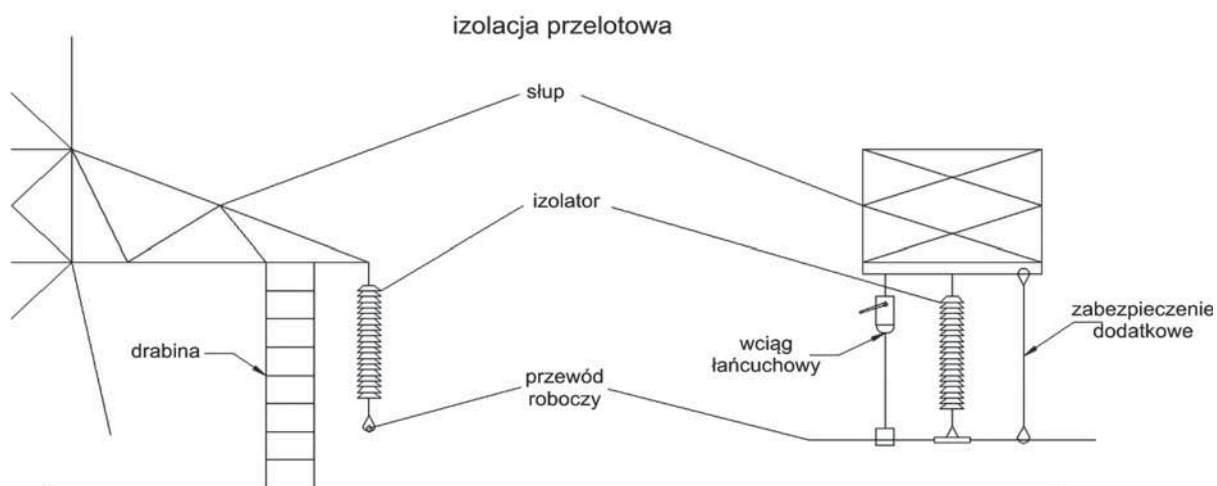
Jednym z najważniejszych elementów linii i stacji elektroenergetycznych jest izolacja. Do prawidłowego działania urządzeń oraz do zapewnienia bezpieczeństwa osób i zwierząt wokół urządzeń niezbędna jest skuteczna izolacja potencjału elektrycznego przewodów roboczych od konstrukcji wsporczych. Izolacja jest realizowana jako izolatory stojące, wiszące lub przepustowe. Stosuje się izolatory: porcelanowe, szklane i kompozytowe.

Podczas pracy urządzeń izolacja jest poddawana wielu czynnikom niszczącym. Wyładowania atmosferyczne, wahania temperatur, występowanie różnicy potencjałów oraz uszkodzenia mechaniczne powodują na co dzień uszkodzenia izolatorów.

Izolatory na liniach wysokich napięć wymienia się z wykorzystaniem podnośników koszowych (jest to droższe rozwiązanie i nie wszędzie samochód ciężarowy może dojechać) lub też specjalnych pomostów montażowych.

Na słupach przelotowych wymiana izolatorów na nowe jest znacznie prostsza technologicznie niż w przypadku słupów odciągowych kończących sekcje nacią-

gowe. Izolatory przelotowe obciążone są praktycznie tylko ciężarem przewodów w przęsłach przyległych. Monterzy wchodzą na stanowiska słupowe i za pomocą wciągu łańcuchowego lub wciągarki uwalniają izolatory, następnie za pomocą linek transportowych są wciągane izolatory bądź też całe łańcuchy izolatorów. Schemat stanowiska wymiany izolacji przelotowej przedstawiono na rysunku 3-6.



**Rys. 3-6.** Miejsce pracy podczas wymiany izolatora przelotowego na linii WN

Na rysunku 3-7 pokazano pracowników wykonujących prace montażowe podczas wymiany izolacji na dwutorowej linii 220 kV.



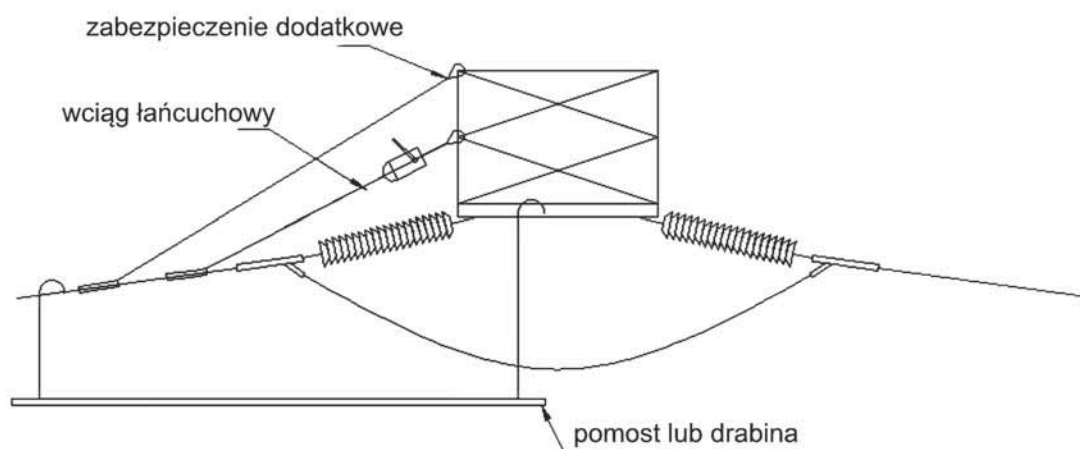
**Rys. 3-7.** Wymiana izolacji na linii 220 kV

Izolatory w łańcuchach odporowych są znacznie trudniejsze do wymiany. Izolacja taka przenosi całą siłę naciągu w sekcji. Odciągowe łańcuchy izolatorów w przypadku uszkodzenia powodują opadnięcie przewodu w całej sekcji, co może prowadzić do złamania lub skrzywienia słupów w całej sekcji odciągowej. Jest to również niebezpieczne dla wszystkich osób i rzeczy znajdujących się pod przewodami. Podczas wymiany izolatorów w łańcuchach odciągowych stosuje się urządzenia większe i o większych parametrach. Na rysunku 3-8 przedstawiono wygląd wciągu łańcuchowego.



Rys. 3-8. Wciąg łańcuchowy

Podobnie jak podczas wymiany izolacji przelotowej monterzy wykonują prace z użyciem podnośników koszowych lub specjalnych pomostów montażowych, zamontowanych poziomo. Za pomocą wciągów łańcuchowych przewód jest podciągany do konstrukcji słupa, aby możliwe było poluzowanie połączeń śrubowych łączników z izolatorami. Następnie poszczególne izolatory są wypinane i za pomocą linek transportowych lub wciągarek są opuszczane na ziemię, a nowe izolatory w to miejsce są wciągane go góry. Monterzy wymieniają poszczególne łączniki i skręcają z nowymi izolatorami. Po zamontowaniu nowych izolatorów naciąg wciągiem łańcuchowym jest luzowany. Następnie monterzy przemieszczają się na przewód kolejnej fazy napięcia celem dalszej pracy. Schemat stanowiska wymiany izolacji odciągowej przedstawiono na rysunku 3-9.



Rys. 3-9. Miejsce pracy podczas wymiany izolacji odciągowej na linii WN



### 3.3.3. Wymiana mostka prądowego

Przewodami roboczymi płynie prąd elektryczny. Jego przepływ powoduje nagrzewanie się przewodów elektrycznych, a w szczególności złączy, uchwytów odciągowych, wszystkich połączeń w torze prądowym. Wysoka temperatura oraz lata pracy powodują zmęczenie materiału, przegrzanie i wypalanie się elementów łączeniowych, co doprowadza do wzrostu rezystancji, a w konsekwencji – do jeszcze większego wzrostu temperatury. Wysoka temperatura jest oznaką wadliwego połączenia i prowadzi do uszkodzenia.

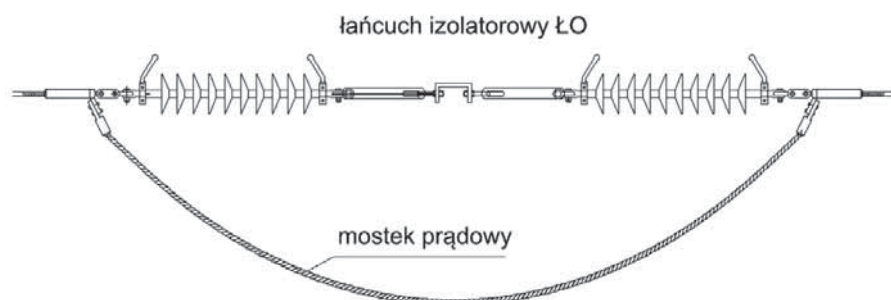
Podczas przeglądów linii prowadzi się obserwację takich miejsc. Nowoczesna technika w postaci kamer termowizyjnych bardzo ułatwia zadanie identyfikacji potencjalnych uszkodzeń w torze prądowym. Służby eksploatacyjne mogą na czas zareagować i naprawić uszkodzony element zanim dojdzie do jego całkowitego zniszczenia. Gdy uszkodzenie przewodu w przęśle międzysłupowym jest duże i niemożliwe jest zastosowanie oplotów naprawczych, wtedy wycina się wadliwe połączenie i wykonuje się nowe złącze zaprasowywane. Złącze zaprasowywane składa się z dwóch tulei. Jedna, łącząca stalowe rdzenie przewodów ze sobą, służy do przenoszenia sił naciągu przewodów, druga, zaprasowywana na płaszczu zewnętrznym przewodu, służy do przewodzenia prądu elektrycznego. Zaprasowywanie złączy wykonuje się prasami hydraulicznymi (rys. 3-10) wyposażonymi w głowice prasujące ze szczękami prasującymi o odpowiednio dobranych rozmiarach.



**Rys. 3-10.** Głowica prasy hydraulicznej (Bellos – PLP, 2010)



Gdy wzrost temperatury występuje na złączach mostków prądowych, wskazana jest ich wymiana w całości. Operację taką najczęściej wykonuje się z drabin montażowych. Monter odkręca stary mostek, po czym monterzy na stanowisku na dole słupa odmierzają stosowną długość przewodu i na końcach zaprasowują praskami hydraulicznymi nowe złączki z końcówkami umożliwiającymi ich dokręcenie do zacisków. Na rysunku 3-11 przedstawiono łańcuch



izolatorów połączony z mostkiem prądowym.

**Rys. 3-11.** Budowa łańcucha odciągowego ŁO linii 110 kV

### 3.3.4. Naprawa konstrukcji słupa kratowego

Konstrukcje wsporcze stosowane w sieciach elektroenergetycznych WN najczęściej mają postać przestrzennych konstrukcji stalowych składających się z kątowników. Sieci średniego napięcia zwykle są zbudowane z konstrukcji żelbetowych. W stacjach elektroenergetycznych konstrukcje wsporcze zazwyczaj są wykonane z profili rurowych, tak jak nieliczne linie WN. Z upływem czasu konstrukcje stalowe poddane czynnikom atmosferycznym korodują. Wiele linii WN przebiega przez tereny rolnicze i silnie zurbanizowane, przez co są narażone na uszkodzenia mechaniczne powstałe od maszyn rolniczych lub budowlanych.

Korodowane i mechanicznie uszkodzone elementy konstrukcji wsporczych naprawia się poprzez wymianę poszczególnych zakratowań bądź też całych słupów.

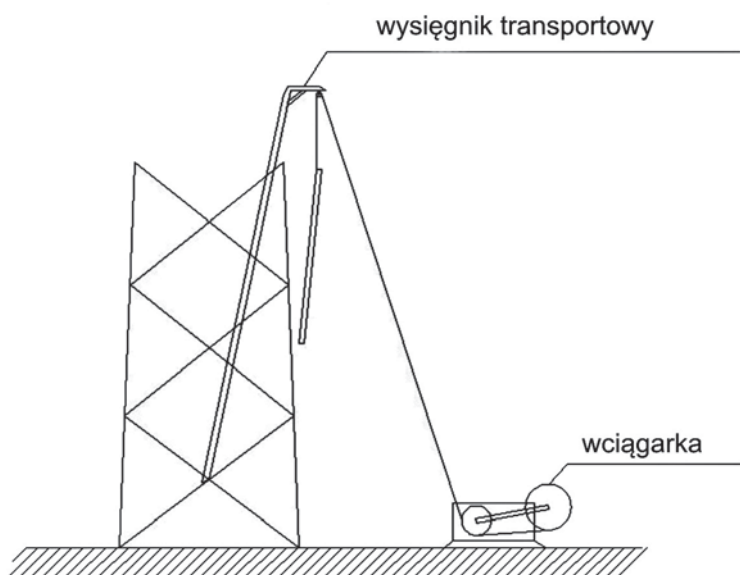
Naprawa drobnego zakratowania słupa energetycznego polega na odkręceniu poszczególnych kątowników i zastąpieniu ich nowymi elementami. Krawężniki główne (tj. podstawowe kątowniki w budowie słupa) oraz duże elementy konstrukcji powinny być wymieniane przez doświadczone brygady. Odkręcenie krawężnika głównego bez odpowiedniego zabezpieczenia konstrukcji może spowodować skręcenie lub nawet złamanie słupa. Nierozważne postępowanie podczas naprawy może zagrażać zdrowiu i życiu monterów, a także osób postronnych przebywających w pobliżu.

Do poważnych napraw, polegających na wymianie całych członów konstrukcji, wykorzystuje się dźwigi celem podtrzymania konstrukcji i zrównoważenia sił

działających podczas braku części zakratowania. Do tak poważnych prac należy się dobrze przygotować na podstawie dokumentacji technicznej sporządzonej przez projektanta. Naprawiane elementy należy zamówić, zgodnie z dokumentacją, w specjalistycznym przedsiębiorstwie. Do omawianych prac używa się dużych dźwigów, podnośników koszowych, jak również różnego rodzaju kluczy ręcznych i elektrycznych.

Wymieniając człon słupa, np. przelotowego, należy najpierw opuścić przewody robocze i odgromowe. Słup jest zaczepiany przez atestowane zawiesia w miejscach do tego przeznaczonych. Operator dźwigu cały czas kontroluje stopień unoszenia konstrukcji. Monterzy z poziomu podnośnika koszowego lub bezpośrednio stojąc na konstrukcji słupa odkręcają śruby łączące słup z wymienianym elementem. Na każdym z krawężników są zamontowane liny asekuracyjne do korygowania pionowości słupa. Po zdjęciu górnego elementu i części wymienianej słupa następuje montaż nowego członu. Na koniec dźwigiem ponownie wstawia się górny element słupa, który jest skręcony w jedną całość. Dopiero po całkowitym dokręceniu wszystkich śrub można przystąpić do ponownego montażu przewodów.

Montaż i posadowienie nowego słupa można wykonać na kilka sposobów. Jednym z nich jest montaż pionowy, klasyczny, stosowany na całym świecie. Monterzy montują całą konstrukcję kątownik po kątowniku, z wykorzystaniem wysięgników



transportowych i wciągarki. Schemat montażu słupa metodą wysokościową pokazano na rysunku 3-12.

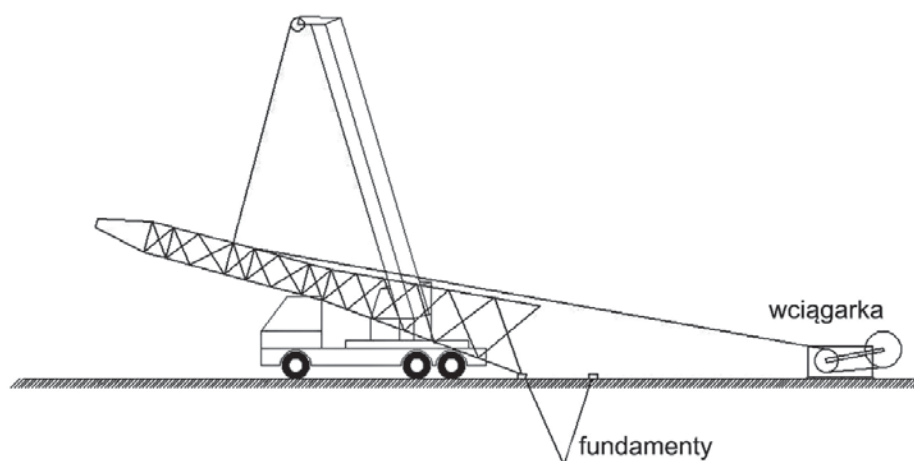
**Rys. 3-12.** Sposób wysokościowego montażu słupa

Innym sposobem stawiania słupów jest metoda obrotowa. Jest ona realizowana dwuetapowo:

- pierwszy etap: montaż poziomy słupa w pozycji leżącej
- drugi etap: stawianie – obrotowe podniesienie słupa do pozycji pionowej.

W Polsce metoda obrotowa jest podstawową metodą stawiania słupów. Jeżeli miejsca jest wystarczająco dużo, słupek jest montowany w pozycji leżącej z wykorzystaniem podstawowych kluczy oraz – tam gdzie to konieczne – z wykorzystaniem małego dźwigu typu żuraw lub coraz częściej typu HDS (hydrauliczny dźwig samochodowy). Po zmontowaniu słupa jego wierzchołek jest wynoszony do góry za pomocą dźwigu lub „nożyc” (tj. rusztowania specjalnej konstrukcji służącego do podniesienia słupa), następnie wciągarka przejmuje pionowanie słupa i dociąga go do pozycji pionowej.

Sposób stawiania słupa metodą obrotową pokazano na rysunku 3-13.



**Rys. 3-13.** Obrotowe stawianie słupa

Pośrednim sposobem stawiania słupa jest montaż poziomy słupa na ziemi, następnie, z wykorzystaniem dwóch dźwigów, ustawienie konstrukcji do pionu. Metodę stawiania słupa z wykorzystaniem dwóch dźwigów pokazano na rysunku 3-14.



**Rys. 3-14.** Stawianie słupa 110 kV z wykorzystaniem dwóch dźwigów

### 3.3.5. Montaż przewodów roboczych i odgromowych

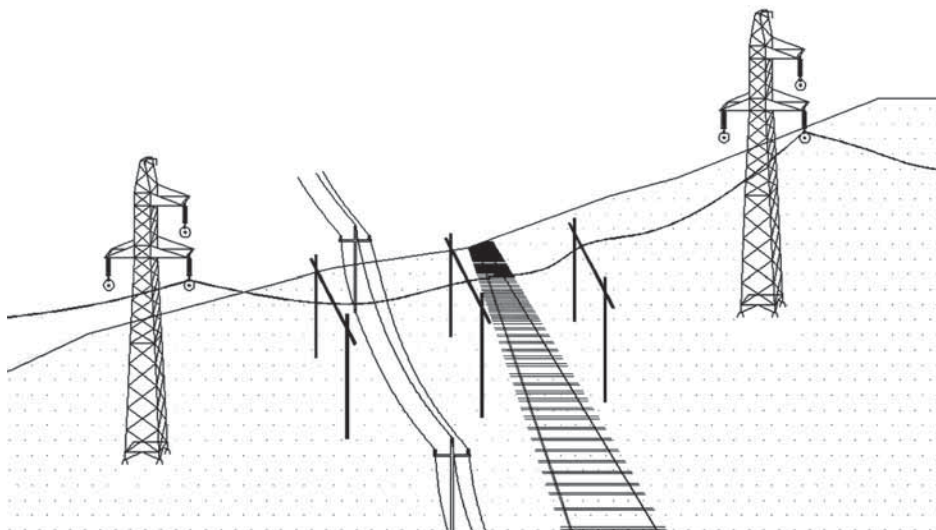
Przewody energetyczne sieci WN prawie wyłącznie są zbudowane z linek stalowo-aluminiowych. Obecnie buduje się coraz więcej linii z przewodami ze stopów aluminium. Często w stacjach elektroenergetycznych zamiast przewodów wykorzystuje się szynoprzewody gołe lub izolowane SF<sub>6</sub> (sześćfluorek siarki, inna nazwa: heksafluorek siarki – nieorganiczny związek chemiczny o bardzo dobrych własnościach dielektrycznych. Jest bezbarwny, bez smaku i zapachu, ok. 6 razy cięższy niż powietrze).

Przewody energetyczne pod wpływem sił naciągu i działającej na nie zmiennej temperatury ulegają odkształceniu. Jeżeli przewody wydłużą się („popłyną”) za bardzo, to mogą niebezpiecznie zbliżyć się do obiektów na ziemi. Należy wtedy wykonać regulacje przewodów do właściwego poziomu dla danej linii. W czasie silnych wiatrów w obszarach zalesionych niejednokrotnie dochodzi do wywrócenia się drzew sąsiadujących z liniami energetycznymi, w konsekwencji do uszkodzenia przewodów elektrycznych.

Trwałość linii elektroenergetycznych szacuje się na ok. 30 lat, po tym czasie należy je zmodernizować. Ważnym czynnikiem podejmowania decyzji o remoncie są regularne obchody i przeglądy, które dają obraz procesu starzenia się urządzeń elektroenergetycznych.

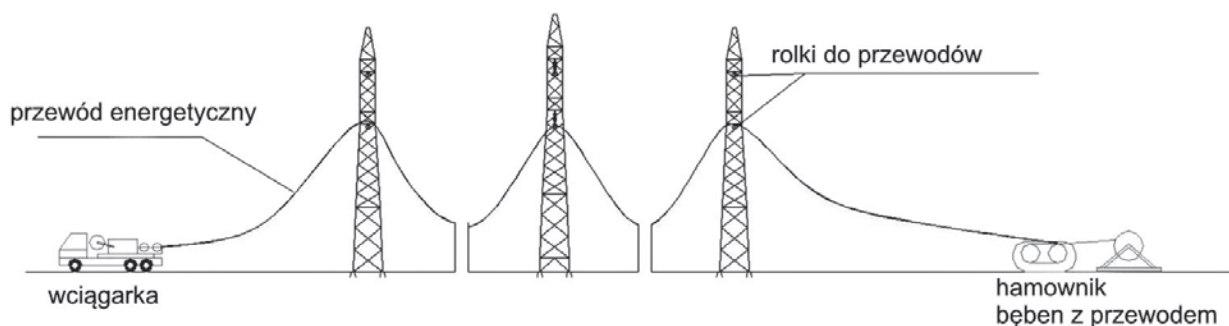
Przewody elektryczne zawieszają się osobno dla każdej sekcji odciągowej. Sekcja odciągowa składa się z dwóch słupów mocnych odciągowych na skrajach sekcji i ze słupów przelotowych podtrzymujących przewody w środku sekcji.

Przystępując do montażu przewodów w danej sekcji, należy najpierw dobrze się zapoznać z topografią terenu, nad którym przebiega linia. Należy zwrócić szczególną uwagę na wszystkie obiekty krzyżowane z torem linii i odpowiednio je zabezpieczyć oraz wyłączyć z ruchu. Do zabezpieczania obiektów krzyżowanych stosuje się bramki poprzeczne. Sposób rozmieszczania bramek skrzyżowaniowych przedstawiony został na rysunku 3-15.



**Rys. 3-15.** Przykład zabezpieczania obiektów krzyżowanych w trakcie montażu przewodów

Słupy odciągowe kotwi się do ziemi za pomocą lin stalowych jednym końcem przymocowanych do słupów, a drugim do fundamentów tymczasowych. Przy tak zabezpieczonej sekcji można przystąpić do montażu przewodów. Najpierw montowane są izolatory wraz z rolkami montażowymi na słupach przelotowych. Następnie jest przeciągana i rozwijana linka wstępna. Do przeciągania nowych przewodów wykorzystuje się zestaw wciągarka – hamownik. Z jednej strony sekcji jest ustawiony hamownik wraz z bębniem i rozwieszonym przewodem, a z drugiej – wciągarka. Wciągarka nawija linkę wstępną połączoną z przewodem i w ten sposób przeciąga przez wszystkie słupy aż do końca sekcji do słupa odciągowego. Przeciąganie przewodu w sekcji odbywa się pod naprężeniem, to znaczy bez opuszczania przewodu na ziemię przewód jest przeciągany w górze ponad obiektami krzyżowanymi. Sposób montażu przewodów roboczych został przedstawiony na rysunku 3-16.



Rys. 3-16. Sposób rozwieszania przewodów

Po przeciągnięciu przewodu na całej długości przewód jest „wizowany”, tzn. w przęsłach pomiarowych monter mierzy zwis przewodu. Wciągarka podciąga lub popuszcza przewód do momentu zgodności zawieszenia przewodu z dokumentacją. Poprawnie wyregulowany zwis przewodów umożliwia zamontowanie go na stałe w sekcji odciągowej. Po zakończeniu montażu przewodu w sekcji odciągowej wykonuje się mostki prądowe na słupach odporowych.

### 3.3.6. Montaż oszynowania stacji z przewodami linkowymi

Przed montażem oszynowania górnego muszą być kompletnie zmontowane i ustawione konstrukcje wysokie, na których oszynowanie ma być zawieszone. Poza tym należy uziemić konstrukcje, wykonać zakotwienie poprzeczników, zamontować na poprzeczkach wieszaki śrubowo-kabłąkowe wraz z odpowiednimi łącznikami.

Następnie należy rozwinąć przewody między bramkami, na których ma być zawieszony oszynowanie. W czasie rozwijania przewód należy zabezpieczyć przed uszkodzeniem o kamienie lub beton, a brygadzysta powinien kontrolować stan tech-



niczny przewodu. Przewód nie może mieć pękniętych drutów. Przewodów nie wolno łączyć w przęśle za pomocą złązek.

Czynność rozwijania i przecinania powtarza się tyle razy, ile odcinków przewodów ma być zawieszonych w danym przęśle.

### 3.3.7. Wymiana urządzeń pierwotnych na stacji WN

Urządzenia obwodów pierwotnych, umiejscowione na rozdzielniach elektroenergetycznych, są zbliżone budową do elementów liniowych. W ziemi są montowane fundamenty prefabrykowane lub lane na mokro (betonowane na miejscu). Na fundamentach jest ustawiona konstrukcja wsporcza. Na konstrukcji wsporczej jest zamontowana aparatura. Aparatura jest połączona ze sobą za pomocą oszynowana lub przewodami.

Konstrukcje stosowane w elektroenergetycznych rozdzielniach napowietrznych dzielą się na dwie podstawowe grupy:

- konstrukcje pod aparaturę
- konstrukcje wysokie: słupy, wieże ochrony odgromowej i maszty antenowe.

Konstrukcje pod aparaturę charakteryzują się niewielkimi rozmiarami, na plac budowy mogą być dostarczone w całości lub w elementach. Do ich montażu i ustawienia stosuje się żurawie samochodowe typu HDS. Konstrukcje wysokie natomiast składają się z członów, których elementy mogą być wcześniej pospawane lub są skręcane dopiero na terenie rozdzielni. Konstrukcje wysokie na terenie rozdzielni stawia się metodą wysokościową lub obrotową, pod warunkiem dysponowania dużą ilością miejsca umożliwiającą bezpieczną pracę.

Montaż konstrukcji wysokich oraz konstrukcji pod aparaturę można podzielić na następujące etapy:

- roboty ziemne
- roboty betonowe lub ustawienie fundamentów prefabrykowanych
- montaż i ustawienie konstrukcji
- pomiary i odbiór konstrukcji.

W celu zapewnienia właściwych warunków montażu aparatury i urządzeń wysokiego napięcia niezbędne jest wykonanie montażu aparatury i urządzeń zgodnie z dokumentacją techniczną oraz fabryczną instrukcją montażu urządzenia.

Podczas montażu wyłącznika z izolacją z SF<sub>6</sub> prace wykonuje się w następującej kolejności:

- montaż konstrukcji wsporczej na fundamencie z zastosowaniem dźwigu
- montaż napędu wyłącznika i przykręcenie go do ramy podstawowej
- montaż środkowego bieguna (kolumny) na ramie podstawowej

- montaż pozostałych skrajnych biegunów
- montaż mechanizmu przenoszenia napędu
- montaż instalacji gazowej SF<sub>6</sub>
- podłączenie uziemienia
- montaż przyłączy prądowych
- montaż i przyłączenie kabli
- napełnienie kolumn gazem
- wykonanie rozruchu urządzenia.

Montaż pozostałej aparatury pierwotnej jest podobny do montażu wyłącznika.

### Zasady bezpieczeństwa przy urządzeniach zawierających SF<sub>6</sub>

W stacjach, w których są wykorzystywane urządzenia z SF<sub>6</sub>, nie wolno palić tytoniu.

W pomieszczeniach, gdzie istnieje prawdopodobieństwo gromadzenia się gazu SF<sub>6</sub>, nie wolno stosować urządzeń z otwartym grzejnikiem, spawać ani używać urządzeń, których temperatura przekracza 200 °C (*Instrukcja montażu L200/2000*).

W razie stwierdzenia:

- obniżenia się ciśnienia (gęstości) gazu poniżej wielkości dopuszczalnej
- ostrego i nieprzyjemnego zapachu siarkowodoru (zgniłych jaj)
- białego proszku obok urządzeń z SF<sub>6</sub>
- uszkodzonej obudowy

należy niezwłocznie opuścić stację oraz nie dopuścić do przebywania w jej pobliżu osób postronnych i poinformować dyżurnego służby dyspozytorskiej, która sprawuje operatywne kierownictwo nad siecią.

#### **W razie pożaru stacji z izolacją SF<sub>6</sub>:**

- nie wolno pracownikom eksploatacji gasić pożaru urządzeń zawierających SF<sub>6</sub>, lecz muszą oni niezwłocznie wezwać straż pożarną, nie dopuszczając do zbliżenia się osób postronnych
- przybyłą straż pożarną należy powiadomić o obecności gazu SF<sub>6</sub> w urządzeniach.

### 3.3.8. Układanie kabli w kanałach i tunelach kablowych

Przystępując do układania kabli w kanałach kablowych, należy uważać na urządzenia będące pod napięciem. Po rozdzielni mogą się poruszać tylko pracownicy ze stosownymi uprawnieniami, którzy otrzymali odpowiednie *polecenie*. Posiadając *polecenie*, należy poruszać się tylko w strefie wyznaczonej i oznaczonej zgodnie z *pole-*

*ceniam*. Kierujący zespołem pracowników wyznacza trasę układania kabli, po czym pracownicy odsłaniają kanały kablowe i przystępują do rozwijania i układania kabli.

Kable w kanałach kablowych i tunelach układa się na półkach stalowych przytwierdzonych do ścian kanału czy tunelu. Można je również układać na dnie kanału czy tunelu. W kanałach lub tunelach kable ułożone na półkach nie powinny przylegać do ścian. Odległość kabla od ściany powinna wynosić co najmniej 1 cm (Kotlarski, 1997).

Kable prowadzone w kanałach kablowych i tunelach powinny być rozmieszczone wg następującej kolejności, licząc od dna kanału lub tunelu:

- kable sterowniczo-sygnalizacyjne
- kable elektroenergetyczne na napięcie do 1 kV
- kable elektroenergetyczne na napięcie  $> 1$  kV.

Kable w kanałach kablowych należy prowadzić po jednej stronie kanału na półkach kablowych. W tunelach można prowadzić kable po obydwu stronach. Wtedy grupuje się kable o jednakowym napięciu po jednej stronie tunelu.

Kable w kanałach kablowych i tunelach należy układać na konstrukcjach stalowych bez przytwierdzania do tych konstrukcji. Podparcie swobodnie ułożonych kabli wymuszone jest odległościami podpór zamocowanych do ściany zgodnie z projektem wykonawczym. Możliwe jest również mocowanie kabli do ścian za pomocą uchwytów. Uchwyty te powinny być szerokości równej co najmniej zewnętrznej średnicy kabla. Odległości między miejscami zamocowania lub zawieszenia kabla powinny być tak dobrane, aby kable się nie załamywały i nie były nadmiernie obciążone naciągami.

W kanałach kablowych i tunelach należy unikać krzyżowania się kabli.

Kable w budynku układa się:

- w kanałach kablowych pod poziomem podłogi
- na konstrukcjach stalowych (półki kablowe, drabinki), przymocowanych do ścian lub stropów
- bezpośrednio przy ścianach i pod sufitem, przytwierdzone uchwytami i wieszakami
- w rurach lub blokach kablowych, ułożonych pod poziomem podłogi.

### 3.3.9. Pomiary kontrolne na obiektach WN

Pomiary na liniach WN ograniczają się głównie do pomiaru rezystancji uziemień. Rezystancja uziemień linii 110 kV powinna wynosić nie więcej niż 10  $\Omega$ , na liniach 220 kV i 400 kV – 15  $\Omega$  (PN-EN 50341-3-22:2010). Rezystancja uziemienia ma wpływ na prawidłową pracę linii oraz bezpieczeństwo osób przebywających

w pobliżu stanowisk słupowych. Uziemienie jest wykonane z ocynkowanego płaskownika (tzw. bednarki), ułożonego w gruncie wokół fundamentów słupa na głębokości ok. 80-120 cm. Do otoku z bednarki jest przymocowany metalicznie uziom pionowy, wykonany z prętów stalowych miedziowanych. Otok z bednarki jest połączony z każdym krawężnikiem „nogi” słupa. Taśma stalowa ma tendencję do korozji. Wykonując przegląd linii, mierzy się wartość rezystancji uziemienia każdego słupa. Do wykonania pomiarów używa się mierników pomiarowych połączonych z tymczasowymi sondami pomiarowymi.

Na stacjach elektroenergetycznych, podobnie jak na liniach, wykonuje się pomiary rezystancji uziemienia. Dodatkowo na stacjach i na wybranych stanowiskach linii elektroenergetycznych przechodzących przez tereny gęsto zaludnione wykonuje się pomiary napięć rażeniowych. Napięcie rażeniowe jest to napięcie, które może się pojawić na metalowych uziemionych elementach urządzenia, podczas awarii urządzenia. Do pomiarów napięć rażeniowych wykorzystuje się wymuszalnik napięcia. Do metalowego ogólnodostępnego elementu urządzenia w sposób kontrolowany przykładana się napięcie. Za pomocą specjalnych sond pomiarowych mierzy się występujące napięcie. Porównując pomiary z poziomem spodziewanych wartości podczas awarii określa się maksymalny poziom napięcia rażeniowego.

### **3.3.10. Kontrola i uzupełnianie oleju izolacyjnego w urządzeniach energetycznych**

W stacjach elektroenergetycznych wysokich napięć występują urządzenia, w których izolację elektryczną stanowi mineralny olej izolacyjny. Jest on używany w takich urządzeniach, jak:

- transformatory
- dławiki
- rezystory uziemiające
- przekładniki.

Podstawą poprawnej pracy tych urządzeń jest dobry stan oleju. Zatem urządzenia należy kontrolować pod względem ilości i jakości oleju. Z urządzeń spuszcza się próbki oleju celem określenia jego stanu. Jeżeli z badań wyniknie konieczność wymiany oleju, należy pamiętać, aby urządzenie przebywało jak najkrócej bez oleju lub było odpowiednio zabezpieczone przed zawilgoceniem. Podczas spuszczenia oleju z urządzenia należy dobrze zabezpieczyć naczynie i okolice wylotu spustowego, aby wymieniany olej nie dostał się do gleby. Jeżeli podczas przeglądu urządzenia zostanie zaobserwowane pogorszenie jakości oleju izolacyjnego, możliwe jest jego oczyszczenie i ponowne zastosowanie. Wykorzystuje się do tego dwie metody:

filtrację lub wirowanie. Gdy olej jest zbyt zanieczyszczony, należy go wymienić na nowy. Przed przystąpieniem do wymiany bądź oczyszczania oleju należy najpierw zapoznać się z dokumentacją techniczno-ruchową urządzenia.

Bardzo ważne, aby podczas prac zachować szczególną uwagę. Olej izolacyjny jest:

- materiałem łatwopalnym
- rozpuszcza gumę naturalną i niektóre gumy syntetyczne
- jest substancją ropopochodną, więc należy dopilnować, aby nie dostał się do środowiska naturalnego.

Istotnym parametrem oleju izolacyjnego jest jego czystość oraz brak wody, zatem należy podczas prac zwracać uwagę, aby nie zanieczyścić oleju, ani nie doprowadzić do działania wilgoci.

### **3.4. Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia związane z wykonywanymi pracami**

Podczas prowadzenia prac budowlano-montażowych przy urządzeniach elektroenergetycznych monterzy są narażeni na liczne zagrożenia zdrowia i życia. Niejednokrotnie monterzy pracują w terenie, z dala od miejscowości, są narażeni na działanie zmiennych warunków atmosferycznych, praca odbywa się cały rok. Urządzenia stacyjne i liniowe są dużych gabarytów – istnieje więc ryzyko przygniecenia. Bardzo często stanowiska pracy znajdują się w pobliżu urządzeń znajdujących się pod napięciem. Prace eksploatacyjne wiążą się z pracą na wysokości. Urządzenia w skrajnych przypadkach są w kiepskim stanie fizycznym, co grozi złamaniem poszczególnych elementów. Podczas wykonywania remontów lub napraw wykorzystywane są maszyny hydrauliczne: dźwigi, podnośniki koszowe. Na co dzień pracownicy korzystają z maszyn i urządzeń ręcznych zasilanych energią elektryczną. Energia elektryczna pochodzi z agregatów, gdy nie ma w pobliżu gniazd wtyczkowych elektrycznych. Prace eksploatacyjne na sieciach elektroenergetycznych WN są prowadzone w różnych dziedzinach budownictwa i energetyki – począwszy od wykopów, poprzez montaż konstrukcji wsporczych, montaż aparatury, elektroniki zabezpieczeniowej i sterującej, a skończywszy na obsłudze urządzeń.

Podstawowe zagrożenia występujące na budowie:

- upadek pracownika z wysokości ponad 3 m
- przygniecenie przenoszonym przez żuraw elementem konstrukcji
- uderzenie w głowę spadającym elementem (takim jak śruba, nakrętka, klucz)



- porażenie prądem elektrycznym
- uszkodzenie wzroku opiłkiem metalu
- potrącenie przez pojazd podczas prac w obrębie pasa drogowego
- praca w pobliżu czynnej napowietrznej linii elektroenergetycznej – indukcja napięcia na elementach metalowych oraz narażenie na oddziaływanie pól elektrycznych i magnetycznych
- upadek pracownika lub osoby postronnej do wykopu
- zasypanie pracownika lub osoby postronnej w wykopie
- potrącenie pracownika lub osoby postronnej przez pracujące maszyny
- kolizja z podziemnymi urządzeniami typu: linie energetyczne, gazociągi, wodociągi itp.

### **3.5. Profilaktyka zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia w praktyce codziennej**

Zagrożenia występujące podczas prowadzenia prac eksploatacyjnych należy bezwzględnie eliminować bądź ograniczać do minimum.

Najważniejsze jest bezpieczeństwo pracowników. Jednym z istotniejszych elementów dbania o bezpieczeństwo pracowników jest opracowanie bezpiecznych technologii wykonywania prac na poszczególnych stanowiskach pracy. Kolejnym ważnym środkiem zmniejszania ryzyka wypadków jest częste i gruntowne szkolenie pracowników pod względem bhp i technologii wykonywania prac. Ponadto pracownicy muszą być wyposażeni w środki ochrony indywidualnej i zbiorowej.

Należy również pamiętać, aby nie używać uszkodzonych, niesprawdzonych urządzeń i maszyn, mieć stosowne uprawnienia do wykonywania prac na instalacjach i urządzeniach energetycznych.

W celu ograniczenia ryzyka powstawania wypadków należy przestrzegać następujących zasad:

- do montażu konstrukcji stosować zawiesia atestowane
- pod liny zawiesi, szczególnie przy przenoszeniu dużych elementów konstrukcji, stosować podkładki uniemożliwiające przetarcie i uszkodzenie liny
- podczas montażu konstrukcji na wysokości nie mogą pod skręcanym elementem przebywać pracownicy
- pracownicy muszą być wyposażeni w kaski ochronne i indywidualny sprzęt chroniący przed upadkiem z wysokości, na wysokości do 3 m powinni stosować wyłącznie szelki ochronne z linką, bez amortyzatora

- podczas przecinania przewodów energetycznych stosować okulary ochronne
- w celu wyeliminowania zagrożenia porażeniem prądem prace prowadzić na linii wyłączonej spod napięcia i uziemionej zgodnie z posiadanym poleceniem
- podczas wykonywania prac związanych z przekroczeniem istniejących linii energetycznych linie te powinny być wyłączone
- kierownik robót, przed przystąpieniem do pracy w pobliżu linii WN, ma obowiązek upewnić się o braku napięcia w linii
- prace w pasie drogowym, przy skrzyżowaniu z drogami i ulicami muszą być uzgodnione z właścicielem drogi, poprzez (jeśli to konieczne) sporządzenie projektu organizacji ruchu
- podczas prowadzenia prac pod linią WN z wykorzystaniem sprzętu budowlanego linia energetyczna musi być wyłączona
- każdy zespół pracowników (brygada) musi być wyposażony w apteczkę pierwszej pomocy, łączność radiotelefoniczną i telefon komórkowy, umożliwiające łączność z kierownikiem budowy i służbami ratowniczymi, jak też ewentualną ewakuację w przypadku zagrożenia
- wszystkie prace prowadzić zgodnie ze szczegółowymi instrukcjami montażu (dla każdego asortymentu robót), zatwierdzonymi i przyjętymi do stosowania
- do wszystkich prac stosować jedynie sprawne i zgodne z technologią narzędzia i urządzenia
- dźwigi i inne urządzenia podlegające dozorowi technicznemu UDT (Urząd Dozoru Technicznego) muszą mieć potwierdzenie aktualnych przeglądów i być sprawne technicznie, a operatorzy posiadać odpowiednie uprawnienia.

## Bibliografia

- Bellos – PLP (2010) *Instrukcja montażu sprzętu zaprasowywanego*. [www.bellos-plp.com.pl](http://www.bellos-plp.com.pl)
- Instrukcja montażu L104/2000. Montaż i stawianie wysokościowe słupów linii napowietrznych i wysokich wież wolnostojących* (2000) Warszawa, Towarzystwo Projektowo-Wykonawcze Budownictwa Elektroenergetycznego.
- Instrukcja montażu L105/2000. Przewody linii wysokiego napięcia budowa i remont linii* (2000) Warszawa, Towarzystwo Projektowo-Wykonawcze Budownictwa Elektroenergetycznego.

*Instrukcja montażu L200/2000. Montaż i ustawianie konstrukcji wsporczych, aparatury i urządzeń na stacjach elektroenergetycznych (2000) Warszawa, Towarzystwo Projektowo-Wykonawcze Budownictwa Elektroenergetycznego.*

Kotlarski W. (1997) *Sieci elektroenergetyczne*. Warszawa, WSiP.

Musiał E. (1998) *Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne*. Warszawa, WSiP.

*Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. DzU 2002, nr 217, poz. 1833, ze zmianami.

*Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych*. DzU 2003, nr 47, poz. 401.

*Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 marca 2013 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych*. DzU 2013, poz. 492.

PN-EN 50341-3-22:2010 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Cz. 3.: Zbiór normatywnych warunków krajowych*.

# 4. Psychofizyczne obciążenia pracowników przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Joanna Bugajska, Anna Łuczak, Tomasz Tokarski

4.1. Charakterystyka środowiska pracy (77)	4.3. Przykładowe profile obciążenia wysiłkiem fizycznym (91)
4.2. Obciążenie wysiłkiem fizycznym (79)	4.4. Obciążenie psychiczne (99)
4.2.1. Rodzaje wysiłku (79)	4.4.1. Czynniki środowiska pracy (99)
4.2.2. Metody oceny obciążenia fizycznego (80)	4.4.2. Wymagania pracy (cechy krytyczne i przydatne) (103)
4.2.2.1. Metody oceny obciążenia dynamicznego (80)	Bibliografia (107)
4.2.2.2. Metoda oceny obciążenia statycznego (86)	
4.2.2.3. Metoda oceny obciążenia podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków (88)	

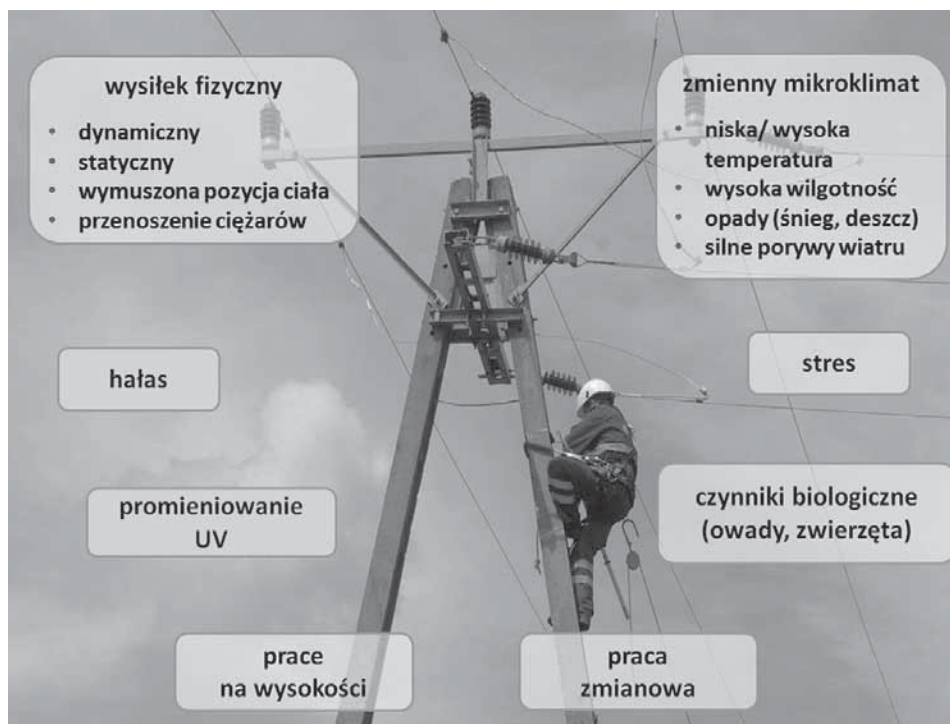
## 4.1. Charakterystyka środowiska pracy

Przystępując do omawiania psychofizycznych czynników obciążających pracownika podczas wykonywania prac związanych z obsługą sieci elektroenergetycznych, należy zwrócić uwagę na ich złożoność. Elektromonter może być zatrudniony przy budowie linii elektroenergetycznej, trakcyjnej lub telekomunikacyjnej, w pogotowiu energetycznym, także przy oględzinach, przeglądach, remontach, konserwacji i naprawach różnego typu linii. Prowadzenie linii elektrycznych może się odbywać w terenie zabudowanym, np. w mieście wzdłuż ulic i w sąsiedztwie ruchu ulicznego, ale również w terenie otwartym, gdzie trasa linii przebiega przez pola, łąki lub obszar leśny (Barańska, 1998). Różnorodność czynności roboczych, pory dnia i roku oraz miejsca ich wykonywania determinuje wieloczynnikowy charakter obciążenia pracownika (rys. 4-1).

Przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia (WN) dominuje obciążenie wysiłkiem fizycznym dynamicznym (podczas przemieszczania się po terenie w celu dojścia do miejsca robót) oraz wysiłkiem fizycznym statycznym (związanym z koniecznością utrzymania pozycji ciała podczas wykonywania napraw czy konserwacji). Istotnym elementem obciążającym podczas tych prac jest również podnoszenie, przenoszenie ładunków (narzędzi, części do wymiany itp.). Obciążenie wysiłkiem fizycznym wiąże się z istotnym kosztem energetycznym organizmu oraz z obciążeniem układu mięśniowo-szkieletowego.

Niezależnie od rodzaju wykonywanych czynności praca elektromontera linii energetycznych przeważnie odbywa się na otwartej przestrzeni. W związku z tym jednym z istotnie obciążających fizycznych czynników środowiska pracy są

zmienne warunki pogodowe: niska lub wysoka temperatura powietrza, opady atmosferyczne (deszcz, śnieg), silne porywy wiatru, bezpośrednia ekspozycja na promienie słoneczne i zmienna wilgotność powietrza. Narażenie na zmienne warunki pogodowe wiąże się z ryzykiem przeziębień, odmrożeń lub udarów ciepłych i omdleń (Romanowska-Słomka i Słomka, 2007). Z pracą na otwartej przestrzeni, szczególnie w jesiennej i zimowej porze roku, związana jest konieczność noszenia odzieży ochronnej, co wywiera również wpływ na obciążenie fizyczne (odzież taka stanowi dodatkowy ciężar).



Rys. 4-1. Wieloczynnikowy charakter narażenia pracowników podczas obsługi sieci WN

W związku z tym, że praca elektromontera linii energetycznych odbywa się w różnych porach doby i roku, istotnie obciążającym czynnikiem obecnym w fizycznym środowisku pracy jest narażenie na naturalne promieniowanie UV. Z pracą w nocy wiąże się narażenie na niedostateczne oświetlenie, które może wynikać z braku lub złego doboru źródła światła lub złego doboru opraw oświetleniowych (Bryła, 2007). Z kolei pracom wykonywanym w mieście, w pobliżu ruchliwych ulic towarzyszą hałas i wibracje. Praca w terenie zalesionym wiąże się z innym fizycznym czynnikiem zagrożenia, jakim jest kontakt z owadami (osy, komary), których ukąszenie może wywoływać alergię. Kontakt zaś ze zwierzętami (psy, dziki, wilki) może doprowadzić do ciężkich uszkodzeń ciała. Do zagrożeń związanych z fizycznym środowiskiem pracy elektromontera należą także choroby, jak np. borelioza i kleszczowe zapalenie mózgu, wywołane ukłuciem kleszczy, oraz tężec, wściekliźna i zgorzel gazowa, których źródłem jest kontakt z glebą lub ze zwierzętami po uprzednim zranieniu (Romanowska-Słomka i Słomka, 2007).



Bardzo istotnym czynnikiem środowiska pracy pracowników przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN jest obciążenie psychiczne i stres, wynikające między innymi z pracy w ciągłej gotowości, pracy na wysokości, pracy zmianowej.

W niniejszym rozdziale zostanie omówione obciążenie pracowników przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN powodowane przez wysiłek fizyczny i czynniki psychiczne.

## 4.2. Obciążenie wysiłkiem fizycznym

### 4.2.1. Rodzaje wysiłku

Obciążenie wysiłkiem fizycznym pracowników w środowisku pracy nie jest pojęciem jednoznacznym. W kontekście oceny ryzyka zawodowego obciążenie fizyczne rozpatruje się jako obciążenie wynikające z wykonywania:

- wysiłku fizycznego dynamicznego
- wysiłku fizycznego statycznego
- wysiłku monotypowego
- czynności podnoszenia i przenoszenia ciężarów.

Aktywność mięśni podczas typowych wysiłków statycznych i dynamicznych różni się w zasadniczy sposób. Najbardziej istotną cechą tej różnicy jest odmienny w obu wypadkach charakter skurczu mięśniowego. Podczas wysiłku dynamicznego skurcz odbywa się naprzemiennie z udziałem zginaczy i prostowników, tj. antagonistycznych grup mięśniowych. W ten sposób mięsień uczestniczący w pracy, po okresie krótkotrwałego skurczu, powraca do stanu wyjściowego i reakcja skurczowa może być powtórzona. Ma to duże znaczenie z punktu widzenia przemian metabolicznych zachodzących w pracującym mięśniu. Naprzemienne stany skurczu i rozkurczu nie utrudniają krążenia krwi i wymiany składników między dopływającą krwią i pracującymi mięśniami. Mimo intensywnej pracy dostarczanie tlenu i składników odżywczych oraz usuwanie dwutlenku węgla i innych produktów rozpadu może się odbywać bez trudności nawet przez długi czas (Kirschner, 2007). Typową reakcją ogólnoustrojową na obciążenia dynamiczne jest wzrost aktywności układu krążenia (częstości skurczów serca, objętości wyrzutowej, ciśnienia tętniczego krwi) oraz zużycia tlenu wprost proporcjonalnie do intensywności wysiłku (wydatku energetycznego). Obciążenie organizmu podczas pracy dynamicznej jest wyrażane w kilokaloriach lub kilodżulach (kcal, kJ).

Inna jest sytuacja podczas wysiłku statycznego. Długotrwałe napięcie mięśnia, poprzez ucisk na naczynia krwionośne, utrudnia swobodny przepływ krwi, co z kolei zakłóca dostarczanie niezbędnych składników i usuwanie produktów przemiany materii. W tych warunkach łatwo narasta zmęczenie. Powstaje poczucie dyskomfortu, aż do pojawienia się reakcji bólowych w napiętych mięśniach. Istotną cechą wysiłku statycznego jest stosunkowo małe zużycie energii. Nawet duże obciążenie w tych warunkach powoduje znacznie mniejszy wydatek energetyczny niż np. w czasie wykonywania lekkiej pracy dynamicznej. Obciążenie organizmu podczas pracy statycznej nie może być zatem wyrażone w kilokaloriach lub kilodżulach. Z reakcji ogólnoustrojowej na obciążenia statyczne na uwagę zasługuje wzrost ciśnienia tętniczego krwi niewspółmierny do intensywności wysiłku mierzonego wydatkiem energetycznym.

Specyficznym problemem dla pracowników służb bhp są kwestie związane z podnoszeniem i przenoszeniem ładunków. Są to powszechnie występujące czynności pracy, powodujące duże obciążenie organizmu, zarówno dynamiczne, jak i statyczne. Element obciążenia dynamicznego podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków jest stosunkowo łatwy do określenia poprzez pomiar wydatku energetycznego. Jednak problemu związanego z wykonywaniem takich czynności nie można rozpatrywać wyłącznie z punktu widzenia obciążenia wysiłkiem dynamicznym. Podnoszenie i przenoszenie ładunków stwarza bowiem ryzyko przeciążenia układu mięśniowo-szkieletowego, spowodowane masą dźwiganego ciężaru oraz obciążeniem statycznym mięśni dużego stopnia, co powoduje zmiany zwyrodnieniowe mięśni, więzadeł, stawów, krążków międzykręgowych i kręgów kręgosłupa.

W niniejszym rozdziale obciążenie fizyczne będzie rozpatrywane głównie z punktu widzenia narażenia zawodowego występującego przy pracach związanych z obsługą sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Omówione więc zostaną metody oceny obciążenia wysiłkiem fizycznym dynamicznym, wysiłkiem fizycznym statycznym związanym z koniecznością utrzymania pozycji ciała oraz obciążenia podnoszeniem i przenoszeniem ładunków.

## **4.2.2. Metody oceny obciążenia fizycznego**

### **4.2.2.1. Metody oceny obciążenia dynamicznego**

#### **Energetyczne kryteria oceny ciężkości pracy**

Rzeczywiste obciążenie organizmu podczas pracy fizycznej jest zagadnieniem bardzo złożonym. O obciążeniu organizmu podczas pracy fizycznej decydują bo-

wiem, poza rodzajem wysiłku fizycznego i jego czasem trwania, także cechy indywidualne, a zwłaszcza wydolność fizyczna pracownika.

Niemniej jednak z praktycznego punktu widzenia bardzo przydatna jest klasyfikacja wysiłku fizycznego oparta na wielkości wydatku energetycznego podczas pracy (tab. 4-1). Analiza energetycznych zmian zachodzących podczas wysiłku jest metodą oceny ciężkości pracy fizycznej dynamicznej, czyli pracy związanej ze znaczną aktywnością ruchową, która, poza obciążeniem energetycznym organizmu, wpływa również na pobudzenie wielu układów, w tym krążenia i oddechowego, oraz mechanizmów termoregulacji.

**Tabela 4-1.** Klasyfikacja ciężkości pracy na podstawie wartości efektywnego wydatku energetycznego w ciągu zmiany roboczej (Makowiec-Dąbrowska, 1999)

Klasa ciężkości	Mężczyźni				Kobiety			
	kcal/8 h	kcal/min	kJ/8 h	kJ/min	kcal/8 h	kcal/min	kJ/8 h	kJ/min
Bardzo lekka	do 300	do 1,2	1250	do 5	do 200	do 0,8	do 850	do 3,5
Lekka	300 ÷ 800	1,2 ÷ 2,2	1250 ÷ 3350	5 ÷ 10	200 ÷ 700	0,8 ÷ 1,8	850 ÷ 2900	3,5 ÷ 7,5
Średnio-ciężka	800 ÷ 1500	2,2 ÷ 4,5	3350 ÷ 6300	10 ÷ 20	700 ÷ 1000	1,8 ÷ 3,0	2900 ÷ 4200	7,5 ÷ 12,5
Ciężka	1500 ÷ 2000	4,5 ÷ 7,0	6300 ÷ 8400	20 ÷ 30	1000 ÷ 1200	4,0 ÷ 4,8	4200 ÷ 5000	12,5 ÷ 20
Bardzo ciężka	> 2000	> 7,0	> 8400	> 30	> 1200	> 4,8	> 5000	> 20

Ocena kosztu energetycznego różnych czynności wykonywanych w pracy zawodowej ma duże znaczenie w ergonomii i praktyce zakładowych służb bhp. Informacje tego typu umożliwiają bowiem dokonanie charakterystyki stanowisk pracy i mogą być pomocne w doborze pracowników do określonych prac, a także pozwalają na ocenę ryzyka zawodowego.

Podczas pracy fizycznej energia produkowana przez organizm jest zamieniana w części na pracę mechaniczną (25-30%), a w części na ciepło. Wydatek energetyczny, definiowany jako ilość energii produkowanej przez organizm podczas wykonywania czynności roboczych, jest często stosowaną miarą ciężkości pracy. Na ilość energii zużywanej przez organizm w czasie wykonywania pracy składa się wydatek energetyczny spoczynkowej przemiany materii oraz wydatek energetyczny podczas wykonywania czynności roboczych, tzw. wydatek energetyczny pracy efektywnej (lub netto).

Zgodnie z układem jednostek SI, wydatek energetyczny określany jest w jednostkach pracy, czyli w dżulach (J) na jednostkę czasu. Ponadto, ze względu na

długoletnie funkcjonowanie jednostek kalorymetrycznych – kalorii (cal) lub kilokalorii (kcal) – w celu określenia wydatku energetycznego, jednostki te wciąż można spotkać w praktyce przemysłowej, w przepisach czy starszych podręcznikach w kontekście określania ciężkości pracy. Często również koszt energetyczny pracy jest przedstawiany w watach w przeliczeniu na powierzchnię ciała ( $W/m^2$ ).

## Metody

Parametrem wykorzystywanym do oceny ciężkości pracy jest wydatek energetyczny w ciągu zmiany roboczej. Najmniejszym wydatkiem energetycznym charakteryzują się prace wykonywane w pozycji siedzącej, np. prace biurowe. Zapotrzebowanie energii podczas wykonywania takich prac wynosi na ogół mniej niż  $8 \text{ kJ/min}$ , w zakresie od  $1,26 \text{ kJ/min}$  (pozycja siedząca) do  $7 \text{ kJ/min}$  (obsługa komputera), a w ciągu zmiany roboczej wydatek energetyczny wynosi  $1200 \div 3500 \text{ kJ}$  netto. Prace takie zalicza się do prac lekkich. Do kategorii prac średniociężkich zalicza się prace związane z wykonywaniem czynności o wydatku energetycznym w granicach  $8 \div 20 \text{ kJ/min}$ , np. prace związane z obsługą większości maszyn i urządzeń oraz prace montażowe. Prace ciężkie i bardzo ciężkie to takie, które wymagają dźwigania ciężarów (załadunek towarów) lub używania ciężkich narzędzi (łopata, kilof, młot pneumatyczny i inne). Wydatek energetyczny podczas wykonywania takich czynności wynosi  $25 \div 50 \text{ kJ/min}$ , a wydatek energetyczny w ciągu zmiany roboczej może przekraczać  $8 \text{ 400 kJ}$  w przypadku prac wykonywanych przez mężczyzn i  $5 \text{ 000 kJ}$  w przypadku prac wykonywanych przez kobiety (Bugajska, 2008).

Ocenę wydatku energetycznego można wykonać metodą kalorymetrii pośredniej opartej na zależności pomiędzy przemianami energetycznymi podczas pracy a wskaźnikami fizjologicznymi, takimi jak zużycie tlenu czy wentylacja płuc, oraz metodami tabelarycznymi, np. metodą Lehmana (Lehmann, 1966). Poniżej zostanie opisana metoda pomiaru wydatku energetycznego oparta na pomiarze wentylacji płuc i metoda chronometrażowo-tabelaryczna Lehmana.

### **Metoda oparta na pomiarze wentylacji płuc**

W praktyce przemysłowej do pomiaru wydatku energetycznego najczęściej stosuje się metodę opartą na wynikach pomiaru objętości wydychanego (lub wdychanego) powietrza, czyli wentylacji płuc. Pomiędzy wielkością zużycia tlenu podczas wysiłku i wielkością minutowej wentylacji istnieje wysoki współczynnik korelacji i prawie liniowa zależność (Konarska i Kurkus-Rozowska, 1993). Na podstawie zależności między wentylacją a zużyciem tlenu można obliczyć przybliżoną wartość wydatku energetycznego, posługując się równaniem Datta-Ramanathana (Kozłowski i Nazar, 1995):

$$E = 0,21 \cdot VE(\text{STPD}) \quad (4-1)$$

gdzie:

$E$  = wydatek energii, kJ/min

$VE(STPD)$  = wentylacja płuc, l/min, w warunkach STPD (objętość gazu suchego w temperaturze 0 °C i ciśnieniu atmosferycznym 101,3 kPa).

Pomiar wydatku energetycznego tą metodą można wykonać opracowanym w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy miernikiem MWE. Miernik wydatku energetycznego MWE jest przenośnym, lekkim, o małych wymiarach aparatem umożliwiającym dokonanie pomiaru wydatkowanej energii w czasie wykonywania pracy fizycznej dynamicznej na stanowisku roboczym. Ponadto miernik MWE, ze względu na łatwość obsługi, jest przeznaczony do powszechnego stosowania w zakładach pracy przez przeszkolone osoby. Zasady użycia miernika MWE do pomiaru wydatku energetycznego szczegółowo zostały opisane w publikacji CIOP-PIB pt. *Fizjologiczne kryteria zdolności do pracy fizycznej osób starszych – wydatek energetyczny* (Bugajska, 2010). Po wprowadzeniu (za pomocą klawiatury miernika) danych dotyczących masy ciała, wzrostu, wieku oraz płci osoby badanej i wykonaniu pomiaru następuje automatyczne wyliczenie wartości wydatku energetycznego netto, tj. ilości energii wydatkowanej przez badaną osobę w pracy, oraz wydatku energetycznego brutto, z uwzględnieniem podstawowej przemiany materii. Wyniki pomiaru mogą być podawane w kcal, kJ lub W/m<sup>2</sup>.

Badania porównawcze, laboratoryjne oraz terenowe wykazały dużą zbieżność wyników badań uzyskanych za pomocą miernika i aparatu umożliwiającego pomiar pobierania tlenu i wydalania dwutlenku węgla, zwłaszcza przy ocenie pracy lekkiej, średniociężkiej i ciężkiej. Różnice mogą dotyczyć pracy bardzo lekkiej lub spoczynku. Zawyżone w tych okolicznościach wartości wentylacji płuc mogą być skutkiem wpływu innych czynników, głównie emocjonalnych, związanych z wykonywaniem badań. Różnice mogą się pojawić również przy pomiarze wydatku energetycznego podczas pracy bardzo ciężkiej, gdy wielkość wentylacji płuc przekracza 60 l/min. W tym przypadku jest to spowodowane przekroczeniem granic zależności liniowej między zużyciem tlenu a wentylacją płuc (hiperwentylacja).

Warunkiem prawidłowego wykonania pomiaru jest staranne dopasowanie półmasksi do twarzy, uwzględniające wymiary oraz kształt twarzy i właściwy rozmiar półmasksi. Ponadto należy odpowiednio ściągnąć paski gumowe mocujące półmaskę na twarzy. Pomiar wentylacji płuc przeprowadza się kilkakrotnie przez kilka minut i zawsze po kilku minutach pracy w półmasce, co jest niezbędne do przyzwyczajenia się pracownika do pracy w półmasce oraz unormowania oddechu zakłóconego w pierwszej fazie przez założenie półmasksi.

Bardzo ważne dla prawidłowego obliczenia wielkości wydatku energetycznego, poza zachowaniem zasad prawidłowego pomiaru, jest ustalenie chronometrażu dnia



pracy, polegające na pomiarze i zapisie czasu trwania poszczególnych czynności roboczych.

Chronometraż powinien być opracowany w dniach o przeciętnym rytmie pracy i obejmować typowe czynności związane z obsługą stanowiska pracy, powtarzające się każdego dnia. W dokumentacji wszystkie rodzaje czynności roboczych, jak również czynności pomocnicze i przerwy w pracy, powinny być pogrupowane w cykle o podobnym obciążeniu pracą. Najlepiej, gdy chronometraż pracy opracowany jest wspólnie z pracownikiem, jego przełożonym i pracownikiem służb bhp. Pomiar czasu trwania poszczególnych czynności powinien być wykonywany kilkakrotnie, dla różnych osób i przy różnej intensywności pracy, aby można było uzyskać charakterystyczną, uśrednioną fotografię dnia roboczego na określonym stanowisku.

Często popełnianym błędem podczas ustalania chronometrażu jest nadmierne rozcząstkowanie procesu pracy na krótkotrwałe czynności, zamiast zgrupowania ich w wyodrębnione, łatwo identyfikowane i powtarzające się cykle. Innym, również często występującym nieporozumieniem, jest dążenie do uwzględniania w dniuówce również czynności roboczych, które chociaż charakterystyczne dla danego zawodu, pojawiają się stosunkowo rzadko, np. podczas awarii.

Ocena kosztu energetycznego złożonych operacji roboczych jest obciążona błędem, nawet przy zastosowaniu bezpośredniego pomiaru pobierania tlenu podczas wykonywania pracy. Podczas standardowych, prostych czynności wykonywanych przez tego samego człowieka wyniki powtarzanych pomiarów różnią się przeciętnie o  $\pm 5\%$ , a przy złożonych operacjach – nawet o  $\pm 10\%$ . Wartości wydatku energetycznego zmieniają się również ze względu na technikę pracy, staż, jej intensywność, doświadczenie zawodowe i rodzaj używanych narzędzi.

Dużo trudności nastęrcza również oszacowanie wydatku energetycznego podczas całej zmiany roboczej, ponieważ pomiary wiążą się z koniecznością stosowania masek lub ustników do zbierania powietrza wydychanego, co może być uciążliwe dla badanych. Pomiary przeprowadza się więc na ogół w ciągu zaledwie kilku minut, podczas wykonywania podstawowych czynności roboczych, a następnie sumuje się koszt energetyczny tych czynności. Trudności w ocenie czasu wykonywania poszczególnych czynności mogą być źródłem dodatkowego błędu. Zarówno konieczność notowania czasu przez samych badanych, jak i obecność obserwatora są czynnikami, które mogą zakłócać normalny tryb pracy.

Czynnikiem, który również należy uwzględniać przy ocenie kosztu energetycznego pracy, jest środowisko termiczne, w jakim praca jest wykonywana. W środowisku termicznym gorącym następuje niewielki wzrost wydatku energetycznego spowodowany wzrostem temperatury ciała. Bardziej wzrasta wydatek energetyczny w środowisku termicznym zimnym, co spowodowane jest pojawieniem się dreszczy, a także noszeniem ciężkiej odzieży.

**Metoda chronometryczowo-tabelaryczna**

W sytuacji, gdy nie ma możliwości wykonania pomiaru wydatku energetycznego jedną z obiektywnych metod, można się posłużyć szacunkową metodą chronometryczowo-tabelaryczną Lehmana. Metoda ta uwzględnia pozycję i rodzaj grup mięśniowych zaangażowanych w wykonywanie pracy. Metoda Lehmana jest dwuetapowa (tab. 4-2). W etapie pierwszym dokonuje się oceny pozycji podczas pracy i, stosując tabelę A, szacuje się wydatek energetyczny, wynikający z utrzymania tej pozycji. W etapie drugim, na podstawie analizy czynności roboczych, ocenia się główne grupy mięśni wykonujących daną czynność i, stosując tabelę B, szacuje się wydatek energetyczny wynikający z wykonywania tej czynności. Koszt energetyczny pracy określa się poprzez zsumowanie wyników uzyskanych w obu omówionych etapach.

**Tabela 4-2.** Metoda chronometryczowo-tabelaryczna szacowania wydatku energetycznego podczas pracy (wg G. Lehmana, 1966)

A	Pozycja ciała	Wydatek energetyczny	
		kcal/min	kJ/min
	Siedząca	0,3	1,26
	Na kolanach	0,5	2,10
	W kucki	0,5	2,10
	Stojąca	0,6	2,51
	Stojąca pochylona	0,8	3,35
	Chodzenie	1,7 ÷ 3,5	7,12 ÷ 14,65

B	Zakres obciążenia mięśni		Wydatek energetyczny	
			kcal/min	kJ/min
Praca palców, ręki i przedramienia	lekka	0,3 ÷ 0,6	1,3 ÷ 2,5	
	średnia	0,6 ÷ 0,9	2,5 ÷ 3,8	
	ciężka	0,9 ÷ 1,2	3,8 ÷ 5,0	
Praca jednego ramienia	lekka	0,7 ÷ 1,2	2,9 ÷ 5,0	
	średnia	1,2 ÷ 1,7	5,0 ÷ 7,1	
	ciężka	1,7 ÷ 2,2	7,1 ÷ 9,2	
Praca obu ramion	lekka	1,5 ÷ 2,0	6,3 ÷ 8,4	
	średnia	2,0 ÷ 2,5	8,4 ÷ 10,5	
	ciężka	2,5 ÷ 3,0	10,5 ÷ 12,6	
Praca całego ciała (mięśni kończyn i tułowia)	lekka	2,5 ÷ 4,0	10,5 ÷ 16,7	
	średnia	4,0 ÷ 6,0	16,7 ÷ 25,1	
	ciężka	6,0 ÷ 8,5	25,1 ÷ 35,6	
	bardzo ciężka	8,5 ÷ 11,5	35,6 ÷ 48,1	

Dwustopniowa, tabelaryczna metoda oceny ciężkości pracy, przedstawiona jest również w normie PN-EN ISO 8996:2005 *Ergonomia środowiska termicznego – określenie tempa metabolizmu*. W tej metodzie wartości obciążenia pracą fizyczną podane są w  $W/m^2$ , co może być wykorzystane do oceny obciążenia fizycznego w środowisku termicznym.

#### 4.2.2.2. Metoda oceny obciążenia statycznego

Ocenę obciążenia statycznego można przeprowadzić metodą OWAS (ang. *Ovako Working Posture Analysis System*), pozwalającą wyznaczyć obciążenie i ocenić ryzyko zawodowe jako duże, średnie lub małe, w zależności od czasu utrzymywania pozycji ciała, określonej zgodnie z wyznaczonymi kategoriami (Hignett, 1996). Metoda ta umożliwia przeprowadzenie ilościowej analizy obciążenia, opartej na standardowych pozycjach ciała przyjmowanych podczas pracy (kod pleców, ramion i nóg, tab. 4-3), z uwzględnieniem wartości sił zewnętrznych lub masy podnieszonego ładunku (kod siły zewnętrznej, tab. 4-4).

**Tabela 4-3.** Wyznaczenie kodu położenia pleców, ramion i nóg

Położenie pleców	Położenie ramion	Położenie nóg	Kod
Wyprostowane	obie ręce poniżej stawu ramiennego	pozycja siedząca	1
Zgięte do przodu (pochylone)	jedna ręka powyżej stawu ramiennego	pozycja stojąca z nogami wyprostowanymi	2
Skręcone	obie ręce powyżej stawu ramiennego	stojąca z jedną nogą wyprostowaną	3
Zgięte i skręcone		stojąca z nogami zgiętymi	4
		stojąca z jedną nogą zgiętą	5
		kłęk na jednym lub obu kolanach	6
		chodzenie	7

**Tabela 4-4.** Wyznaczenie kodu siły zewnętrznej

Mężczyźni	Kobiety i młodociani chłopcy	Młodociane dziewczęta	Kod siły zewnętrznej
< 10 kg	< 5 kg	< 2 kg	1
10 ÷ 20 kg	5 ÷ 10 kg	2 ÷ 6 kg	2
> 20 kg	> 10 kg	> 6 kg	3

Kombinacje położenia poszczególnych członów (plecy, ramiona, nogi) z uwzględnieniem siły zewnętrznej są podstawą wyznaczenia czterech kategorii oceny obciążenia.

żenia na stanowisku pracy (kategoria OWAS) oraz działań dotyczących poprawy warunków pracy podczas wykonywania czynności:

- kategoria 1.: pozycja lub pozycje przyjmowane podczas pracy są naturalne; obciążenie jest optymalne lub akceptowalne; nie ma potrzeby dokonywania zmian na stanowisku
- kategoria 2.: pozycja lub pozycje przyjmowane podczas pracy mogą mieć wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy; obciążenie jest prawie akceptowalne; nie ma potrzeby dokonywania zmian na stanowisku, ale należy wziąć pod uwagę konieczność przeprowadzenia takich zmian w najbliższej przyszłości
- kategoria 3.: pozycja lub pozycje przyjmowane w czasie pracy mają negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy; obciążenie jest duże; zmiany na stanowisku pracy muszą być przeprowadzone tak szybko jak to jest możliwe
- kategoria 4.: pozycja lub pozycje przy pracy mają bardzo negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy; obciążenie jest bardzo duże; zmiany na stanowisku pracy muszą być przeprowadzone natychmiast.

Na podstawie kodu położenia poszczególnych członów ciała oraz kodu siły zewnętrznej wyznacza się kategorię obciążenia OWAS (tab. 4-5).

**Tabela 4-5.** Wyznaczanie kategorii obciążenia OWAS na podstawie kodu pleców, ramion i nóg oraz kodu siły zewnętrznej

Nogi		1			2			3			4			5			6			7		
Siła zewnętrzna		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Plecy	Ramiona																					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2
2	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3
	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4
	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1
	3	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
4	1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4
	2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4
	3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4

Zależnie od tego, czy praca jest wykonywana w pozycji wymuszonej czy niewymuszonej oraz od udziału czasu trwania tej czynności w łącznym wymiarze całej zmiany roboczej, obciążenie jest sklasyfikowane w trójstopniowym systemie oceny (tab. 4-6).

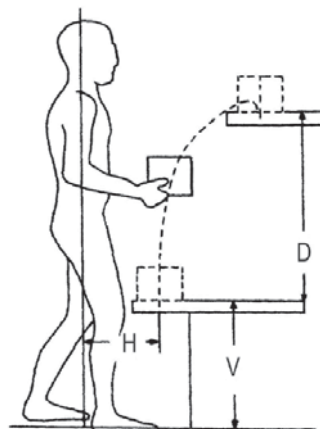
**Tabela 4-6.** Interpretacja wyników oceny obciążenia statycznego

Kategoria OWAS	Pozycja ciała	Czas pracy, %	Obciążenie
1	Niewymuszona	$\leq 70$	małe
		$> 70$	średnie
	Wymuszona	$\leq 50$	małe
		$50 \div 70$	średnie
		$> 70$	duże
2	Niewymuszona	$\leq 50$	małe
		$50 \div 70$	średnie
		$> 70$	duże
	Wymuszona	$\leq 30$	małe
		$30 \div 50$	średnie
		$> 50$	duże
3 lub 4	Wymuszona	$\leq 30$	średnie
		$> 30$	duże

#### 4.2.2.3. Metoda oceny obciążenia podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków

Ocenę obciążenia podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków można przeprowadzić z zastosowaniem metody zawartej w normie PN-EN 1005-2+A1:2010. Na podstawie tej metody można wyznaczyć tzw. zalecaną wartość graniczną masy, która ze względu na obciążenie pracownika nie powinna być przekroczona. Metoda zawarta w normie pozwala także na ocenę ryzyka wynikającego z wykonywania czynności przemieszczania ładunków. Do przeprowadzenia takiej oceny ryzyka zobowiązany jest pracodawca (*Rozporządzenie Ministra Pracy ...*, 2000).

Do opracowania zależności matematycznej wyrażającej zalecaną wartość graniczną masy w funkcji parametrów opisujących pozycję ciała oraz rytm pracy wykorzystano trzy kryteria: biomechaniczne (tolerowana wartość siły nacisku na krążek L5/S1 wynosi 3 000 – 4 000 N przy sporadycznym podnoszeniu), fizjologiczne (maksymalna wydolność przy pracy dynamicznej nie przekracza 9,5 kcal/min) i psychofizyczne (masa akceptowalna dla 75% pracujących kobiet i 95% pracujących mężczyzn). Wybrane parametry opisujące pozycję ciała podczas podnoszenia przedstawiono na rysunku 4-2.

**Rys. 4-2.** Parametry definiujące pozycję podczas podnoszenia



Zalecana wartość graniczna masy podnoszonego ładunku (RML) opisywana jest następującą zależnością matematyczną:

$$R_{ML} = M_{ref} \cdot V_M \cdot D_M \cdot H_M \cdot A_M \cdot C_M \cdot F_M \cdot O_M \cdot P_M \cdot A_T \quad (4-2)$$

gdzie:

$M_{ref}$  – masa odniesienia (wg tab. 4-7)

$V_M$  – wysokość początkowego położenia przedmiotu, cm (rys. 4-2)

$$V_M = 0 \text{ jeżeli } V > 175 \text{ cm}$$

$$V_M = 0,78 \text{ jeżeli } V < 0 \text{ cm}$$

$$V_M = 1 - 0,003 \cdot |V - 75|$$

$D_M$  – różnica wysokości pomiędzy początkowym i końcowym położeniem przedmiotu, cm (rys. 4-2)

$$D_M = 0 \text{ jeżeli } D > 175 \text{ cm}$$

$$D_M = 1 \text{ jeżeli } D < 25 \text{ cm}$$

$$D_M = 0,82 + 4,5 / D$$

$H_M$  – odległość miejsca chwytu przedmiotu od osi ciała, cm (rys. 4-2)

$$H_M = 0 \text{ jeżeli } H > 63 \text{ cm}$$

$$H_M = 1 \text{ jeżeli } H < 25 \text{ cm}$$

$$H_M = 25 / H$$

$A_M$  – kąt asymetrii – kąt skrętu tułowia podczas podnoszenia, °

$$A_M = 0 \text{ jeżeli } A > 135^\circ$$

$$A_M = 1 - (0,0032 A)$$

$C_M$  – współczynnik chwytu (wg tab. 4-8)

$F_M$  – współczynnik częstotliwości (wg tab. 4-9)

$O_M$  – czy czynności wykonywane jedną ręką: jeżeli tak, to 0,6; inaczej – 1

$P_M$  – czy czynności wykonywane przez 2 osoby: jeżeli tak, to 0,85; inaczej – 1

$A_T$  – czy wykonywane są inne czynności fizyczne: jeżeli tak, to 0,8; inaczej – 1.

**Tabela 4-7.** Wyznaczanie wartości masy odniesienia ( $M_{ref}$ )

Pole zastosowania	$M_{ref}$ kg	Populacja, %			Grupa w populacji	
		F&M	F	M		
W domu	5	dane niedostępne			młodzież i osoby starsze	cała populacja
Praca stała	10	99	99	99	osoby pracujące w domu	
	15	95	90	99	populacja pracująca (+Y, +E)	cała populacja pracująca
Praca dorywcza	25	85	70	90	dorośla populacja pracująca	cała populacja pracująca
	30	dane niedostępne			osoby zaawansowane –	osoby zaawansowane
	35				posiadające odpowiednie	
40	predyspozycje i przeszkolone					
F – kobiety, M – mężczyźni, Y – młodzież, E – osoby starsze						

**Tabela 4-8.** Wyznaczanie wartości współczynnika chwytu ( $C_M$ )

Opis chwytu	Jakość chwytu	$C_M$
Długość przedmiotu $\leq 40$ cm; wysokość przedmiotu $\leq 30$ cm; dobre uchwyty lub wybrania do trzymania ręką; łatwe do pochwycenia części i przedmioty luzem znajdujące się w opakowaniu bez konieczności nadmiernego odwodzenia nadgarstka	dobra	1,00
Długość przedmiotu $\leq 40$ cm; wysokość przedmiotu $\leq 30$ cm; niskiej jakości uchwyty lub wybrania do trzymania ręką lub konieczne zgięcie palców pod kątem $90^\circ$ ; łatwe do pochwycenia części i przedmioty przy zgięciu palców pod kątem $90^\circ$ bez nadmiernego odwodzenia nadgarstka	dostateczna	0,95
Długość przedmiotu $> 40$ cm lub wysokość przedmiotu $> 30$ cm; albo trudne do uchwycenia części lub zwisające przedmioty czy też asymetria środka ciężkości lub niestateczna zawartość, albo potrzeba używania rękawic	zła	0,90

**Tabela 4-9.** Wyznaczanie wartości współczynnika częstotliwości ( $F_M$ )

Częstotliwość		Czas wykonywania pracy					
Hz	czynności/ min	2 ÷ 8 h		1 ÷ 2 h		1 h	
		$V < 75$	$V \geq 75$	$V < 75$	$V \geq 75$	$V < 75$	$V \geq 75$
$\leq 0,00333$	$\leq 0,2$	0,85	0,85	0,95	0,95	1,00	1,00
0,00833	0,5	0,81	0,81	0,92	0,92	0,97	0,97
0,01666	1	0,75	0,75	0,88	0,88	0,94	0,94
0,03333	2	0,65	0,65	0,84	0,84	0,91	0,91
0,05000	3	0,55	0,55	0,79	0,79	0,88	0,88
0,06666	4	0,45	0,45	0,72	0,72	0,84	0,84
0,08333	5	0,35	0,35	0,60	0,60	0,80	0,80
0,10000	6	0,27	0,27	0,50	0,50	0,75	0,75
0,11666	7	0,22	0,22	0,42	0,42	0,70	0,70
0,13333	8	0,18	0,18	0,35	0,35	0,60	0,60
0,15000	9	0,00	0,15	0,30	0,30	0,52	0,52
0,16666	10	0,00	0,13	0,26	0,26	0,45	0,45
0,18333	11	0,00	0,00	0,00	0,23	0,41	0,41
0,20000	12	0,00	0,00	0,00	0,21	0,37	0,37
0,21666	13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34
0,23333	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31
0,25000	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
$> 0,2500$	$> 15$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

$V$  – wysokość początkowego położenia przedmiotu, cm

Na podstawie zależności (4-3) można ocenić obciążenie wynikające z czynności podnoszenia i przenoszenia ładunków. Wskaźnik ryzyka ( $R_I$ ) wyznaczany jest jako:

$$R_I = \text{masa podnoszona} / \text{zalecana wartość masy granicznej } (R_{ML}), \text{ kg} \quad (4-3)$$

Interpretacja wartości wskaźnika ryzyka  $R_I$  jest następująca:

$R_I \leq 0,85$  – obciążenie małe (strefa zielona)

$0,85 < R_I < 1,0$  – obciążenie średnie (strefa żółta)

$R_I \geq 1,0$  – obciążenie duże (strefa czerwona).

### 4.3. Przykładowe profile obciążenia wysiłkiem fizycznym

W niniejszym rozdziale przedstawione zostanie obciążenie wysiłkiem fizycznym podczas prac na 2 stanowiskach: elektromontera urządzeń wysokiego napięcia i inspektora ds. obsługi stacji energetycznej. Analiza będzie obejmowała obciążenie wysiłkiem statycznym wynikającym w konieczności utrzymania wymuszonej pozycji ciała, obciążenie podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków oraz obciążenie wysiłkiem fizycznym dynamicznym (wydatek energetyczny).

#### Obciążenie wysiłkiem fizycznym statycznym oraz podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków

Przedstawione obciążenie wysiłkiem fizycznym statycznym oraz podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków odnosi się do przykładowych, dziennych chronometraży pracy elektromontera urządzeń WN i inspektora ds. obsługi stacji energetycznej. Chronometrażę zostały ustalone na podstawie rozmów z pracownikami zatrudnionymi na tych stanowiskach. W tabelach z wynikami podano obciążenie dla poszczególnych czynności wymienionych w chronometrażu w odniesieniu do konkretnych czasów. Należy pamiętać, że stopień obciążenia może się zmieniać w zależności od rzeczywistych czasów wykonywania czynności w konkretnym dniu pracy.

#### *Stanowisko elektromontera urządzeń wysokiego napięcia*

Praca na stanowisku elektromontera urządzeń WN odbywa się w zespołach 3-osobowych, przy czym podczas pracy na słupach WN zawsze przynajmniej jeden z pracowników pozostaje na poziomie ziemi. W czasie dnia pracy pracownikowi przysługuje 30-minutowa przerwa. Czynności wykonywane podczas naprawy i konserwacji na słupach WN wymagają przyjęcia wymuszonych pozycji, często

z ramionami uniesionymi powyżej stawów ramiennych (rys. 4-3, 4-4, 4-5). Pozycja ta powoduje znaczne obciążenia kończyn górnych. Pozostałe czynności pracy wykonywane są zazwyczaj w pozycji niewymuszonej. Praca na stanowisku elektryka nie jest wykonywana pod presją czasu. W czasie niesprzyjającej pogody (np. burzy) pracownicy mają zakaz wykonywania czynności naprawy lub konserwacji urządzeń WN. Chronometraż czynności pracy przedstawiono w tabeli 4-10.

**Tabela 4-10.** Przykładowy chronometraż czynności na stanowisku pracy elektryka urządzeń WN

Lp.	Czynności	Czas min
1	Przydział zadań	15
2	Pobranie przyrządów, narzędzi, materiałów	25
3	Dojazd na miejsce wykonywania pracy	30
4	Przygotowanie miejsca pracy na poziomie ziemi	20
5	Przygotowanie miejsca pracy na wysokości (rys. 4-3)	30
6	Naprawa i konserwacja na słupach WN (rys. 4-4, 4-5)	100
7	Czynności pomocnicze	150
8	Złożenie sprzętu po wykonanej pracy, sprzątnięcie miejsca pracy	40
9	Powrót samochodem z miejsca wykonywania pracy	30
10	Przenoszenie ciężkich ładunków	10
11	Przerwa śniadaniowa	30
	Razem	480



**Rys. 4-3.** Przygotowanie miejsca pracy na wysokości



**Rys. 4-4.** Naprawa i konserwacja na słupach WN – ręce poniżej stawów ramiennych



**Rys. 4-5.** Naprawa i konserwacja na słupach WN – ręce powyżej stawów ramiennych

Oszacowanie obciążenia statycznego, przeprowadzone z zastosowaniem metody OWAS, przedstawia tabela 4-11. Czynności pracy określone w chronometrażu, w których przyjmowane były różne pozycje podczas pracy, opisano dodatkowo literami od a do c – pobranie przyrządów, narzędzi, materiałów (2a, 2b), przygotowanie miejsca pracy na wysokości (5a, 5b), naprawa i konserwacja na słupach WN (6a – 6c), złożenie sprzętu po wykonanej pracy, sprzątnięcie miejsca pracy (8a, 8b).

**Tabela 4-11.** Obciążenie statyczne dla poszczególnych czynności pracy na stanowisku elektromontera urządzeń WN (położenie pleców – P, ramion – R, nóg – N, siła zewnętrzna lub masa ładunku – S, kategoria OWAS, pozycja ciała wymuszona lub niewymuszona – W/NW)

Lp.	P	R	N	S	Czas %	OWAS	W/NW	Czas ogółem %	Obciążenie
1	1	1	1	1	3,1	1	NW	15,6	małe
3	1	1	1	1	6,3	1	NW		
9	1	1	1	1	6,3	1	NW		
5	1	1	2	1	3,1	1	NW	17,7	małe
6a	1	1	2	1	14,6	1	NW		
2a	1	1	7	1	3,1	1	NW	42,7	małe
4	1	1	7	1	4,2	1	NW		
7	1	1	7	1	31,3	1	NW		
8a	1	1	7	1	4,2	1	NW		
2b	1	1	7	2	2,1	1	NW	4,2	małe
10	1	1	7	2	2,1	1	NW		
5a	1	3	2	1	3,1	1	W	10,4	małe
6b	1	3	2	1	3,1	1	W		
8b	1	3	2	1	4,2	1	W		
6c	2	1	2	1	3,1	2	W	3,1	małe
11					6,3			6,3	małe

Obciążenie statyczne na stanowisku pracy elektromontera urządzeń WN jest małe. Dla każdej z wykonywanych czynności ryzyko było małe. Niektóre z czynności pracy wskazują na większe obciążenia (6c – naprawa i konserwacja), jednak czas utrzymywania jednakowej i nieruchomej pozycji w ciągu całego dnia pracy wynosi zaledwie 3,1%.

Podczas czynności pobrania przyrządów, narzędzi, materiałów, przygotowania miejsca pracy na poziomie ziemi i na wysokości oraz podczas złożenia sprzętu po wykonanej pracy i sprzątnięcia miejsca pracy dokonano oceny ryzyka wyni-



kającego z wykonywania czynności podnoszenia i przenoszenia ładunków, z zastosowaniem metody podanej w normie PN-EN 1005-2+A1:2010 (tab. 4-12). Do celów analizy przyjęto średnią masę podnoszonego i przenoszonego przedmiotu równą 10 kg.

Obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego na stanowisku elektromontera urządzeń WN podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków było małe.

**Tabela 4-12.** Obciążenie podczas załadowania i rozładowania sprzętu do pojazdu, odniesione do poszczególnych czynności pracy na stanowisku elektromontera urządzeń WN

Parametr	Oznaczenie	Wartość	Współczynnik	Wartość
Masa podnoszona	$M_p$	10 kg	–	–
Masa odniesienia	$M_{ref}$	25 kg	–	–
Wysokość podnoszenia ładunku	$V$	60 cm	$V_M$	0,96
Różnica wysokości	$D$	20 cm	$D_M$	1
Kąt skrętu podczas podnoszenia	$A$	0°	$A_M$	1
Odległość miejsca chwytu od osi ciała	$H$	30 cm	$H_M$	0,83
Jakość chwytu – dobra			$C_M$	1
Czynności wykonywane przez 1 h, 1 raz na min			$F_M$	0,94
Praca wykonywana dwoma rękoma			$O_M$	1
Pracę wykonuje jeden pracownik			$P_M$	1
Pracownik wykonuje inne czynności fizyczne			$A_T$	0,8
Zalecana masa graniczna			$R_{ML}$	15
Współczynnik ryzyka			$R_i$	0,67
Obciążenie				małe

### **Stanowisko inspektora ds. obsługi stacji energetycznej**

Czynności wykonywane podczas obsługi, konserwacji i naprawy urządzeń wymagają przyjmowania nienaturalnych pozycji, takich jak pochylenie tułowia do przodu, uniesienie ramion powyżej stawu ramiennego czy pozycja kuczna. Pozostałe czynności pracy wykonywane są zazwyczaj w pozycji niewymuszonej. W czasie pracy pracownikowi przysługuje 30-minutowa przerwa. Chronometraż czynności pracy przedstawiono w tabeli 4-13.

Oszacowanie obciążenia statycznego, przeprowadzone z zastosowaniem metody OWAS, przedstawiono w tabeli 4-14. Czynności pracy określone w chronometrażu, podczas których przyjmowane były różne pozycje, opisano dodatkowo literami od a do i – obsługa, konserwacja i naprawa urządzeń stacji (4a – 4i).

**Tabela 4-13.** Przykładowy chronometraż czynności na stanowisku pracy inspektora ds. obsługi stacji energetycznej

Lp.	Czynność	Czas min
1	Omówienie poleceń dnia pracy	15
2	Przygotowanie sprzętu do pracy	30
3	Dopuszczenie do pracy (w miejscu pracy, określenie czynności pracy, wyznaczenie stref niebezpiecznych, zagrożeń dla pracownika, rys. 4-6)	30
4	Obsługa, konserwacja i naprawa urządzeń stacji (rys. 4-7, 4-8)	275
5	Konserwacja narzędzi, sprzętu	15
6	Prace porządkowe	30
7	Zgłoszenie wykonania pracy – zakończenia polecenia pracy (wpis do protokołu gotowości do dyspozycji)	20
8	Złożenie sprzętu po pracy	30
9	Przenoszenie ciężkich ładunków	5
10	Przerwa śniadaniowa	30
Razem		480

**Tabela 4-14.** Obciążenie statyczne dla poszczególnych czynności pracy na stanowisku inspektora ds. obsługi stacji energetycznej (położenie pleców – P, ramion – R, nóg – N, siła zewnętrzna lub masa ładunku – S, kategoria OWAS, pozycja ciała wymuszona lub niewymuszona – W/NW)

Lp.	P	R	N	S	Czas %	OWAS	W/NW	Czas ogółem, %	Ryzyko
1	1	1	1	1	3,1	1	NW	7,3	małe
7	1	1	1	1	4,2	1	NW		
2	1	1	2	1	6,3	1	NW	30,2	małe
3	1	1	2	1	6,3	1	NW		
4a	1	1	2	1	8,3	1	NW		
5	1	1	2	1	3,1	1	NW		
8	1	1	2	1	6,3	1	NW		
4f	1	1	2	2	3,1	1	NW		
4b	1	1	7	1	11,5	1	NW	17,7	małe
6	1	1	7	1	6,3	1	NW		
9	1	1	7	2	1,0	1	NW	1,0	małe
4c	1	3	2	1	8,3	1	W	8,3	małe
4g	1	3	2	2	3,1	1	W	3,1	małe
4d	2	1	2	1	8,3	2	W	8,3	małe
4h	2	1	2	2	3,1	2	W	3,1	małe
4e	2	1	4	1	8,3	3	W	8,3	średnie
4i	2	1	4	2	3,1	3	W	3,1	średnie
10					6,3			6,1	małe



**Rys. 4-6.** Obsługa, konserwacja i naprawa urządzeń stacji – przygotowanie miejsca pracy



**Rys. 4-7.** Obsługa, konserwacja i naprawa urządzeń stacji – praca z rękami powyżej stawów ramiennych



**Rys. 4-8.** Obsługa, konserwacja i naprawa urządzeń stacji – praca w pozycji pochylonej

**Tabela 4-15.** Obciążenie podczas załadowania i rozładowania sprzętu do pojazdu, odniesione do poszczególnych czynności pracy na stanowisku inspektora ds. obsługi stacji energetycznej

Parametr	Oznaczenie	Wartość	Współczynnik	Wartość
Masa podnoszona	$M_p$	10 kg	–	–
Masa odniesienia	$M_{ref}$	25 kg	–	–
Wysokość podnoszenia ładunku	$V$	80 cm	$V_M$	0,99
Różnica wysokości	$D$	20 cm	$D_M$	1
Kąt skrętu podczas podnoszenia	$A$	0°	$A_M$	1
Odległość miejsca chwytu od osi ciała	$H$	35 cm	$H_M$	0,71
Jakość chwytu – dobra			$C_M$	1
Czynności wykonywane przez 1 h, 1 raz na min			$F_M$	0,94
Praca wykonywana dwoma rękoma			$O_M$	1
Pracę wykonuje jeden pracownik			$P_M$	1
Pracownik wykonuje inne czynności fizyczne			$A_T$	0,8
Zalecana masa graniczna			$R_{ML}$	13,2
Współczynnik ryzyka			$R_i$	0,76
Obciążenie				małe

Obciążenie statyczne na stanowisku pracy inspektora ds. obsługi stacji energetycznej jest średnie i wynika przede wszystkim z konieczności przyjmowania pozycji kucznej z obciążeniem do 10 i do 20 kg (czynność obsługi, konserwacji i naprawy urządzeń stacji – 4e i 4i).

Dodatkowo, podczas czynności przygotowania sprzętu do pracy oraz złożenia sprzętu po pracy oszacowano obciążenie wynikające z wykonywania czynności podnoszenia i przenoszenia ładunków, z zastosowaniem metody podanej w normie PN-EN 1005-2+A1:2010 (tab. 4-15). Do celów analizy przyjęto średnią masę podnoszonego i przenoszonego przedmiotu równą 10 kg.

Obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego na stanowisku inspektora ds. obsługi stacji energetycznej podczas podnoszenia i przenoszenia ładunków, odniesione do czynności przygotowania sprzętu do pracy i złożenia sprzętu po pracy, było małe.

### Obciążenie wysiłkiem fizycznym dynamicznym (wydatek energetyczny)

Ocenę obciążenia wysiłkiem fizycznym dynamicznym przeprowadzono na podstawie wartości wydatku energetycznego podczas wykonywania przykładowych czynności na stanowisku elektromontera urządzeń WN i inspektora ds. obsługi stacji energetycznej. Wydatek energetyczny określono na podstawie pomiaru wentylacji płuc miernikiem MWE (opis metody i zasady przeprowadzania pomiaru podano w rozdziale 4.2.2.1).

W tabeli 4-16 podano przykładowe czynności wykonywane na tych stanowiskach oraz odpowiadające im minutowe wartości wydatku energetycznego. Część z tych czynności, na przykład czynności związane z przygotowaniem do pracy czy przemieszczaniem się do miejsca pracy i z powrotem, jest wspólna dla obu stanowisk, natomiast inne są typowe tylko dla danego stanowiska i w tych przypadkach w nawiasie podano nazwę stanowiska.

W przypadku oceny obciążenia wysiłkiem fizycznym dynamicznym nie podano wartości wydatku dla całej zmiany roboczej ze względu na dużą różnorodność zarówno czynności roboczych, jak czasu ich wykonywania każdego dnia.

**Tabela 4-16.** Wydatek energetyczny podczas wybranych czynności wykonywanych przez elektromontera urządzeń wysokiego napięcia i inspektora ds. obsługi stacji energetycznej

Czynności robocze	Wydatek energetyczny (netto)	
	kJ/min	kcal/min
<b>Przygotowanie do pracy</b>		
Zakładanie ubioru zabezpieczającego	9,2	2,2
Otrzymanie dyspozycji pracy (poz. siedząca)	6,3	1,5

Tabela 4-16, cd.

Czynności robocze	Wydatek energetyczny (netto)	
	kJ/min	kcal/min
Pobranie materiałów i narzędzi oraz pakowanie ich na samochód	13,4	3,2
<b>Przemieszczanie się do miejsca pracy i z powrotem</b>		
Przejazd do miejsca pracy samochodem		
– jako pasażer	5,0	1,2
– jako kierowca	6,7	1,6
Chodzenie po terenie nierównym (trawie)	10,1	2,4
Chodzenie po równej twardej drodze, z ciężarem do 10 kg	15,1	3,6
Chodzenie po równej twardej drodze, z ciężarem do 20 kg	20,1	4,8
Wchodzenie na wzniesienie, z ciężarem do 20 kg	25,6	6,2
<b>Prace remontowo-naprawcze (elektromonter urządzeń WN)</b>		
Oznaczanie miejsca pracy i wywieszanie tablic ostrzegawczych, zaznaczenie taśmą miejsca pracy (chodzenie, schyłanie się)	10,9	2,6
Demontaż i montaż przełączacza, praca w technice PPN (praca na wysokości)		
– zakładanie/zdejmowanie ubioru zabezpieczającego: szeleki zabezpieczających, słupełazów, rękawic, hełmu	12,2	2,9
– wejście na słupełaz przełotowy za pomocą słupełazów, wykonanie izolacji stanowiska pracy na słupełazie (nakładanie izolatora na przewód), demontaż i montaż przyłączacza	18,0	4,3
– wejście na słupełaz, odłączanie przyłączacza i opuszczanie na ziemię, podniesienie przyłączacza i podłączenie (praca na wysokości)	21,8	5,2
– praca przy słupełazie WN (pomoc koledze): podawanie sprzętu windą do góry, opuszczanie i podnoszenie przyłączacza	14,2	3,4
<b>Prace konserwujące i naprawcze na terenie rozdzielni (inspektor ds. obsługi stacji energetycznej)</b>		
Przygotowanie narzędzi do pracy (klucze, drabiny, puszki ze smarem)	10,5	2,5
Przygotowanie/złożenie podnośnika do pracy (pozycja stojąca, kręcenie korbą)	13,8	3,3
Wejście/zejście na/z podnośnik/a i praca na wyłączniku WN (pozycja stojąca, dokręcanie śrub)	14,7	3,5
Kontrola i konserwacja połączeń elektrycznych obwodów pierwotnych		
– konserwacja urządzenia (smarowanie styków i dokręcanie śrub za pomocą narzędzi na drabinie w pozycji stojącej)	13,4	3,2
– spisywanie danych znamionowych urządzenia (pozycja stojąca na drabinie)	6,7	1,6
– kontrola ogólnego stanu urządzenia (pozycja stojąca z rękoma wyciągniętymi do góry, chodzenie)	9,6	2,3
<b>Porządkowanie miejsca pracy</b>		
Pakowanie narzędzi do torby i wkładanie do samochodu	14,7	3,5
Likwidacja zagrozenia terenu, zdejmowanie tablic ostrzegawczych, zdejmowanie taśmy (szybko)	11,3	2,7



## 4.4. Obciążenie psychiczne

### 4.4.1. Czynniki środowiska pracy

#### Pojęcie obciążenia psychicznego pracą

Obciążenie psychiczne nie jest pojęciem jednoznacznie określonym (Makowska, 1984; Mulder i Mulder, 1981; Sheridan, 1980; Żarczyński i Noworol, 1991). Najczęściej wyróżnia się trzy nurty w podejściu do tego zagadnienia. Obciążenie psychiczne pracą może być bowiem traktowane jako:

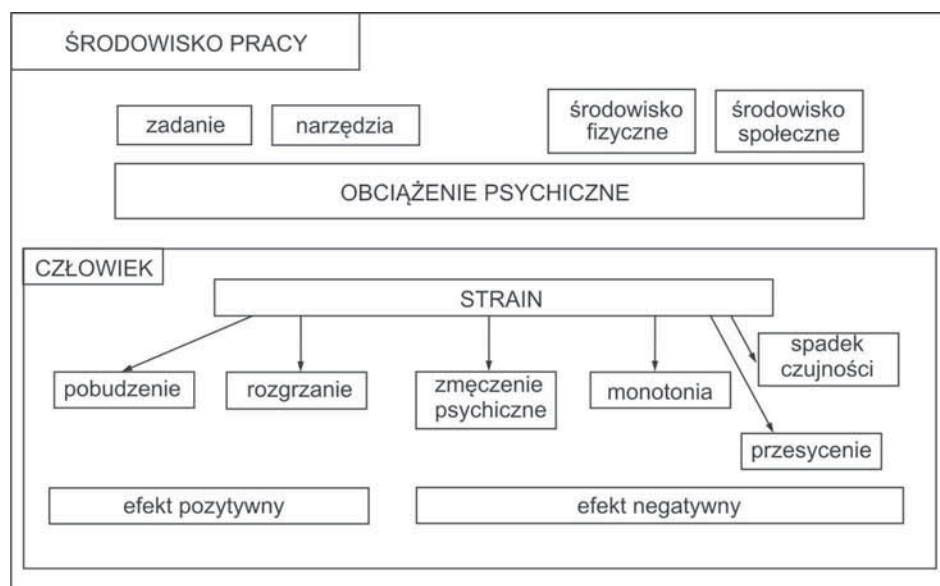
- cecha zadania
- stan organizmu
- niezgodność wymagań pracy i możliwości sprostania tym wymaganiom przez pracownika lub jako niezgodność oczekiwań pracownika odnośnie do warunków i charakteru pracy a możliwością zaspokojenia tych oczekiwań przez rzeczywistą sytuację pracy.

W niniejszym rozdziale obciążenie psychiczne będzie rozpatrywane z punktu widzenia narażenia zawodowego występującego przy pracach związanych z obsługą sieci elektroenergetycznych WN. Z tego względu przedmiotem zainteresowania będzie obciążenie psychiczne jako cecha zadania.

Obciążenie psychiczne pracą rozumiane jako cecha zadania oznacza zespół wszystkich dających się oszacować czynników środowiska zewnętrznego (tj. fizycznych i psychospołecznych elementów środowiska pracy), działających na człowieka podczas wykonywania określonych zadań i czynności na danym stanowisku pracy, wpływających na jego psychikę i zachowanie (PN-EN ISO 10 075-1). Rysunek 4-9 ilustruje model stres-strain, przyjęty w normie międzynarodowej PN-EN ISO 10 075-1, dotyczącej zasad ergonomicznych odnoszących się do obciążenia psychicznego pracą (*Ergonomic principles related to mental work-load*). W modelu tym pojęcie stres psychiczny (*mental stres*) utożsamia się z obciążeniem psychicznym związanym z wykonywaniem pracy (*mental work-load*). Wielkość obciążenia psychicznego pracą wyznaczają następujące podstawowe elementy środowiska pracy:

- cechy zadania, na które składa się poziom trudności i złożoności zadania oraz rodzaj sprawności i funkcji psychofizycznych zaangażowanych w wykonywanie zadania (sprawność motoryczna, refleks, procesy intelektualne: uczenie się, podejmowanie decyzji, zapamiętywanie)
- narzędzia niezbędne do realizacji zadań

- fizyczne elementy środowiska pracy, w tym: hałas, mikroklimat, oświetlenie, drgania i wibracje, zanieczyszczenia chemiczne, pyły itp.
- psychospołeczne elementy środowiska pracy związane z określonymi wymaganiami pracy (ilościowe i jakościowe obciążenia pracą, zakres kontroli pracowników nad warunkami i organizacją pracy) oraz czynniki organizacyjne (style zarządzania, pewność/niepewność pracy, stosunki społeczne, klimat organizacyjny, komunikacja, konflikty, wsparcie od przełożonych i współpracowników, wynagrodzenie za pracę).



Rys. 4-9. Model stres-strain (*Obciążenie...*, 2011, wg Nachreiner, 1999)

Obciążenie psychiczne określone przez wymienione czynniki środowiska pracy wywołuje u człowieka strain. Jest to natychmiastowy i krótkotrwały skutek obciążenia psychicznego, zależny od cech osobniczych i aktualnych uwarunkowań, w tym przede wszystkim od indywidualnego stylu radzenia sobie ze stresem.

Strain może mieć pozytywne lub negatywne konsekwencje. Do pozytywnych konsekwencji strainu zalicza się pobudzenie (aktywację), mające bezpośredni wpływ na skuteczność działania na poziomie fizjologicznym i psychicznym, oraz efekt rozgrzania następujący zazwyczaj po wzroście poziomu aktywacji i polegający na redukcji wysiłku niezbędnego do wykonania zadania, w porównaniu do sytuacji przed wzrostem poziomu aktywacji. Wśród negatywnych skutków strainu wymienia się zmęczenie psychiczne, oznaczające czasowe pogorszenie skuteczności działania na poziomie psychicznym i fizycznym, zależne od intensywności, czasu trwania i poprzednich wzorów odczuwanego strainu, a także uczucie monotonii, które może być następstwem wykonywania jednorodnych i powtarzających się czynności, przejawiające się m.in. sennością, zmęczeniem i wahaniem w zakresie

wydajności pracy. Negatywnym przejawem strainu jest też spadek poziomu czujności, widoczny jako obniżenie sprawności w zakresie wykrywania sygnałów, oraz stan przesylenia, silnie zabarwiony negatywnymi emocjami, związany z uczuciem niepewności oraz emocjonalną niechęcią np. w stosunku do wykonywania powtarzających się czynności.

Obciążenie psychiczne rozumiane jako cecha zadania jest zatem sumą obciążenia informacyjnego, wynikającego z tego, że bodźce środowiska zewnętrznego mają dla człowieka znaczenie treściowe (dostarczają informacji), oraz obciążenia stymulacyjnego związanego z tym, że bodźce te wywołują określony poziom pobudzenia.

## **Charakterystyka pracy elektromontera linii energetycznych i czynniki zagrażające mające związek z obciążeniem psychicznym pracą**

### ***Psychospołeczne i organizacyjne środowisko pracy***

Społeczne i organizacyjne warunki pracy elektromontera linii energetycznych zależą od miejsca zatrudnienia. W firmach wykonawczych elektromonter pracuje wyłącznie w porze dnia i w dni robocze, a czas jego pracy zależy od warunków atmosferycznych i jest nienormowany. Jest to praca rutynowa i okresowo nadzorowana. Natomiast w firmach usługowych, np. w pogotowiu energetycznym, praca jest wykonywana zależnie od otrzymanego zlecenia, ale wymaga ciągłej gotowości do podjęcia zadań (także w dni wolne od pracy) i może mieć charakter zmianowy. Zawsze jednak elektromonter linii energetycznych pracuje w zespole. Często jest to praca związana z dość długim pobytem z dala od domu. Ponadto, na intensywność pracy ma wpływ pora roku: większa awaryjność linii występuje zimą i jesienią (Barańska, 1998).

Opisane wyżej psychospołeczne i organizacyjne warunki pracy wiążą się ze znacznym obciążeniem psychicznym pracowników, które ma swoje źródło w zmienności pracy i potrzebie bycia dyspozycyjnym, częstym przebywaniem poza miejscem zamieszkania, trudnymi warunkami terenowymi i koniecznością stosowania środków ochrony indywidualnej (Romanowska-Słomka i Słomka, 2007). Zwraca się także uwagę na duże prawdopodobieństwo wystąpienia obciążenia emocjonalnego i stresu, wynikających ze zbyt dużych wymagań stawianych pracownikom oraz konfliktów międzyludzkich, które stwarzają duże ryzyko zawodowe (Bryła, 2007).

### ***Główne zadania i czynności robocze***

Podstawowe zadania elektromontera linii energetycznych to:

- budowa linii napowietrznych (np. montaż słupa betonowego, montaż słupa kratowego, stawianie słupa, montaż przewodów roboczych i odgromowych)

- naprawy linii i usuwanie awarii (np. naprawa lub wymiana przewodu, wymiana izolatora na linii WN, wymiana izolatora stojącego, wymiana mostka prądowego, naprawa konstrukcji słupa kratowego)
- prace eksploatacyjne (ogłędziny, przeglądy i remonty: czyszczenie i wymiana izolacji, odbudowa uziemień, regulacja zwisów przewodów, wymiana osprzętu przewodowego itp.).

W związku z wymienionymi zadaniami elektromonter linii energetycznych najczęściej wykonuje następujące czynności: wchodzenie na słupy i drabiny, włączanie i wyłączanie napięcia, spawanie, montaż i demontaż przewodów, naciąganie przewodów, zakładanie izolatorów, obcinanie gałęzi itp. Czynności te wymagają korzystania z elektronarzędzi i narzędzi pneumatycznych. Do czynności niemal codziennych zaliczyć trzeba także prowadzenie specjalistycznych pojazdów, co wynika z konieczności dotarcia do miejsca robót (Romanowska-Słomka i Słomka, 2007).

Zadania i czynności robocze w zawodzie elektromontera linii elektrycznych wiążą się z szeregiem zagrożeń, które przekładają się na wielkość obciążenia psychicznego pracą (*Ocena ryzyka...*, 2001; Bryła, 2007; Romanowska-Słomka i Słomka, 2007; *Zarządzanie...*, 2009). Głównym czynnikiem zagrożenia jest upadek z wysokości, wynikający z wykonywania prac montażowych, konserwacyjnych i naprawczych na wysokości. Zarówno ciężkość skutków tego zagrożenia jak i związane z nim ryzyko oceniane są jako duże. Kolejnym czynnikiem zagrażającym jest porażenie prądem elektrycznym, będące skutkiem wykonywania prac naprawczych lub montażowych przy urządzeniach elektrycznych bez odłączenia napięcia lub bez właściwego zabezpieczenia przed przypadkowym załączeniem, posługiwanie się elektronarzędziami w warunkach dużej wilgotności, kontakt z metalowymi obudowami maszyn i urządzeń, które mogą znaleźć się pod napięciem lub uszkodzenie izolacji przewodów przewodzących prąd. Ciężkość skutków porażenia prądem oraz związane z tym ryzyko oceniane są jako duże.

Innym czynnikiem zagrożenia jest pożar, którego skutki zwykle są ciężkie. Pożar może być wynikiem złego doboru parametrów instalacji elektrycznej, niedbałego wykonania prac instalacyjnych, obecności materiałów łatwopalnych w pobliżu urządzeń elektrycznych. Zagrożeniem jest także uderzenie spowodowane ruchomymi przedmiotami (przemieszczającymi się narzędziami, ruchomymi elementami maszyn), w przypadku którego ciężkość możliwych skutków i związane z tym ryzyko ocenia się jako duże. Źródłem zagrożenia jest również pole elektromagnetyczne, łączące się z wykonywaniem prac w obszarze stacji transformatorowych, rozdzielni wysokiego napięcia i linii przesyłowych oraz pole elektrostatyczne, występujące w pobliżu linii stałoprądowych. W przypadku tego zagrożenia ciężkość skutków zagrożenia oraz ryzyko z nim związane ocenia się jako duże.

Wśród możliwych zagrożeń wymienia się także promieniowanie ultrafioletowe, które występuje podczas spawania oraz kontakt z substancjami i preparatami chemicznymi (paliwa, oleje, farby, żywice izolacyjne, pasty lutownicze), którego konsekwencją może być alergia i uczulenia skóry. Zwraca się też uwagę na zagrożenie wypadkiem drogowym, którego źródłem może być prowadzenie prac w pasie ruchu drogowego oraz prowadzenie pojazdu w drodze do miejsca robót.

#### 4.4.2. Wymagania pracy (cechy krytyczne i przydatne)

Omówione w rozdziale 4.4.1 fizyczne i psychospołeczne środowisko pracy, zadania i czynności, stanowiące treść pracy elektromontera linii energetycznych, jak również zagrożenia, warunkują wymagania, jakie stawia się osobom wykonującym pracę w tym zawodzie lub kandydatom do zawodu. Wymagania pracy obejmują cechy i sprawności, jakie powinien mieć człowiek, aby móc wykonywać pracę bezpiecznie, tzn. bez stwarzania zagrożenia dla siebie i innych. Wiedza na ten temat służy również optymalizowaniu obciążenia (fizycznego i psychicznego) osób pracujących na danym stanowisku.

W przypadku obciążenia psychicznego wymagania pracy odnoszą się do tzw. cech krytycznych i cech przydatnych, wyróżnionych w obszarze czterech kategorii wskaźników psychologicznej przydatności zawodowej, a mianowicie: sprawności sensomotorycznych, zdolności, cech temperamentalno-osobowościowych oraz zainteresowań. Cecha krytyczna oznacza, że osoba, która nie ma jej w stopniu wystarczającym, nie może wykonywać pracy w zawodzie lub na stanowisku. Natomiast termin cecha przydatna oznacza, że posiadanie jej znacznie ułatwia pracę, ale nie jest to cecha absolutnie niezbędna do poprawnego i bezpiecznego wykonywania pracy, tzn., że zawód mogą wykonywać osoby nieposiadające tej cechy (Łuczak, 2001). W tym rozdziale wymienione zostaną cechy krytyczne i przydatne dla dwóch stanowisk: elektromonter linii wysokich i najwyższych napięć oraz elektromonter pogotowia energetycznego, wyróżnionych w zawodzie elektromonter linii energetycznych (Łuczak, 2001; Widerszal-Bazyl i in., 1995).

#### **Elektromonter linii wysokich i najwyższych napięć**

##### ***Sprawności sensomotoryczne***

- Cechy krytyczne
  - ostrość wzroku – ostrość widzenia, bez konieczności używania szkieł korekcyjnych
  - rozróżnianie barw – zdolność do porównywania lub odróżniania kolorów pod względem odcieni, nasycenia i jasności, rozpoznawanie pojedynczych



- barw lub ich kombinacji oraz spostrzeganie kombinacji barw kontrastowych
- widzenie stereoskopowe – widzenie głębi umożliwiające ocenę odległości
- widzenie o zmroku – zdolność dostrzegania kształtów przedmiotów w warunkach słabego natężenia światła
- zmysł równowagi – odczuwanie pozycji i ruchu ciała
- powonienie
- koordynacja wzrokowo-ruchowa – współdziałanie narządu wzroku i ruchu pozwalające na równoczesne posługiwanie się nimi
- szybki refleks – szybkie podejmowanie działania pod wpływem pojawiającego się bodźca
- spostrzegawczość – umiejętność dostrzegania szczegółów i nawet niewielkich różnic między przedmiotami
- zręczność rąk – sprawne i szybkie wykonywanie różnych czynności, także precyzyjnych, z użyciem obu rąk
- zręczność palców – umiejętność sprawnego i dokładnego manipulowania małymi przedmiotami z użyciem palców
- brak lęku przed wysokością.
- Cechy przydatne
  - ostrość słuchu – rozróżnianie wysokości i natężenia dźwięków.

### **Zdolności**

- Cechy krytyczne
  - zdolność koncentracji uwagi – skupienie uwagi na tym samym bodźcu lub problemie przez dłuższy czas
  - dobra pamięć – zdolność pozwalająca na zapamiętywanie dużej ilości różnorodnego materiału oraz na odtwarzanie treści zapamiętanych po długim odstępie czasowym
  - wyobraźnia przestrzenna – umiejętność wyobrażania sobie układów przestrzennych, odległości, położenia i manipulowania przestrzennymi poszczególnymi elementami bez ich spostrzegania (widzenia)
  - uzdolnienia techniczne – umiejętność posługiwania się różnymi narzędziami, instalowania i uruchamiania urządzeń technicznych, znajomość zasad ich działania, umiejętność wykonywania napraw urządzeń technicznych, wytwarzanie różnych przedmiotów użytkowych.
- Cechy przydatne
  - wyobraźnia i myślenie twórcze – dostrzeganie nowych, nietypowych rozwiązań, tworzenie nowych idei, pomysłów itp.

**Osobowość**

- Cechy krytyczne
  - odporność emocjonalna – brak silnych emocji negatywnych w sytuacjach trudnych (np. lęku, gniewu) i zdolność do efektywnych działań mimo trudności
  - samokontrola – umiejętność panowania nad własnymi emocjami
  - umiejętność współdziałania – umiejętność pracy w grupie
  - wytrwałość i cierpliwość – konsekwencja w dążeniu do osiągnięcia celu
  - odwaga – gotowość do podjęcia ryzyka narażenia własnego zdrowia lub życia, jeśli wymaga tego charakter pracy
  - dokładność – umiejętność wykonywania czynności i zadań wymagających ścisłego przestrzegania reguł, procedur i limitów, posługiwania się precyzyjnymi narzędziami i urządzeniami pomiarowymi.
- Cechy przydatne
  - samodzielność – umiejętność zaplanowania i zorganizowania sobie własnego działania oraz wykonania zadań bez pomocy innych.

**Zainteresowania**

- Cechy krytyczne
  - techniczne – przejawiają się w podejmowaniu takich prac, jak proste naprawy sprzętu gospodarstwa domowego, sprzętu RTV, samochodów, instalacji urządzeń mechanicznych, w samodzielnym wytwarzaniu różnych przedmiotów użytkowych, w majsterkowaniu. Towarzyszy im umiejętność posługiwania się różnego typu narzędziami, znajomość zasad działania urządzeń technicznych, umiejętność czytania planów i rysunków technicznych, poszerzanie wiedzy z zakresu nauk technicznych.

**Elektromonter pogotowia energetycznego****Sprawności sensomotoryczne**

- Cechy krytyczne
  - ostrość wzroku – ostrość widzenia, bez konieczności używania szkieł korekcyjnych
  - rozróżnianie barw – zdolność do porównywania lub odróżniania kolorów pod względem odcieni, nasycenia i jasności, rozpoznawanie pojedynczych barw lub ich kombinacji oraz spostrzeganie kombinacji barw kontrastowych
  - widzenie stereoskopowe – widzenie głębi umożliwiające ocenę odległości
  - widzenie o zmroku – zdolność dostrzegania kształtów przedmiotów w warunkach słabego natężenia światła

- zmysł równowagi – odczuwanie pozycji i ruchu ciała
- koordynacja wzrokowo-ruchowa – współdziałanie narządu wzroku i ruchu pozwalające na równoczesne posługiwanie się nimi
- szybki refleks – szybkie podejmowanie działania pod wpływem pojawiającego się bodźca
- spostrzegawczość – umiejętność dostrzegania szczegółów i nawet niewielkich różnic między przedmiotami
- zręczność rąk – sprawne i szybkie wykonywanie różnych czynności, także precyzyjnych, z użyciem obu rąk
- zręczność palców – umiejętność sprawnego i dokładnego manipulowania małymi przedmiotami z użyciem palców
- brak lęku przed wysokością.
- Cechy przydatne
  - ostrość słuchu – rozróżnianie wysokości i natężenia dźwięków
  - powonienie.

### **Zdolności**

- Cechy krytyczne
  - zdolność koncentracji uwagi – skupienie uwagi na tym samym bodźcu lub problemie przez dłuższy czas
  - dobra pamięć – zdolność pozwalająca na zapamiętywanie dużej ilości różnorodnego materiału oraz na odtwarzanie treści zapamiętanych po długim odstępie czasowym
  - wyobraźnia i myślenie twórcze – dostrzeganie nowych, nietypowych rozwiązań, tworzenie nowych idei, pomysłów itp.
  - uzdolnienia techniczne – umiejętność posługiwania się różnymi narzędziami, instalowania i uruchamiania urządzeń technicznych, znajomość zasad ich działania, umiejętność wykonywania napraw urządzeń technicznych, wytwarzanie różnych przedmiotów użytkowych.

### **Osobowość**

- Cechy krytyczne
  - łatwość przechodzenia od jednej czynności do drugiej – umiejętność częstego i szybkiego przestawiania się z jednej czynności na inną, zmiany formy aktywności, warunków pracy, metod działania, które wymagają różnych umiejętności i zdolności
  - odporność emocjonalna – brak silnych emocji negatywnych w sytuacjach trudnych (np. lęku, gniewu) i zdolność do efektywnych działań mimo trudności

- samokontrola – umiejętność panowania nad własnymi emocjami
- umiejętność współdziałania – umiejętność pracy w grupie
- odwaga – gotowość do podjęcia ryzyka narażenia własnego zdrowia lub życia, jeśli wymaga tego charakter pracy
- dokładność – umiejętność wykonywania czynności i zadań wymagających ścisłego przestrzegania reguł, procedur i limitów, posługiwania się precyzyjnymi narzędziami i urządzeniami pomiarowymi.
- Cechy przydatne
  - wytrzymałość na długotrwały wysiłek – zdolność do kontynuowania pracy bez odczuwania zmęczenia
  - umiejętność nawiązywania kontaktu z ludźmi – łatwość wchodzenia w kontakty społeczne i znajdowania się w sytuacjach społecznych
  - umiejętność postępowania z ludźmi – umiejętność porozumiewania się z innymi ludźmi, którzy zwracają się z prośbą o radę, informację, pomoc.

### **Zainteresowania**

- Cechy krytyczne
  - techniczne – przejawiają się w podejmowaniu takich prac, jak proste naprawy sprzętu gospodarstwa domowego, sprzętu RTV, samochodów, instalacji urządzeń mechanicznych, w samodzielnym wytwarzaniu różnych przedmiotów użytkowych, w majsterkowaniu. Towarzyszy im umiejętność posługiwania się różnego typu narzędziami, znajomość zasad działania urządzeń technicznych, umiejętność czytania planów i rysunków technicznych, poszerzanie wiedzy z zakresu nauk technicznych.

## **Bibliografia**

- Barańska A. (1998) *Elektromonter linii elektrycznych*. [W:] M. Widerszal-Bazyl i inni. Przewodnik po zawodach. T. IV. Warszawa, Krajowy Urząd Pracy, Ministerstwo Pracy i Polityki Socjalnej, 205-208.
- Bryła R. (2007) *Bezpieczne stanowisko pracy. Ocena ryzyka. Instrukcje stanowiskowe. Listy kontrolne*. Katowice, ELAMED.
- Bugajska J. (2008) *Fizjologia pracy*. [W:] Bezpieczeństwo i higiena pracy. Red. D. Koradecka. Warszawa, CIOP-PIB, 49-70.
- Bugajska J. (2010) *Fizjologiczne kryteria zdolności do pracy fizycznej osób starszych – wydatek energetyczny*. Warszawa, CIOP-PIB.

- Hignett S. (1996) *Postural analysis of nursing work*. Appl. Ergon., 27, 171-185.
- Kirschner H. (2007) *Obciążenie wysiłkiem fizycznym dynamicznym podczas pracy*. [W:] Materiały edukacyjne dla uczelni wyższych. Warszawa, CIOP-PIB.
- Konarska M., Kurkus-Rozowska B. (1993) *Application of pulmonary ventilation measurements to assess energy expenditure during manual and massive*. [W:] IEA'94, Proceedings. 89-92.
- Kozłowski S., Nazar K. (1995) *Wprowadzenie do fizjologii klinicznej*. Warszawa, PZWL.
- Lehmann G. (1966) *Praktyczna fizjologia pracy*. Warszawa, PZWL.
- Łuczak A. (2001) *Wymagania psychologiczne w doborze osób do zawodów trudnych i niebezpiecznych*. Warszawa, CIOP.
- Makowiec-Dąbrowska T. (1999) *Fizjologia pracy*. [W:] Higiena pracy. T. 1. Red. J.A. Indulski. Łódź, IMP, 59-99.
- Makowska Z. (1984) *Kontrowersje wokół pojęcia „psychiczne obciążenie pracą”*. Studia i Materiały Monograficzne, Łódź, IMP, 1(18), 40-47.
- Mulder G., Mulder L.J.M. (1981) *Information processing and cardiovascular control*. Psychophysiology, 18, 392-402.
- Nachreiner F. (1999) *International standards on mental work – load – The ISO 10075 Series*. Industrial Health, 37, 125-133.
- Obciążenie psychiczne pracą – nowe wyzwania dla ergonomii* (2011) Red. T. Juliszewski, H. Ogińska, M. Złowodzki. Kraków, Komitet Ergonomii PAN.
- Ocena ryzyka zawodowego na stanowisku elektromonter* (2001) Gdańsk, Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr.
- Romanowska-Słomka I., Słomka A. (2007) *Zarządzanie ryzykiem w energetyce*. [W:] BHP w energetyce. Poradnik dla każdej firmy. Red. J. Knyziak. 113-117.
- Sheridan T.B. (1980) *Mental workload – what is it? Why bother with it?* Human Factors Society Bulletin, 23, 2, 1-2.
- Widerszal-Bazyl M. i in. (1995) *Kwestionariusz Analizy Stanowiska Pracy*. CIOP, GIG, MPiPS [Materiał niepublikowany].
- Zarządzanie bezpieczeństwem pracy. Ocena ryzyka zawodowego. Elektromonter linii napowietrznych*. (Poradnik aktualizowany). Poznań, Wydawn. FORUM.
- Żarczyński Z., Noworol Cz. (1991) *Problem zmęczenia i obciążenia psychicznego oraz subiektywne metody ich badania*. Ergonomia, 14, 1, 89 -107.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 14 marca 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy ręcznych pracach transportowych*. DzU 2000, nr 26, poz. 313, ze zmianami.
- PN-EN 1005-2+A1:2010 *Bezpieczeństwo maszyn – Możliwości fizyczne człowieka – Cz. 2.: Ręczne przemieszczanie maszyn i ich części*.
- PN-EN ISO 10 075-1 (2002) *Zasady ergonomiczne dotyczące obciążenia psychicznego pracą*.



# 5. Czynniki atmosferyczne (mikroklimat i promieniowanie optyczne)

Anna Bogdan, Agnieszka Wolska

## 5.1. Mikroklimat w środowisku naturalnym

– Anna Bogdan (109)

5.1.1. Charakterystyka parametrów mikroklimatu w Polsce (110)

5.1.2. Procesy wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem (110)

5.1.3. Metody oceny obciążenia termicznego pracowników w warunkach atmosferycznych (113)

5.1.4. Przykładowe profile narażenia na mikroklimat zimny i gorący (120)

## 5.2. Naturalne promieniowanie optyczne

– Agnieszka Wolska (122)

5.2.1. Charakterystyka promieniowania słonecznego w Polsce (124)

5.2.1.1. Promieniowanie słoneczne (124)

5.2.1.2. Wielkości radiometryczne wykorzystywane do ilościowej charakterystyki naturalnego promieniowania UV (125)

5.2.1.3. Charakterystyka naturalnego promieniowania UV w Polsce (129)

5.2.2. Oddziaływanie promieniowania optycznego na organizm człowieka (131)

5.2.2.1. Biologiczne skutki narażenia tkanek na promieniowanie optyczne (131)

5.2.2.2. Zagrożenie oczu (132)

5.2.2.3. Zagrożenie skóry (134)

5.2.2.4. Zagrożenie olśnieniem (136)

5.2.3. Metoda oceny narażenia (137)

5.2.4. Przykładowe profile narażenia na naturalne promieniowanie optyczne (140)

5.2.4.1. Analizowane parametry (140)

5.2.4.2. Napromienienie erytemalne w ciągu zmiany roboczej (141)

5.2.4.3. Uśrednione napromienienie erytemalne (142)

5.2.4.4. Wskaźnik napromienienia erytemalnego (143)

5.2.4.5. Profile zagrożenia naturalnym UV (144)

Bibliografia (145)

## 5.1. Mikroklimat w środowisku naturalnym

Podczas prac eksploatacyjnych sieci elektroenergetycznych warunki środowiska pracy determinowane są aktualnymi warunkami pogodowymi. Standardowo wykonywane oględziny, przeglądy i remonty, w odróżnieniu od usuwania nagłych awarii, mogą być prowadzone w zaplanowanym czasie i miejscu, jednakże ze względu na brak możliwości przewidzenia warunków atmosferycznych, podczas wykonywania takich czynności pojawia się ryzyko wystąpienia obciążenia termicznego organizmu.

W przypadku pracy w środowisku naturalnym jedynymi elementami, które można zmieniać w celu minimalizacji wpływu warunków pracy na organizm, są stosowane ochrony osobiste (głównie ze względu na izolacyjność cieplną odzieży ochronnej) oraz dopuszczalny czas ekspozycji na środowisko gorące lub zimne. Warunkiem wyznaczenia właściwych rozwiązań jest znajomość wpływu poszczególnych parametrów środowiska oraz specyfiki wykonywanej pracy na odczucia cieplne człowieka, a także metod oceny obciążenia termicznego organizmu.

W niniejszym podrozdziale przedstawiono informacje m.in. dotyczące procesów wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem, metod oceny obciążenia termicznego organizmu oraz przykładowych profili narażenia pracowników sieci elektroenergetycznych.

### 5.1.1. Charakterystyka parametrów mikroklimatu w Polsce

Polska znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego o cechach przejściowych. Klimat Polski odznacza się dużą zmiennością pogody i znacznymi wahaniami przebiegu pór roku w następujących po sobie latach. Z jednej strony w Polsce występują łagodne zimy i niezbyt upalne lata, z drugiej strony, szczególnie w ostatnich latach, można zauważyć występowanie dni o bardzo wysokiej temperaturze powietrza latem w połączeniu z promieniowaniem słonecznym o dużym natężeniu, jak również dni o bardzo niskiej temperaturze powietrza zimą, łącznie z opadami i dużą prędkością wiatru. Zazwyczaj najcieplejszymi rejonami Polski są Nizina Śląska i zachodnia część Kotliny Sandomierskiej (ponad 8 °C), a najchłodniejszymi – północno-wschodnia część Polski (Suwałki) oraz teren górski. Średnia prędkość wiatru w Polsce dochodzi do 6 m/s, jednakże występują okresy, w których wiatr osiąga prędkość 80 km/h (*Atlas klimatu...*, 2005). Maksymalna temperatura powietrza latem, zanotowana w Prószkowie k. Opola, wynosiła 40,2 °C, minimalna zimą (Siedlce) – -41,0 °C (*Atlas klimatu...*, 2005). Rocznie liczba dni z temperaturą powietrza poniżej 0 °C wynosi od ok. 20 (Polska zachodnia) do ok. 50 (wschodnia część Polski). Średnioroczna wilgotność powietrza wynosi od ok. 8% w centralnej części do 95% w północnej części Polski (*Atlas klimatu...*, 2005). Jednocześnie długoterminowe prognozy IMiGW wskazują, iż w Polsce będzie coraz cieplej, co wiąże się z dłuższymi falami upałów latem oraz łagodnymi zimami.

### 5.1.2. Procesy wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem

Człowiek jest organizmem stałocieplnym i jego temperatura wewnętrzna powinna być stała, na poziomie  $37\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$  (Grether, 1973). Między człowiekiem a otoczeniem dochodzi jednak do ciągłej wymiany ciepła. Podczas pracy w środowisku gorącym lub zimnym może dojść do nadmiernego przegrzania (w konsekwencji hipertermii) lub wychłodzenia organizmu (w konsekwencji do hipotermii) organizmu. Bilans cieplny pomiędzy organizmem człowieka a otoczeniem opisano równaniem (5-1), a parametry wchodzące w jego skład przedstawiono schematycznie na rysunku 5-1.

$$M - W = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S_{sk} + S_{cr} \quad (5-1)$$

gdzie:

$M$  – metaboliczne wytwarzanie ciepła,  $W/m^2$

$W$  – ilość ciepła zamieniana na moc mechaniczną,  $W/m^2$

$C+R$  – ilość ciepła oddawanego do otoczenia na drodze konwekcji i promieniowania (tzw. ciepło jawne),  $W/m^2$

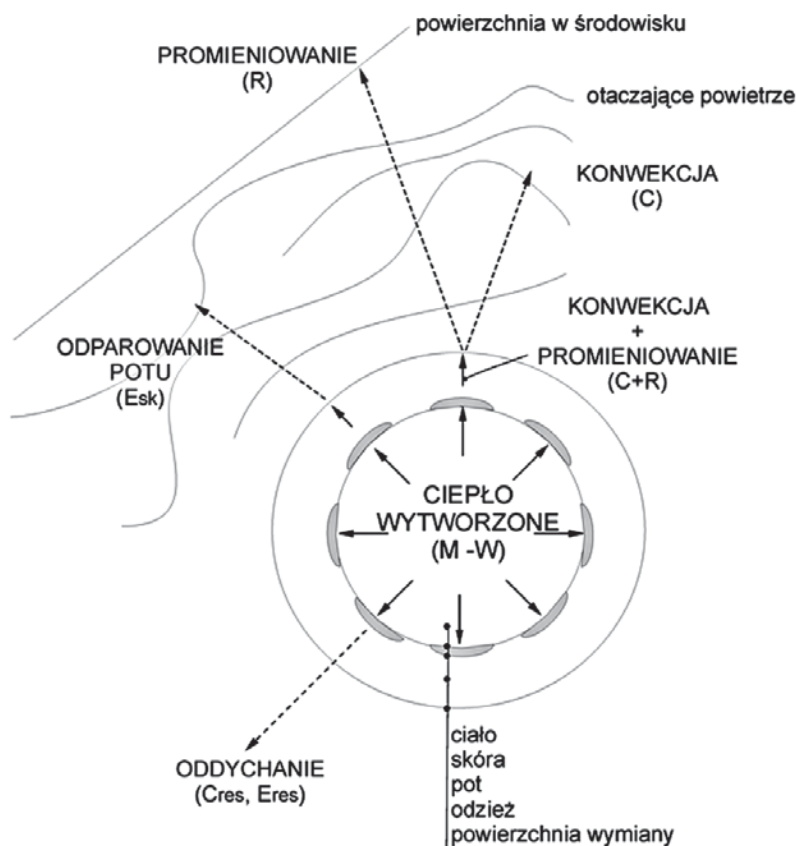
$E_{sk}$  – ilość ciepła oddawanego do otoczenia poprzez odparowanie potu z powierzchni skóry (tzw. ciepło utajone),  $W/m^2$

$C_{res}$  – ilość ciepła oddawanego do otoczenia poprzez oddychanie, na drodze konwekcji,  $W/m^2$

$E_{res}$  – ilość ciepła oddawanego do otoczenia poprzez oddychanie, na drodze odparowania,  $W/m^2$

$S_{sk}$  – ilość ciepła akumulowanego w skórze,  $W/m^2$

$S_{cr}$  – ilość ciepła akumulowanego w organizmie,  $W/m^2$ .



**Rys. 5-1.** Procesy wymiany ciepła pomiędzy organizmem a otoczeniem (ASHRAE, 2009)

Na składowe bilansu cieplnego i w konsekwencji na wystąpienie obciążenia termicznego mają wpływ następujące parametry:

- ilość ciepła odbierana przez otoczenie, tj. parametry otaczającego środowiska: temperatura powietrza, temperatura promieniowania, prędkość powietrza, wilgotność względna powietrza

- ilość ciepła generowana przez człowieka i odprowadzanego z jego organizmu, tj.: metabolizm, wiek, aklimatyzacja, indywidualne czynniki psychofizyczne (stan zdrowia, poziom stresu itp.) oraz izolacyjność cieplna stosowanej odzieży.

Określenie, w jakim środowisku znajduje się pracownik, jest zatem kwestią bardzo indywidualną i nie można kryterium granicznego środowiska sprowadzać do jednego parametru, np. temperatury powietrza, gdyż zależy ono od wszystkich wyżej wymienionych parametrów.

Zależność pomiędzy parametrami indywidualnymi i środowiskowymi a odczuciami cieplnymi ujęta jest w równaniu służącym do obliczania wskaźnika PMV (ang. *Predicted Mean Vote* – przewidywana ocena średnia), podanym w normie PN-EN ISO 7730:2006. Ogólnie przyjmuje się, iż ocena pracowników dotycząca środowiska termicznego, w którym przebywają, zależy od parametrów uwzględnionych w równaniu (5-2):

$$PMV = f(M, W, I_{cl}, f_{cl}, t_a, t_r, v_a, p_a, h_c, t_{cl}) \quad (5-2)$$

gdzie:

$M$  – tempo metabolizmu,  $W/m^2$

$W$  – efektywna praca mechaniczna,  $W/m^2$

$I_{cl}$  – izolacyjność cieplna odzieży,  $m^2 \cdot K/W$

$f_{cl}$  – współczynnik powierzchni odzieży

$t_a$  – temperatura powietrza,  $^{\circ}C$

$t_r$  – temperatura promieniowania,  $^{\circ}C$

$v_a$  – prędkość powietrza,  $m/s$

$p_a$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej,  $Pa$

$h_c$  – współczynnik konwekcji ciepła,  $W/(m^2 \cdot K)$

$t_{cl}$  – temperatura powierzchni odzieży,  $^{\circ}C$ .

Wskaźnik PMV opisuje średnią przewidywaną ocenę dużej liczby osób przebywających w danym pomieszczeniu, dotyczącą panujących w nim warunków termicznych. Wskaźnik ten wyraża różnicę pomiędzy rzeczywistą ilością ciepła oddawaną przez człowieka do otoczenia i odbieraną przez środowisko otaczające a optymalną ilością ciepła, która zostałaby oddana z organizmu do otoczenia w warunkach komfortu przy danej aktywności. W zależności od wartości PMV opisuje następujące odczucia cieplne (PN-EN ISO 7730:2006):

+3 gorąco

+2 ciepło

+1 umiarkowanie ciepło

0 neutralnie

- 1 umiarkowanie chłodno
- 2 chłodno
- 3 zimno.

Na tej podstawie można określić, iż w środowisku charakteryzowanym przez PMV zawarte w granicach od -2,0 do +2,0 nie występuje obciążenie termiczne organizmu. Środowisko takie określa się jako termoneutralne. Środowisko charakteryzowane przez  $PMV < -2,0$  określa się mianem środowiska zimnego, gdyż w tych warunkach może dojść do nadmiernego wychłodzenia organizmu, natomiast środowisko o  $PMV > +2,0$  definiuje się jako środowisko gorące, w którym może dojść do przegrzania organizmu.

Zasady oceny środowiska termicznego zostały określone w *Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej* (2002, 2009, 2011). W rozporządzeniu znajduje się odwołanie do aktualnych norm, którymi są:

- PN-EN 27243:2005 *Środowiska gorące – Wyznaczanie obciążenia termicznego działającego na człowieka podczas pracy, oparte na wskaźniku WBGT*
- PN-EN ISO 7730:2006 *Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego* (oryg.)
- PN-EN ISO 11079:2008 *Ergonomia środowiska termicznego – Wyznaczanie i interpretacja stresu termicznego wynikającego z ekspozycji na środowisko zimne z uwzględnieniem wymaganej izolacyjności cieplnej odzieży (IREQ) oraz wpływu wychłodzenia miejscowego* (oryg.).

### 5.1.3. Metody oceny obciążenia termicznego pracowników w warunkach atmosferycznych

Zgodnie z aktualnymi uregulowaniami ocena wpływu środowiska termicznego na organizm człowieka odbywa się w 2 etapach:

- ocena wartości wskaźnika PMV. Jeżeli wynosi ona powyżej +2,0 – pracownik znajduje się w środowisku gorącym; jeżeli poniżej -2,0 – pracownik znajduje się w środowisku zimnym
- określenie wartości wskaźnika odpowiedniego dla danego rodzaju środowiska termicznego oraz porównanie tej wartości z wartościami dopuszczalnymi określonymi w normie.

Poniżej w punktach przedstawiono informacje na temat metody prowadzenia badań i oceny za pomocą poszczególnych wskaźników.



## Wskaźnik PMV

Zgodnie z przytoczonym rozporządzeniem, w celu określenia, w jakim środowisku (gorącym, umiarkowanym czy zimnym) znajduje się pracownik, należy przeprowadzić ocenę wartości opisanego w rozdziale 5.1.2 wskaźnika PMV. Odbywa się to w 2 etapach:

1. Pomiar następujących parametrów środowiska: temperatury powietrza  $t_a$ , temperatury promieniowania  $t_r$ , prędkości powietrza  $v$ , ciśnienia cząstkowego pary wodnej  $p_a$  lub wilgotności powietrza  $rh$ . Należy również określić tempo metabolizmu oraz izolacyjność cieplną odzieży stosowanej przez pracowników – można w tym celu skorzystać z tabel zawartych w normie PN-EN ISO 7730:2006. W uproszczeniu można przyjąć, iż izolacyjność cieplna zestawu odzieży stosowanej przez pracowników prowadzących prace eksploatacyjne jest równa latem 0,80 clo (co odpowiada zestawowi składającemu się z: bielizny, koszuli, kombinezonu, skarpet i butów), a zimą 1,20 clo (bielizna z długimi rękawami i nogawkami, kurtka termiczna, spodnie, skarpety i buty).

2. Obliczenie wartości wskaźnika PMV na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów. Wartość PMV można obliczyć, korzystając z programu przedstawionego w załączniku D normy PN-EN ISO 7730:2006 lub dostępnych aplikacji (np. w programie STER CIOP-PIB) bądź korzystając z tabel przedstawionych w załączniku E normy PN-EN ISO 7730:2006. Następnie obliczoną wartość PMV należy porównać z zakresem przedstawionym w tabeli 5-1.

**Tabela 5-1.** Zakresy wskaźnika PMV w zależności od warunków środowiska termicznego

PMV $\leq$ -2,0	-2,0 < PMV < +2,0	PMV $\geq$ +2,0
Środowisko zimne	Środowisko umiarkowane	Środowisko gorące

## Wskaźnik WBGT

Ocena obciążenia termicznego w środowisku gorącym przedstawiona w normie PN-EN 27243:2005 opiera się na wskaźniku WBGT (ang. *Wet Bulb + Globe Temperature* – czujnik do pomiaru temperatury wilgotnej naturalnej  $t_{nw}$  + czujnik do pomiaru temperatury poczernionej kuli  $t_g$ ). Metoda ta składa się z 3 etapów:

1. Wizja lokalna, określenie chronometrażu pracy, określenie punktów pomiarowych.

Zgodnie z normą PN-EN 27243:2005 badania obciążenia termicznego powinny być prowadzone w okresie 1 godziny, podczas której występuje maksymalne obciążenie termiczne pracowników, zazwyczaj latem w środku dnia, kiedy jest maksymalne promieniowanie słoneczne lub też wysoka temperatura powietrza. Istotne jest również rozpoznanie trybu pracy pracowników. Jeżeli w ciągu 1 godziny, podczas

której prowadzone są badania, pracownik zmienia środowisko termiczne (np. część czasu spędza na zewnątrz, a część wewnątrz budynku), badania należy przeprowadzić z uwzględnieniem czasu ekspozycji pracownika na poszczególne warunki, tj. atmosferyczne i sztuczne w pomieszczeniu.

## 2. Pomiar parametrów środowiska.

Pomiar parametrów środowiska pracy w środowisku naturalnym powinien obejmować: temperaturę wilgotną naturalną ( $t_{nw}$ ), temperaturę poczernionej kuli ( $t_g$ ) i temperaturę powietrza ( $t_a$ ). Następnie z wyników przeprowadzonych badań oblicza się wartość wskaźnika WBGT, korzystając ze wzoru (5-3):

$$\text{WBGT} = 0,7t_{nw} + 0,2t_g + 0,1t_a \quad (5-3)$$

Jeżeli natomiast pracownik podczas 1 godziny prowadzenia oceny zmienia środowisko (niejednorodność w czasie) – wówczas należy obliczyć wartość uśrednioną WBGT, uwzględniając te zmiany i korzystając ze wzoru (5-4):

$$\bar{p} = \frac{(p_1 \cdot t_1) + (p_2 \cdot t_2) + \dots + (p_n \cdot t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (5-4)$$

gdzie:

$p$  – parametr środowiska, który ulega zmianie

$t$  – czas ekspozycji na dane środowisko.

## 3. Porównanie obliczonej wartości wskaźnika WBGT z wartościami dopuszczalnymi przedstawionymi w normie.

W tabeli 5-2 przedstawiono wartości dopuszczalne zamieszczone w normie PN-EN 27243:2005. Wartości dopuszczalne (odniesienia) WBGT odpowiadają poziomom ekspozycji, na które mogą być ekspozowane prawie wszystkie osoby bez żadnych szkodliwych skutków, pod warunkiem, że nie stwierdzono u nich wcześniej występujących stanów chorobowych (odniesieniem jest dopuszczalna maksymalna temperatura wewnętrzna równa 38 °C). Wartości te zostały opracowane dla osoby zdrowej, ubranej w odzież o izolacji termicznej równej 0,6 clo. Jeżeli pracownik ubrany jest w zestaw odzieży o innej izolacyjności cieplnej, należy dokonać modyfikacji obliczonej wartości (zgodnie z normą PN-85/N-08011). Wartości dopuszczalne nie uwzględniają szczytowego obciążenia termicznego, jakie może występować w ciągu krótkich (kilkuminutowych) okresów, w wyniku szczególnie gorącego otoczenia albo chwilowo bardzo intensywnej pracy. W przypadku ryzyka wystąpienia krótkotrwałego obciążenia termicznego ocenę jego wielkości powinno się przeprowadzić zgodnie ze szczegółowymi metodami przedstawionymi w normie PN-EN ISO 7933:2005.

Na podstawie porównania obliczonej wartości WBGT z wartością dopuszczalną można określić, czy w danych warunkach możliwa jest praca przez całą zmianę roboczą. Jeżeli wartość WBGT na stanowisku pracy jest większa od dopuszczalnej, wówczas należy określić czas skróconej ekspozycji na podstawie normy PN-EN ISO 7933:2005.

**Tabela 5-2.** Wartości dopuszczalne WBGT (PN-EN 27243:2005)

Klasa tempa metabolizmu	Tempo metabolizmu, $M$		Wartość odniesienia WBGT			
	odniesione do jednostki powierzchni skóry $W/m^2$	całkowite (przy średniej powierzchni skóry $1,8 m^2$ ) $W$	osoba zaaklimatyzowana w środowisku gorącym °C		osoba niezaaklimatyzowana w środowisku gorącym °C	
0 (spoczynek)	$M \leq 65$	$M \leq 117$	33		32	
1	$65 < M \leq 130$	$117 < M \leq 234$	30		29	
2	$130 < M \leq 200$	$234 < M \leq 360$	28		26	
3	$200 < M \leq 260$	$360 < M \leq 468$	nie-odczuwalny ruch powietrza 25	odczuwalny ruch powietrza 26	nie-odczuwalny ruch powietrza 22	odczuwalny ruch powietrza 23
4	$M > 260$	$M > 468$	23	25	18	20

Uwaga – Podane wartości ustalono przyjmując dopuszczalną temperaturę 38 °C mierzoną w odbytnicy osoby ekspozowanej na gorące środowisko

### Wskaźnik IREQ oraz $t_{wc}$

W środowisku zimnym do oceny obciążenia termicznego człowieka stosuje się wskazania normy PN-EN ISO 11079:2008. Zgodnie z wymienioną normą ocenę można podzielić na 2 elementy ze względu na specyfikę środowiska zimnego. Zagrożeniem człowieka w środowisku zimnym może być hipotermia, która wynika z wychłodzenia całego ciała, lub też miejscowe wychłodzenie organizmu, np. nieosłoniętych części ciała (twarz, ręce), występujące podczas pracy w środowisku naturalnym, poza pomieszczeniami zamkniętymi. Z tej przyczyny w normie PN-EN ISO 11079:2008 podano informacje o ocenie obciążenia termicznego całego ciała człowieka (ocenanego za pomocą wskaźnika IREQ) oraz wychłodzenia miejscowego (ocenanego z pomocą wskaźnika  $t_{wc}$ ).

Zgodnie z zapisami normy PN-EN ISO 11079:2008 wskaźnik IREQ (ang. *Required Clothing Insulation* – wymagana izolacyjność cieplna odzieży) traktowany

jest przede wszystkim jako miara stresu cieplnego integrująca wpływ temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, wilgotności względnej oraz prędkości powietrza dla określonych poziomów tempa metabolizmu. Z tej przyczyny pośrednio poprzez izolacyjność cieplną odzieży, jaka ma być zastosowana podczas pracy w środowisku zimnym, można stwierdzić ilościowo, jak środowisko wpływa na organizm człowieka. Zaleca się, aby wskaźnik ten był używany w przypadku, gdy główne parametry środowiska zawarte są w następujących granicach:

$$t_a \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq v_a \leq 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} (0,5 \text{ clo}).$$

W normie PN-EN ISO 11079:2008 wprowadzono podział wskaźnika IREQ na dwa wskaźniki szczegółowe:

- $IREQ_{min}$  określa minimalną izolacyjność cieplną odzieży wymaganą do utrzymania równowagi cieplnej organizmu na podnormalnym poziomie średniej temperatury organizmu. Minimalna wartość IREQ określa nieznaczne wychłodzenie organizmu, w szczególności wychłodzenie obwodowych części ciała. Podczas długotrwałej ekspozycji na środowisko zimne wychłodzenie kończyn może stać się czynnikiem ograniczającym jej czas
- $IREQ_{neutral}$  określany jest jako izolacyjność cieplna odzieży wymagana do zapewnienia warunków neutralnych cieplnie, tj. równowagi cieplnej utrzymywanej przy normalnym poziomie średniej temperatury ciała. Poziom ten charakteryzuje się brakiem wychłodzenia lub minimalnym wychłodzeniem organizmu człowieka.

Patrząc zatem na podział środowiska zimnego ze względu na dwa wskaźniki szczegółowe IREQ, można zauważyć wyznaczenie trzech przedziałów:

I.		II.		III.
Nadmierne wychłodzenie organizmu	< $IREQ_{min}$ <	Strefa bezpieczna	< $IREQ_{neutral}$ <	Nadmierne przegrzanie organizmu

I. Nadmierne wychłodzenie organizmu. Jeżeli izolacyjność cieplna odzieży stosowanej na stanowisku pracy jest niższa od wartości  $IREQ_{min}$ , może dojść do obniżenia temperatury wewnętrznej w organizmie pracownika, zatem wymagane jest znaczne skrócenie czasu pracy lub też zmiana odzieży.

II. Strefa bezpieczna. Jeżeli izolacyjność cieplna odzieży stosowanej na stanowisku pracy jest zawarta między wartościami  $IREQ_{min}$  i  $IREQ_{neutral}$ , izolacyjność

cieplna odzież jest prawidłowa, pracownik będzie odczuwał lekki chłód lub też będzie w stanie komfortu cieplnego; można obliczyć dopuszczalny czas ekspozycji.

III. Nadmierne przegrzanie organizmu. Jeżeli izolacyjność cieplna odzieży stosowanej na stanowisku pracy jest wyższa od wartości  $IREQ_{neutral}$ , może dojść do przegrzania organizmu. Jeżeli pracownik jest zbyt ciepło ubrany, odczuwa środowisko jako środowisko gorące i w organizmie uruchamiane są mechanizmy termoregulacji występujące w środowisku gorącym, a więc rozszerzanie naczyń krwionośnych i pocenie. Wydzielany pot jest następnie wchłaniany przez warstwy odzieży i prowadzi do obniżenia wartości jej izolacyjności cieplnej. Tak więc zbyt ciepła odzież może de facto doprowadzić najpierw do przegrzania organizmu, a następnie do nadmiernego wychłodzenia. Z tej przyczyny należy albo zmienić odzież, którą stosują pracownicy, albo uprzedzić pracowników, że jeżeli będą odbierać środowisko jako gorące i zaczną się pocić, to powinni przejść do innego (chłodniejszego) pomieszczenia lub też zmienić odzież na suchą lub lżejszą bądź pracować z mniejszą intensywnością.

Wskaźnik  $t_{WC}$  (ang. *Wind Chill Temperature* – temperatura chłodzenia powietrzem) określa temperaturę chłodzenia powietrzem, a więc „odczuwalną temperaturę powietrza”. Wskaźnik ten integruje zarówno odczucie wywołane zimnym środowiskiem jak i ruchem powietrza (jego prędkością).  $t_{WC}$  pozwala ocenić jeden z elementów wychłodzenia miejscowego ciała, tj. wychłodzenie poprzez konwekcyjne odbieranie ciepła. Pozostałe przyczyny wychłodzenia, tj. wychłodzenie poprzez przewodzenie i wychłodzenie kończyn, ocenia się zgodnie z normami PN-EN ISO 13732-3:2009 oraz PN-EN 511:2009, a wychłodzenie górnych dróg oddechowych jest oceniane poprzez najniższą temperaturę powietrza zalecaną do oddychania. Do pracy w temperaturze poniżej  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  zalecane jest zastosowanie ochron układu oddechowego przy dużym poziomie aktywności (przy zwiększonej objętości wentylacji). Przy temperaturze poniżej  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ochrona dróg oddechowych jest zdecydowanie potrzebna.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 11079:2008 temperatura chłodzenia powietrzem ( $t_{WC}$ ) określa temperaturę otoczenia, przy której prędkość ruchu powietrza równa  $4,2\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  powoduje taką samą siłę chłodzącą (odczucie), jak rzeczywiste warunki środowiska. Temperatura chłodzenia powietrzem (w stopniach Celsjusza) jest określana następującym wzorem (PN-EN ISO 11079:2008):

$$t_{WC} = 13,12 + 0,6215t_a - 11,37v_{10}^{0,16} + 0,3965t_a v_{10}^{0,16} \quad (5-5)$$

gdzie:

$t_a$  – temperatura powietrza,  $^{\circ}\text{C}$

$v_{10}$  – standardowa wartość meteorologiczna mierzona na wysokości 10 m powyżej powierzchni gruntu. Wartość ta jest otrzymywana ze stacji meteorologicznych oraz prognoz pogody. Jeżeli lokalna wartość prędkości powietrza ( $v_{10}$ ) jest mierzona na poziomie gruntu, należy ją pomnożyć przez 1,5 przed wstawieniem do wzoru.



Wartości  $t_{wc}$  obliczone na stanowisku pracy należy porównać z wartościami przedstawianymi w tabeli D.1 z normy PN-EN ISO 11079:2008, natomiast w tabeli D.2 oraz przytoczonej poniżej tabeli 5-3 wskazano odniesienie  $t_{wc}$  do czasu zamarzania skóry.

**Tabela 5-3.** Temperatura chłodzenia powietrza ( $t_{wc}$ ) oraz czas zamarzania narażonej skóry (PN-EN ISO 11079:2008)

Klasyfikacja ryzyka	$t_{wc}$ , °C	Skutek
1	-10 ÷ -24	Nieprzyjemnie zimno
2	-25 ÷ -34	Bardzo zimno, ryzyko zamarznięcia skóry
3	-35 ÷ -59	Przenikliwie zimno, eksponowana skóra może zamarznąć w ciągu 10 min
4	-60 i zimniej	Ekstremalnie zimno, eksponowana skóra może zamarznąć w ciągu 2 min

Metoda oceny obciążenia termicznego występującego w środowisku zimnym składa się z następujących etapów:

1. Wizja lokalna, w tym pobieżna ocena środowiska pracy, ocena izolacyjności cieplnej odzieży pracowników, przygotowanie chronometrażu czasu pracy.

2. Wykonanie:

- pomiaru parametrów środowiska pracy, tj.: temperatury powietrza  $t_a$ , temperatury promieniowania  $t_r$ , prędkości powietrza  $v$  i wilgotności względnej powietrza RH. Pomiary te należy wykonywać na wysokości reprezentującej brzuch stojącego pracownika. Jeżeli pracownik przemieszcza się i zmienia środowisko pracy, pomiary należy przeprowadzić w każdym z tych środowisk
- pomiaru lub oceny tempa metabolizmu pracownika oraz izolacyjności cieplnej jego odzieży. Ocenę taką można przeprowadzić korzystając z informacji zawartych w normie PN-EN ISO 11079:2008. Jak wspomniano wcześniej, pracę przy remontach sieci elektroenergetycznych można zaklasyfikować do prac od umiarkowanego do wysokiego tempa metabolizmu ( $165 \div 175 \text{ W/m}^2$ ), a izolacyjność odzieży stosowanej zimą można przyjąć na poziomie 1,2 clo. Ważnym parametrem jest również przepuszczalność powietrza przez zestaw odzieży. Informacje na ten temat można znaleźć albo w certyfikacie odzieży, albo w normie PN-EN ISO 9920:2009. Jeżeli jednak nie ma możliwości określenia tego parametru, należy przyjąć, że odzież do pracy poza pomieszczeniami zamkniętymi jest zazwyczaj wykonana z wiatroszczelnych tkanin – w tym przypadku przyjmowana jest wartość standardowa  $8 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3. Wykonanie:

- obliczenia wartości wskaźników  $IREQ_{min}$  i  $IREQ_{neutral}$ . W celu obliczenia poszczególnych wartości podwskaźników  $IREQ$  można zastosować wykresy zamieszczone w normie PN-EN ISO 11079:2008 w załączniku E lub też program zamieszczony bezpłatnie w Internecie. Link do programu przedstawiono w załączniku F do normy PN-EN ISO 11079:2008. Dostępna jest również nowsza wersja programu pod adresem: [http://wwwold.eat.lth.se/Research/Thermal/IREQ2009ver4\\_2.html](http://wwwold.eat.lth.se/Research/Thermal/IREQ2009ver4_2.html). Program ten umożliwia również obliczenie wartości wskaźnika  $t_{WC}$ .

W sytuacji, kiedy izolacyjność cieplna odzieży stosowanej przez pracowników jest niższa od obliczonej wartości  $IREQ_{min}$ , należy zmienić odzież lub też określić dopuszczalny czas ekspozycji na środowisko zimne ( $D_{lim}$ ), po którym pracownicy powinni udać się do środowiska ciepłego. Możliwe jest obliczenie również czasu odnowy ( $D_{rec}$ ), czyli czasu, jaki pracownicy powinni spędzić w cieplejszym środowisku. Skrócony czas ekspozycji należy również zastosować w przypadku, jeżeli  $t_{WC}$  będzie wynosić poniżej  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zgodnie z zapisami przedstawionymi w rozporządzeniu.

#### 5.1.4. Przykładowe profile narażenia pracowników na mikroklimat zimny i gorący

Ocena narażenia osób wykonujących prace przy sieciach eksploatacyjnych powinna być prowadzona w okresach, w których może wystąpić obciążenie termiczne, zatem latem (wskaźnik WBGT) i zimą (wskaźnik  $IREQ$  i  $t_{WC}$ ). W tabeli 5-4 przedstawiono przykładowe wartości wskaźników obciążenia termicznego określone dla danych pogodowych z 2011 r. odczytanych dla Warszawy (<http://www.pogoda.ekologia.pl>) przy następujących założeniach:

- praca wykonywana z metabolizmem równym  $170\text{ W/m}^2$
- izolacyjność cieplna odzieży 1,2 clo (zestaw składający się z bielizny, skarpet, butów, podkoszulka i kombinezonu)
- latem temperatura pocernionej kuli jest o  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  wyższa od temperatura powietrza, natomiast temperatura wilgotna naturalna jest równa temperaturze powietrza
- wskaźnik WBGT określono, biorąc pod uwagę maksymalną temperaturę powietrza występującą w danym miesiącu, wskaźnik  $IREQ$  – minimalną temperaturę powietrza w danym miesiącu, natomiast wskaźnik  $t_{WC}$  – minimalną temperaturę oraz maksymalną prędkość wiatru.

**Tabela 5-4.** Przykładowe wartości wskaźników obciążenia termicznego obliczone na podstawie archiwalnych danych meteorologicznych dla miasta Warszawy (z 2011 r.)

Miesiąc	$t_{\min}$ °C	$t_{\max}$ °C	$v_{\min}$ m/s	$v_{\max}$ m/s	WBGT °C	IREQ <sub>vmin</sub> clo	IREQ <sub>vmax</sub> clo	$t_{wc}$ °C
Styczeń	-5	9	1,67	9,44		1,1 (1,3*)	1,3 (2,3*)	-13,5
Luty	-10	8	1,67	8,06		1,3 (1,6)	1,5 (2,6*)	-19,4
Marzec	0	17	1,74	10,28		0,9 (1,0*)	1,1 (2,0*)	-7,1
Kwiecień	7	25	1,39	9,03	26,4			
Maj	10	29	1,32	5,21	30,4			
Czerwiec	16	30	1,11	5,76	31,4			
Lipiec	18	30	1,11	5,07	31,4			
Sierpień	17	33	1,11	5,21	34,4			
Wrzesień	15	26	1,11	5,28	27,4			
Październik	8	24	1,32	10,00		0,5 (0,5*)	0,8 (1,2*)	3,5
Listopad	1	13	1,11	8,19		0,8 (0,9*)	1,1 (1,7*)	-5,1
Grudzień	-2	8	1,11	7,43		0,9 (1,1*)	1,2 (1,9*)	-8,7

IREQ<sub>vmin</sub> – wartość wskaźnika IREQ<sub>vmin</sub> obliczona dla minimalnej prędkości wiatru w danym miesiącu.

IREQ<sub>vmax</sub> – wartość wskaźnika IREQ<sub>vmax</sub> obliczona dla maksymalnej prędkości wiatru w danym miesiącu.

\* – wartość podstawowej izolacyjności cieplnej przeliczona z IREQ.

W środowisku gorącym czynnikami wpływającymi na występowanie obciążenia termicznego są:

- wysoka temperatura powietrza
- promieniowanie słoneczne
- duża aktywność fizyczna (tempo metabolizmu)
- izolacyjność cieplna odzieży ochronnej
- aklimatyzacja pracownika do środowiska gorącego
- czas ekspozycji, organizacja trybów pracy – odpoczynek.

Zmieniając parametry poszczególnych czynników (np. skracając czas ekspozycji i zapewniając możliwość odpoczynku w środowisku chłodniejszym), można zredukować obciążenie termiczne i uniknąć zagrożeń zdrowotnych występujących w środowisku gorącym – głównie hipertermii. Na podstawie przykładowej analizy przedstawionej w tabeli 5-4 można określić, iż w okresie letnim dochodziło do przekroczenia wartości dopuszczalnej wskaźnika WBGT, który dla danej pracy wynosi 28 °C. Jednocześnie należy pamiętać, iż dane meteorologiczne są pobierane w specjalnych stacjach badawczych, zatem na stanowisku pracy ekspozowanym bezpośrednio na promieniowanie słoneczne wartości wskaźnika WBGT mogły być znacznie wyższe. Tym bardziej należy latem zwrócić uwagę na obciążenie termiczne, jakiemu poddany jest pracownik.

W środowisku zimnym czynnikami wpływającymi na obciążenie termiczne pracownika są:

- niska temperatura powietrza
- duża prędkość wiatru
- zawilgocenie odzieży
- izolacyjność cieplna odzieży
- aktywność fizyczna (tempo metabolizmu)
- czas ekspozycji oraz organizacja trybów pracy – odpoczynek.

Zmieniając poszczególne parametry, można zredukować ryzyko wystąpienia hipotermii czy też odmrożeń. W odniesieniu do środowiska zimnego na podstawie wartości przedstawionych w tabeli 5-4 można zaobserwować, iż w niektórych przypadkach doszło do wychłodzenia organizmu człowieka, gdy izolacyjność cieplna odzieży obliczona na bazie  $IREQ_{min}$  (oznaczona w tabeli 5-4 gwiazdką\*) była niższa od izolacyjności cieplnej odzieży stosowanej na stanowisku pracy (wynoszącej 1,2 clo). Rozwiązaniem takiej sytuacji jest zmiana odzieży ochronnej lub zastosowanie dodatkowych elementów zwiększających ciepłochronność zestawu.

Jednocześnie, na podstawie tabeli 5-4 można przypuszczać, iż nie została przekroczona dopuszczalna wartość  $t_{WC}$  wynosząca  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , poniżej której czas ekspozycji na środowisko zimne powinien być skrócony ze względu na ryzyko zamarzania skóry. W innym przypadku należałoby również ograniczyć czas przebywania pracowników w środowisku zimnym zgodnie z wykresami przedstawionymi w rozporządzeniu.

W odniesieniu do pracy w środowisku gorącym i zimnym należy dodatkowo pamiętać, iż na odbieranie środowiska przez organizm wpływa wiek pracownika, stan jego zdrowia oraz stosowanie niektórych leków. Z tej przyczyny powinno się zachować szczególną ostrożność, kierując pracowników do wykonywania remontów sieci elektroenergetycznych w trudnych warunkach pogodowych.

## 5.2. Naturalne promieniowanie optyczne

Promieniowanie optyczne jest to część widma promieniowania elektromagnetycznego o długościach fal z zakresu  $100\text{ nm} \div 1\text{ mm}$ . Występuje jako naturalny składnik promieniowania słonecznego bądź jest wytwarzane w sposób sztuczny przez człowieka. Naturalne promieniowanie optyczne jest niezbędne do życia, prawidłowego rozwoju i funkcjonowania człowieka, a także szeroko rozumianego środowiska naturalnego na Ziemi. To dzięki niemu, między inny-

mi, widzimy otaczający nas świat, ono dostarcza nam ciepła, sprzyja gojeniu ran i stłuczeń, umożliwia prawidłowy rozwój układu kostnego, wspomaga leczenie różnych schorzeń skóry i reguluje cykl okołodobowy oraz wpływa na nasze samopoczucie. Zarówno jego niedobór, jak i nadmiar powoduje szereg niekorzystnych skutków biologicznych oraz wpływa na funkcjonowanie człowieka. Promieniowanie optyczne oddziałuje na organizm człowieka poprzez oczy i skórę. Skutki tego działania zależą przede wszystkim od parametrów fizycznych promieniowania (zakresu długości fali, rozkładu widmowego natężenia napromienienia), czasu ekspozycji oraz właściwości optycznych i biologicznych ekspozowanej tkanki.

Osoby zatrudnione na zewnętrznych stanowiskach pracy, do których zalicza się pracowników wykonujących różne prace przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN, są ekspozowane na naturalne promieniowanie optyczne. Oceniając narażenie na to promieniowanie, za czynnik najistotniejszy dla zdrowia pracowników uznaje się ekspozycję na nadfiolet. Stopień narażenia na to promieniowanie zależy przede wszystkim od jego intensywności przy powierzchni ziemi i czasu ekspozycji. Intensywność zaś zależy od szerokości geograficznej, wysokości nad poziomem morza, rozpraszania atmosferycznego, stopnia zachmurzenia i zamglenia, odbić od powierzchni Ziemi i zawartości ozonu w atmosferze ziemskiej oraz od pory roku. Z uwagi na położenie geograficzne Polski zagrożenie naturalnym promieniowaniem optycznym rozpatruje się przede wszystkim w okresie wiosenno-letnim, kiedy intensywność tego promieniowania jest największa.

Ze względu na brak możliwości ograniczania intensywności naturalnego promieniowania optycznego u źródła oraz konieczność wykonywania prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych w sezonie wiosenno-letnim, kiedy jego intensywność jest największa, pojawia się ryzyko związane z zagrożeniem dla zdrowia pracowników, wynikającym z tego promieniowania.

Aby zminimalizować wpływ warunków pracy na organizm, w przypadku pracy w narażeniu na naturalne promieniowanie optyczne (podobnie jak na mikroklimat) można jedynie stosować odpowiednie środki ochrony indywidualnej (głównie odzież ochronną i okulary ochronne) oraz ograniczać czas ekspozycji w ciągu zmiany roboczej.

W dalszej części rozdziału przedstawiono informacje dotyczące m.in. charakterystyki promieniowania słonecznego w Polsce, oddziaływania promieniowania optycznego na organizm człowieka, metod oceny narażenia, przykładowych profili narażenia pracowników sieci elektroenergetycznych.

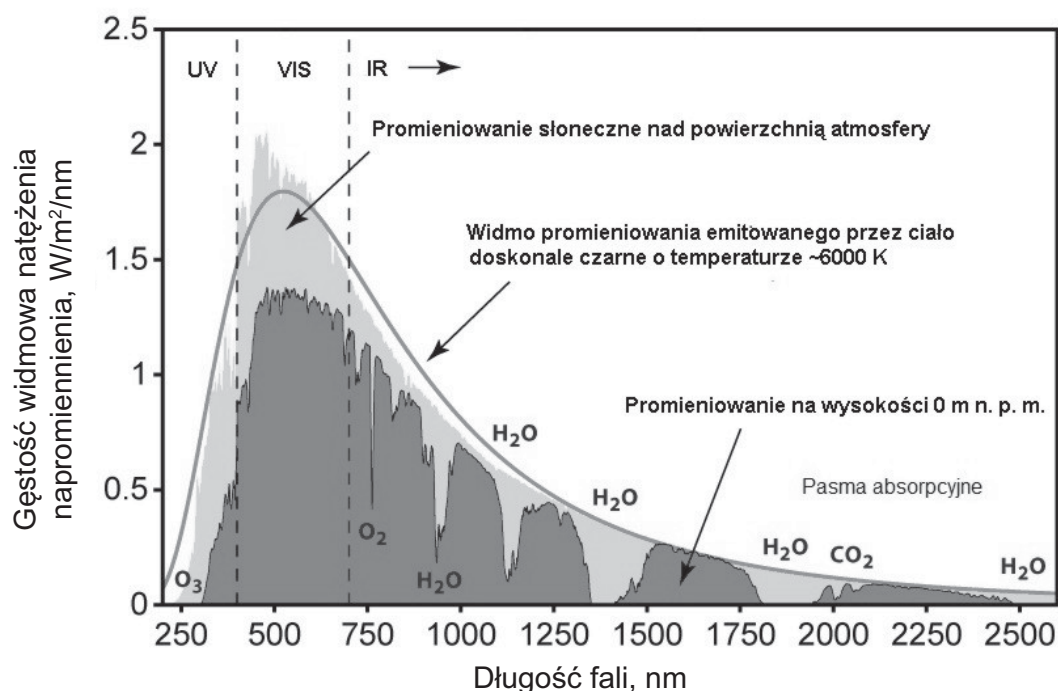


## 5.2.1. Charakterystyka promieniowania słonecznego w Polsce

### 5.2.1.1. Promieniowanie słoneczne

Promieniowanie słoneczne jest to strumień fal elektromagnetycznych i cząstek elementarnych (promieniowanie korpuskularne) docierający ze Słońca do Ziemi. Natężenie promieniowania słonecznego docierającego do górnych granic atmosfery określone jest przez stałą słoneczną. Wielkość ta jest zdefiniowana dla średniej odległości Ziemia – Słońce i wynosi około  $1\,366,1\text{ W/m}^2$ . Natężenie promieniowania słonecznego zmienia się w cyklu rocznym ze względu na zmiany odległości pomiędzy Ziemią a Słońcem w zakresie  $\pm 3,4\%$ . Zasadniczą składową promieniowania słonecznego jest promieniowanie optyczne (naturalne promieniowanie optyczne), stąd często określeń tych używa się zamiennie, choć formalnie pojęcie promieniowania słonecznego jest szersze niż naturalnego promieniowania optycznego.

W związku z oddalaniem się od powierzchni Słońca oraz pochłanianiem i rozpraszaniem promieniowania słonecznego przy przechodzeniu przez atmosferę, gęstość widmowa natężenia napromienienia oraz zakres widmowy promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi ulega zmniejszeniu. Przykładowy rozkład widmowy natężenia napromienienia promieniowania optycznego występującego w promieniowaniu słonecznym nad powierzchnią atmosfery oraz przy powierzchni Ziemi przedstawia wykres na rysunku 5-2.



**Rys. 5-2.** Widmo promieniowania emitowanego przez Słońce ([http://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt\\_cieplarniany](http://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt_cieplarniany))

Widmo promieniowania słonecznego przed wejściem do atmosfery jest zbliżone do promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze około 6 000 K, opisywanego rozkładem Plancka. Maksimum emisji, zgodnie z prawem Wiena, przypada na długość fali około 500 nm.

Można przyjąć, że średnio około 50% naturalnego promieniowania optycznego przy powierzchni Ziemi w Polsce stanowi podczerwień, około 43% – promieniowanie widzialne i około 7% – nadfiolet (wartości te zmieniają się w zależności od: szerokości geograficznej, grubości warstwy ozonu, pory roku, pory dnia, zachmurzenia, zanieczyszczenia powietrza czy wysokości nad poziomem morza). Warto zauważyć, że zakres widmowy naturalnego promieniowania nadfioletowego docierającego do powierzchni Ziemi zawiera się w przedziale 290 ÷ 400 nm, czyli w jego składzie nie ma w ogóle promieniowania UVC. Wynika to z faktu, że długości fal poniżej 290 nm są silnie pochłaniane przez ozon (O<sub>3</sub>) znajdujący się w warstwie atmosfery otaczającej Ziemię.

Pomimo iż najmniejszy procentowo udział w promieniowaniu słonecznym docierającym do Ziemi ma nadfiolet, to z punktu widzenia potencjalnego zagrożenia dla zdrowia człowieka ma on znaczenie największe. Zgodnie bowiem z danymi bazy CAREX, będącej międzynarodowym systemem informacyjnym o ekspozycji zawodowej na czynniki fizyczne wywołujące nowotwory, za czynnik fizyczny, na który ekspozycja zawodowa jest największa liczba ludzi, uznaje się naturalne promieniowanie nadfioletowe (CAREX, 1998), a zgodnie z danymi Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) nadmierna ekspozycja na naturalny nadfiolet była w 2000 r. przyczyną około 60 000 przedwczesnych zgonów na świecie, na skutek różnego rodzaju nowotworów skóry, w tym czerniaka (Lucas i in., 2006). W związku z powyższym na całym świecie istnieje system monitoringu naturalnego promieniowania UV, a ocena zagrożenia zdrowia pracowników naturalnym promieniowaniem optycznym dotyczy przede wszystkim promieniowania nadfioletowego.

#### **5.2.1.2. Wielkości radiometryczne wykorzystywane do ilościowej charakterystyki naturalnego promieniowania UV**

Wielkości radiometryczne są bezwzględными wielkościami fizycznymi charakteryzującymi promieniowanie elektromagnetyczne. Do określania poziomu ekspozycji na promieniowanie nadfioletowe najczęściej wykorzystuje się: napromienienie (miara energii promieniowania przypadająca na pole powierzchni ekspozowanej) oraz natężenie napromienienia (miara mocy promieniowania przypadająca na pole powierzchni ekspozowanej). Parametry te definiuje się następująco:

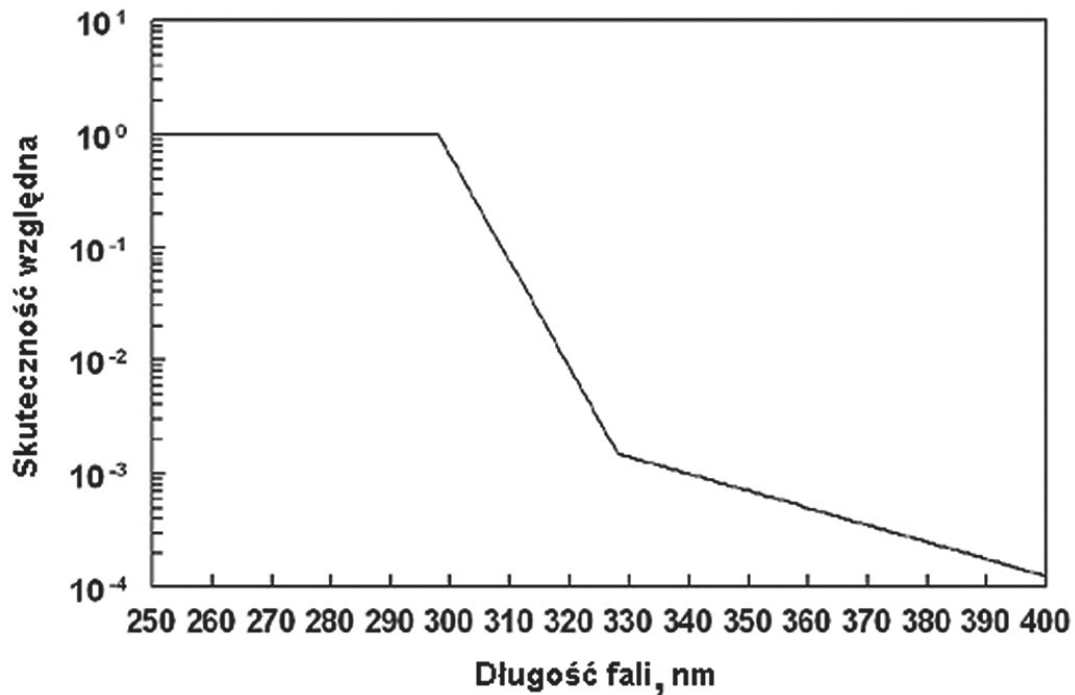
- **natężenie napromienienia** (w danym punkcie powierzchni),  $E_e$ ,  $E$ , to stosunek strumienia energetycznego  $d\Phi_e$  padającego na elementarną powierzchnię, zawierającą dany punkt, do wartości tej elementarnej powierzchni  $dA$  (PN-90/E-01005). Jednostką natężenia napromienienia jest  $W \cdot m^{-2}$
- **napromienienie, dawka** (w danym punkcie powierzchni, w danym czasie),  $H_e$ ,  $H$ , to stosunek  $dQ_e$  ilości energii promienistej przypadającej na elementarną powierzchnię, zawierającą dany punkt w danym czasie, do wartości  $dA$  tej elementarnej powierzchni. W normie znajduje się również definicja równoważna, zgodnie z którą napromienienie jest całką natężenia napromienienia  $E_e$  liczoną dla danego czasu  $\Delta t$  (PN-90/E-01005). Jednostką napromienienia jest  $J \cdot m^{-2}$ .

Fizyczną, chemiczną lub biologiczną przemianę wywołaną oddziaływaniem promieniowania optycznego na materię nazywa się skutkiem promieniowania optycznego. Gdy promieniowanie optyczne wywołuje przemiany chemiczne, używa się określenia skutek aktywny, natomiast w przypadku zmian w tkankach organizmów żywych mówi się o skutku biologicznym tego promieniowania. Miarą skutku biologicznego promieniowania optycznego może być na przykład ilość substancji (wyrażona w mg,  $\mu g$ , molach itp.) powstałej w wyniku reakcji fotochemicznej spowodowanej przez określoną dawkę promieniowania. Danemu rodzajowi skutku biologicznego odpowiada charakterystyczny, właściwy mu, względny rozkład widmowy skuteczności biologicznej promieniowania optycznego (krzywa skuteczności biologicznej promieniowania optycznego).

W roku 1987 Międzynarodowy Komitet Oświetleniowy (CIE, 1987) opublikował nowe wielkości radiometryczne: skuteczne natężenie napromienienia  $E_{\text{eff}}$  oraz skuteczne napromienienie  $H_{\text{eff}}$ . Wielkości te noszą miano biologicznie aktywnych i są miarą skuteczności promieniowania przy wywoływaniu rozpatrywanego skutku fotobiologicznego. Względna skuteczność widmowa jest miarą reakcji tkanki biologicznej na napromienienie przez różne długości fal promieniowania emitowanego przez źródło. Zmiany wartości tej wielkości w funkcji długości fali dla danej tkanki są niejako odzwierciedleniem zmian wartości współczynnika absorpcji substancji biologicznej w niej występującej i charakteryzującej się najsilniejszym pochłanianiem padającego na tę tkankę promieniowania. W systemach biologicznych kształt widmowej funkcji skuteczności jest dodatkowo modyfikowany przez właściwości optyczne tkanki leżącej nad obszarem oddziaływania (np. warstwa rogowa naskórka) czy też mechanizmy transferu energii. W związku z powyższym przebieg skuteczności widmowej w funkcji długości fali przyjmuje różną postać dla poszczególnych skutków biologicznych. Przykładowo, funkcje skuteczności widmowej dla rumienia skóry są inne niż dla zaćmy. Względna skuteczność widmowa

efektu fotobiologicznego została znormalizowana. Przyjęto wartość równą 1 dla takiej długości fali, dla której tkanka eksponowana jest najbardziej czuła.

Na podstawie analiz statystycznych wyników badań dotyczących minimalnych dawek napromienienia wywołujących rumień skóry Międzynarodowy Komitet Oświetleniowy (CIE) wprowadził krzywą skuteczności erytemalnej pokazaną na rysunku 5-3 (CIE, 1987, 1998). Krzywa ta jest wykorzystywana do szacowania skutku ekspozycji skóry na rumieniotwórcze promieniowanie UV.



Rys. 5-3. Krzywa względnej skuteczności erytemalnej CIE (za: CIE, 1998)

Funkcja względnej skuteczności erytemalnej przyjmuje wartość równą 1 dla promieniowania o długości fali  $\lambda \leq 297$  nm, co oznacza, że promieniowanie z tego zakresu ma największą skuteczność w wywoływaniu rumienia skóry. W zakresie  $298 \div 328$  nm widać dość gwałtowny spadek skuteczności wywoływania rumienia wraz ze wzrostem długości fali, natomiast dla nadfioletu UVA powyżej 328 nm skuteczność ta nadal maleje z długością fali, jednakże zgodnie z funkcją wolniej malejącą. W związku z powyższym w przypadku ekspozycji na naturalne promieniowanie UV z zakresu  $290 \div 400$  nm zaczerwienienie skóry będzie wywoływane głównie przez promieniowanie z zakresu UVB, a także promieniowanie UVA, przy czym rumieniotwórcza zdolność promieniowania z zakresu UVA będzie zdecydowanie mniejsza niż promieniowania z zakresu UVB. Przy określaniu ekspozycji skóry na naturalne promieniowanie nadfioletowe stosuje się następujące pojęcia:

- minimalna dawka erytemalna, MED (ang. *Minimal Erythemal Dose*), jest to najmniejsza efektywna erytemalnie dawka promieniowania UV powodująca wystąpienie rumienia na skórze człowieka. Wartość MED zależy od właściwości ochronnych skóry (fototypu skóry) danej osoby oraz od wcześniejszej preadaptacji skóry na promieniowanie nadfioletowe. Jednostką MED jest  $\text{J}/\text{m}^2$
- standardowa dawka erytemalna, SED (ang. *Standard Erythemal Dose*), jest to skuteczna erytemalnie dawka promieniowania UV, wynosząca  $100 \text{ J}/\text{m}^2$
- indeks UV, *IUV*, jest to względna jednostka miary naturalnego promieniowania UV, dotycząca jego erytemalnego oddziaływania na skórę człowieka; wyrażony jest zależnością (CIE, 2003):

$$IUV = k_{\text{er}} \int_{290\text{nm}}^{400\text{nm}} E(\lambda) \cdot S_{\text{ery}}(\lambda) d\lambda \quad (5-6)$$

gdzie:

$E_{\lambda}$  – widmowe natężenie napromienienia,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$

$S(\lambda)$  – widmowa krzywa skuteczności erytemalnej (CIE, 1987)

$k_{\text{er}}$  – stała, której wartość wynosi  $40 \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ .

Ekspozycję na naturalne promieniowanie UV skategoryzowano względem wartości indeksu UV tak, aby na podstawie informacji o indeksie UV można było określić potencjalne zagrożenie skóry (zacerwienie, poparzenie słoneczne) oraz zalecane środki ochrony (tabela 5-5).

**Tabela 5-5.** Kategorie ekspozycji na naturalne promieniowanie UV (<http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf>)

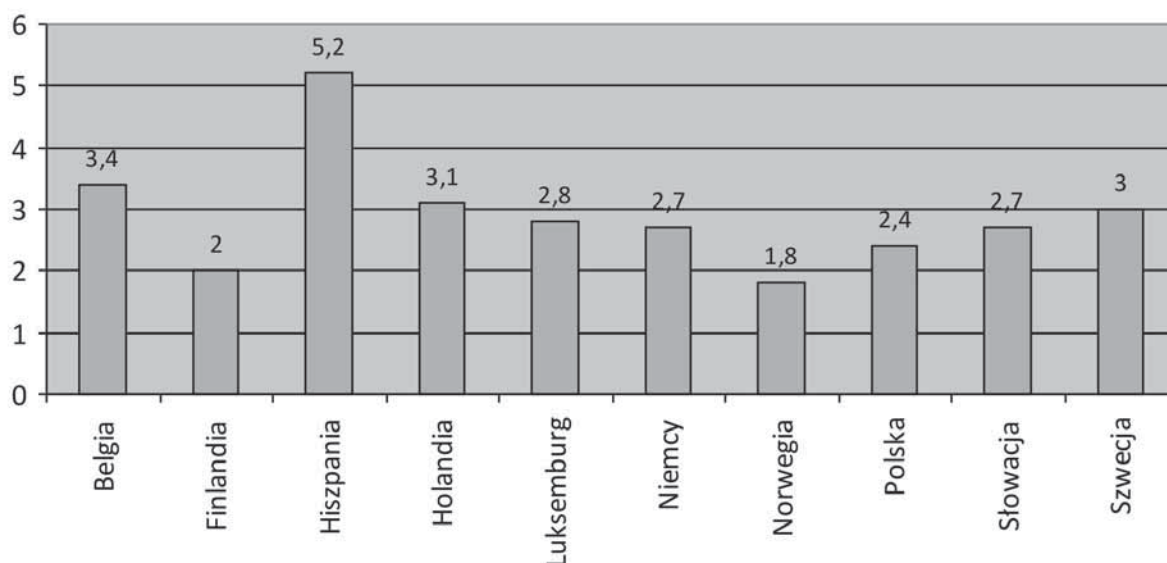
Kategoria ekspozycji	Zakres wartości <i>IUV</i>	Zalecane środki ochrony
Niska	0 ÷ 2	brak
Umiarkowana	3 ÷ 5	– w godzinach południowych przebywać w miejscu zacienionym
Wysoka	6 ÷ 7	– nosić odzież wierzchnią, nakrycie głowy oraz stosować ekrany przeciwsłoneczne
Bardzo wysoka	8 ÷ 10	– unikać przebywania na wolnym powietrzu w godzinach południowych – bezwzględnie nosić odzież wierzchnią, nakrycie głowy oraz stosować ekrany przeciwsłoneczne
Ekstremalna	11+	



### 5.2.1.3. Charakterystyka naturalnego promieniowania UV w Polsce

Naturalne promieniowanie nadfioletowe jest monitorowane na całym świecie przez stacje meteorologiczne. Codziennie mierzone jest skuteczne erytemalnie natężenie napromienienia, a do publicznej wiadomości podawany jest wyznaczony z tych pomiarów indeks UV.

Na półkuli północnej wartości indeksu UV są znacznie większe w porze letniej niż zimowej, co wynika z różnic w odległości położenia Słońca od Ziemi. W krajach europejskich średnie roczne indeksy UV są stosunkowo nieduże i wynoszą od 1,8 do 5,5 (rys. 5-4).



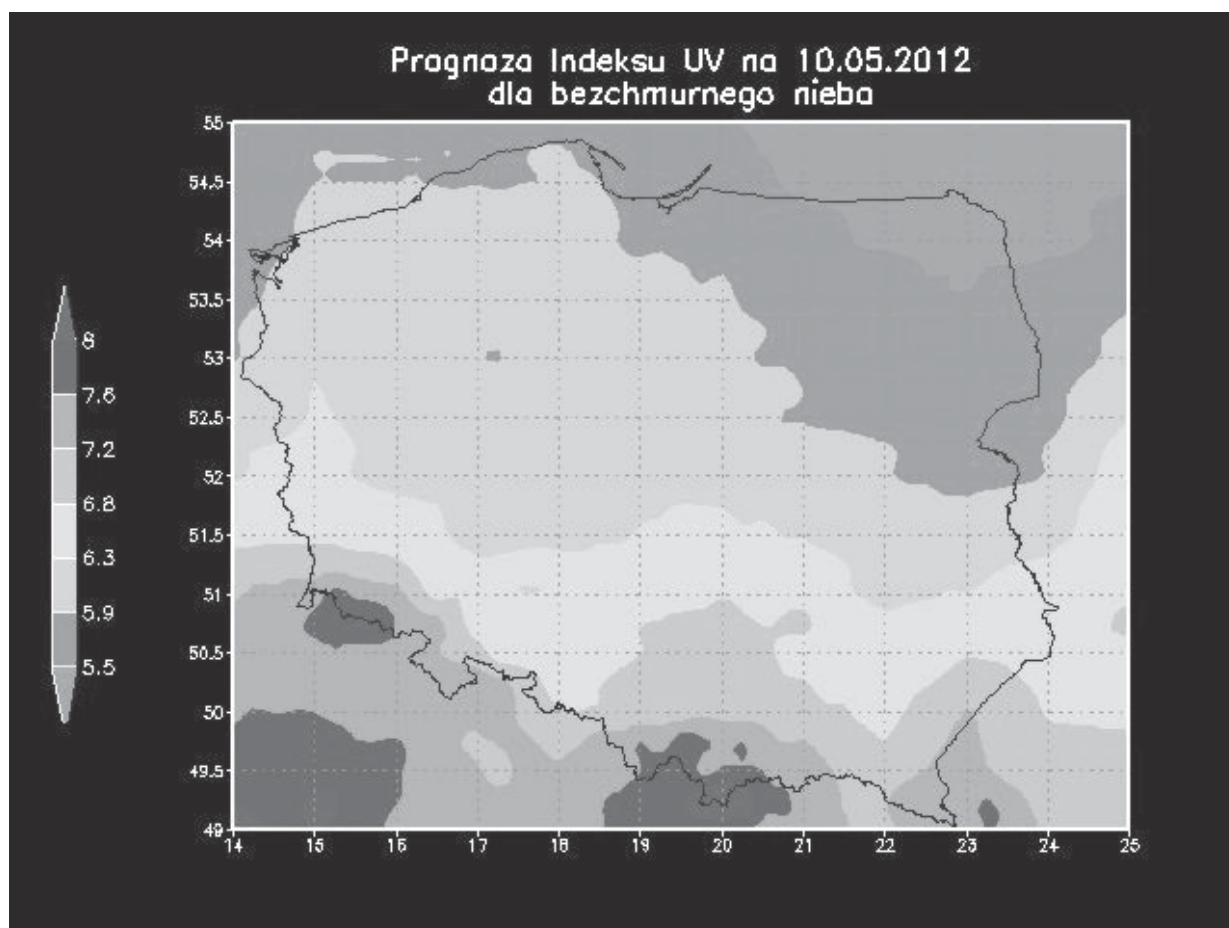
**Rys. 5-4.** Wartości średnie roczne indeksu UV w wybranych krajach Unii Europejskiej (Wolska i in., 2006)

Polska ze średnim rocznym indeksem UV wynoszącym 2,4 zalicza się do krajów o niskim stopniu zagrożenia naturalnym UV w skali roku. Niemniej jednak w różnych regionach naszego kraju, zwłaszcza w porze wiosenno-letniej, wartości średnie miesięczne indeksu UV są większe, co przedstawia tabela 5-6.

**Tabela 5-6.** Średnia miesięczna wartość indeksu UV z lat 2000-2005 (Wolska i in., 2006)

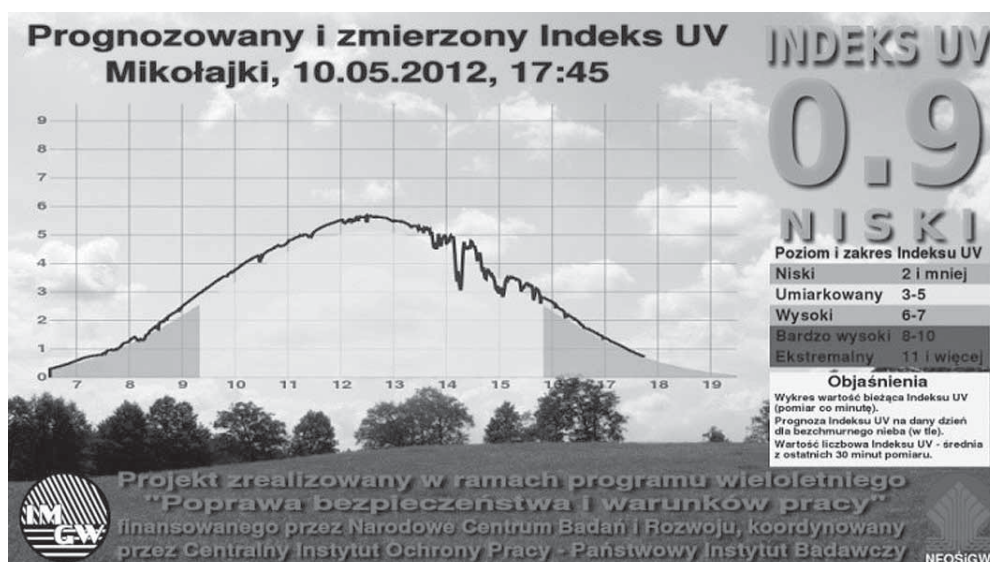
Stacja pomiaru IUV	Miesiąc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Łeba	0,22	0,57	1,42	2,56	3,97	4,45	4,54	3,99	2,63	1,13	0,38	0,17
Legionowo	0,32	0,78	1,73	2,82	4,36	4,71	4,85	4,15	2,79	1,43	0,52	0,25
Zakopane	0,58	1,09	2,19	3,19	4,56	4,73	4,58	4,13	2,94	1,74	0,78	0,47

Polska leży pomiędzy 49° a 54,5° szerokości geograficznej północnej i dodatkowo na południu kraju występują dużo wyższe wysokości nad poziomem morza niż na północy kraju, stąd mierzone indeksy UV na południu (Zakopane) są dużo większe niż na północy (Łeba). Zróżnicowanie indeksu UV na terenie Polski wyraźnie widać na mapach prognozowanego maksymalnego indeksu UV (rys. 5-5). Jak można zauważyć, indeks UV na tym obszarze zmienia się od około 5 do ponad 8.



**Rys. 5-5.** Prognozowane przebiegi zmienności indeksu UV dla bezchmurnego nieba na terenie Polski w dniu 10.05.2012 r. ([http://www.imgw.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=143&Itemid=176](http://www.imgw.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=143&Itemid=176))

Pomimo iż średnia roczna intensywność promieniowania UV w Polsce jest niska, to w ciągu dnia w okresie wiosenno-letnim przez kilka godzin, pomiędzy godziną 10 a 17 (czerwiec), ludzie pracujący na zewnętrznych stanowiskach pracy są ekspozowani na naturalny nadfiolet o dużej intensywności – indeks UV wynosi  $6 \div 10$  (Lityńska i in., 2001). Na wykresie przedstawiającym dzienną zmienność indeksu UV prognozowanego i mierzonego (rys. 5-6 – czarna linia) przez IMiG można zauważyć, że największe wartości indeksu UV osiąga w godzinach okołopołudniowych, dlatego ekspozycja przede wszystkim w tym właśnie okresie może stanowić o zagrożeniu dla zdrowia.



**Rys. 5-6.** Prognozowany i zmierzony indeks UV w Mikołajkach w dniu 10.05.2012 r. (stan prezentowany o godzinie 17:45, po prawej stronie wykresu aktualny w tym czasie  $IUV = 0,9$ ) ([http://www.imgw.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=144&Itemid=177](http://www.imgw.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=144&Itemid=177))

## 5.2.2. Oddziaływanie promieniowania optycznego na organizm człowieka

### 5.2.2.1. Biologiczne skutki narażenia tkanek na promieniowanie optyczne

Biologiczne działanie może wywołać jedynie promieniowanie pochłonięte. Rozróżnia się dwa rodzaje reakcji wywoływanych w tkankach biologicznych przez promieniowanie optyczne: fotochemiczną oraz termiczną. Skutki ekspozycji na to promieniowanie zależą od parametrów fizycznych promieniowania (długości fali, rozkładu widmowego natężenia napromienienia), czasu ekspozycji (ciągła, impulsowa) oraz właściwości optycznych (głównie absorpcyjnych) ekspozowanej tkanki (oko, skóra).

Występuje wiele korzystnych skutków oddziaływania promieniowania optycznego na organizm człowieka. Promieniowanie nadfioletowe przyczynia się m.in. do wzrostu odporności organizmu, syntezy witaminy  $D_3$  w organizmie człowieka (działanie przeciwkrzywicze), obniżenia ilości cholesterolu, szybszego gojenia się ran, ustępowania infekcji i niektórych chorób skóry. Z kolei promieniowanie podczerwone wspomaga leczenie procesów zapalnych i przyspiesza gojenie następstw urazów stawów i części miękkich kończyn.

Jednak nadmierna ekspozycja na promieniowanie optyczne może powodować wiele niekorzystnych skutków biologicznych w odniesieniu do oczu i skóry. Mechanizmy fotochemiczne uszkodzeń tkanki dominują w obszarze nadfioletu, zwłaszcza poniżej 320 nm. Ze wzrostem długości fali prawdopodobieństwo, że energia foto-

nu promieniowania będzie wystarczająca do zainicjowania reakcji fotochemicznej, maleje, osiągając praktycznie zero dla fal powyżej 700 nm. Natomiast przy długościach fal powyżej 380 nm zaczynają już się pojawiać reakcje termiczne, których prawdopodobieństwo wystąpienia wzrasta wraz ze wzrostem długości fal, a długości fal powyżej 700 nm praktycznie wywołują tylko reakcje termiczne w tkankach biologicznych.

Zarówno w przypadku skóry jak i oczu zagrożenie może pochodzić od promieniowania skierowanego bezpośrednio na tkankę lub od wiązki odbitej oraz rozproszonej. Przy ekspozycji na wiązkę bezpośrednią potencjalne zagrożenie jest największe.

### **Oddziaływanie fotochemiczne**

Uszkodzenie tkanki może być wynikiem absorpcji molekularnej promieniowania. Procesy fotochemiczne wiążą się z reakcją chemiczną specyficzną dla stanu wzbudzonego. Reakcje te odpowiadają za uszkodzenia przy małych poziomach gęstości mocy – od około 10 mW/cm<sup>2</sup> (Kaczmarek i in., 1994) oraz przy jednoczesnej wysokiej absorpcji promieniowania przez tkankę. Oddziaływanie fotochemiczne ma charakter sumacyjny, przez co zmiany chorobowe mogą występować na skutek serii dawek promieniowania optycznego. Oddziaływanie fotochemiczne rozpatruje się w odniesieniu do promieniowania o długości fali poniżej 700 nm.

### **Oddziaływanie termiczne**

Podczas ekspozycji tkanki biologicznej na promieniowanie z zakresu optycznego dostarczana jest do niej energia, która po zaabsorbowaniu powoduje zwiększenie energii kinetycznej (drgań) cząstek. Oddziaływanie termiczne obserwuje się przy gęstościach spektralnych mocy powyżej 1 W/cm<sup>2</sup>. Skutkiem makroskopowym tego zjawiska jest wzrost temperatury tkanki. Po przekroczeniu przez eksponowany obszar temperatury 45 °C następuje rozrywanie błon komórkowych oraz spiekanie tkanek, powyżej temperatury 60 °C dochodzi do częściowej waporyzacji tkanek. Oba te procesy prowadzą do martwicy tkanek. Przy temperaturze 100 °C następuje wrzenie wody zawartej w tkankach, a po przekroczeniu 150 °C – zwęglenie białek tkankowych (Kaczmarek i in., 1994).

#### **5.2.2.2. Zagrożenie oczu**

W zależności od długości fali promieniowania optycznego zagrożone są różne elementy składowe oka. Daleki nadfiolet (UVC) z zakresu 200 ÷ 215 nm i podczerwień o długościach fal powyżej 1 400 nm (IRB i IRC) są pochłaniane przez rogówkę. Bliski nadfiolet (UVA) oraz średnia podczerwień (IRB) i częściowo bliska

podczerwień (IRA) pochłaniane są przez soczewkę. Natomiast promieniowanie widzialne oraz większość bliskiej podczerwieni (IRA) są przepuszczane do siatkówki (Konieczny i in., 2008). W zależności od składu widmowego promieniowania optycznego różne części oka są szczególnie zagrożone. Skutki oddziaływania na oko promieniowania optycznego nielaserowego i laserowego różnią się co do „ciężkości” skutku szkodliwego – zazwyczaj dużo poważniejsze są skutki ekspozycji na promieniowanie laserowe, co przedstawiono w tabeli 5-7.

**Tabela 5-7.** Rodzaj zagrożenia oka a zakres promieniowania optycznego w odniesieniu do ekspozycji na promieniowanie nielaserowe i laserowe

Zakres promieniowania	Rodzaj skutku szkodliwego
UVA	zaćma fotochemiczna (pojawia się po chronicznej ekspozycji)
UVB i UVC	stany zapalne spojówki i rogówki
VIS i IRA	stany zapalne siatkówki na skutek oddziaływania fotochemicznego lub termicznego
IRB i IRC	poparzenia rogówki zaćma termiczna (pojawia się po chronicznej ekspozycji)

### Zagrożenie naturalnym UV

Ekspozycja oka na naturalne promieniowanie nadfioletowe może powodować wiele chorób, w tym także uszkodzeń powiek, rogówki, spojówki, soczewki, a także siatkówki. W odróżnieniu od skóry powierzchnia oka jest w naturalny sposób chroniona przed ekspozycją na naturalne promieniowanie nadfioletowe docierające do niej z różnych kierunków. Za ten stan rzeczy odpowiada jego głębokie osadzenie w oczodole oraz fakt, że powierzchnia gałki ocznej w zdecydowanej większości zakryta jest powieką. W związku z powyższym oko ludzkie może być ekspozycjonowane jedynie na promieniowanie padające na nie bezpośrednio z kierunku pokrywającego się z jego osią optyczną bądź wchodzącego doń pod względnie niewielkim kątem do tej osi.

Promieniowanie o długości fali z zakresu UVB do 300 nm pochłaniane jest w rogówce, natomiast z zakresu 300 ÷ 370 nm jest prawie całkowicie pochłaniane w soczewce. Część promieniowania UVA z zakresu 380 ÷ 400 nm, które formalnie pokrywa się z początkiem zakresu promieniowania widzialnego, dochodzi do siatkówki oka.

Najczęściej spotykanym, ostrym objawem narażenia oka na nadfiolet jest stan zapalny rogówki i spojówki. Promieniowanie o długości fali z zakresu UVB jest silnie pochłaniane przez rogówkę i spojówkę oka. Absorpcja tego promieniowania powoduje stany zapalne rogówki objawiające się światłowstrętem, wzmożonym łzawieniem, uczuciem obcego ciała („piasku”) w oku, spazmem powiek, niekiedy upośledzeniem



widzenia. Objawy zapalenia pojawiają się po okresie utajenia zależnym od widma promieniowania i wielkości pochłoniętej dawki UV. Okres utajenia wynosi od 6 do 24 godzin, a objawy zapalenia ustępują po około 24–48 godzinach od ekspozycji. Promieniowanie UVA odpowiada natomiast za powstawanie zaćmy fotochemicznej, tzw. zaćmy korowej. Rozwój zaćmy jest powolny i trwa wiele lat. Przypuszcza się, że największą skuteczność wywoływania zaćmy mają fale o długości 300 ÷ 320 nm.

Promieniowanie UV powyżej 300 nm docierające do siatkówki oka może być przyczyną powstawania schorzeń lub uszkodzeń siatkówki o charakterze fotochemicznym. Oprócz wyżej wymienionych schorzeń promieniowanie nadfioletowe jest przyczyną powstawania również takich chorób oczu, jak: łączne zapalenie spojówki i rogówki, skrzydlik oraz rak oka.

Skutki szkodliwe ze względu na czas ich wystąpienia po ekspozycji oczu na naturalne promieniowanie nadfioletowe dzieli się na ostre i przewlekłe (tab. 5-8). Ostre występują maksymalnie do 24 godzin po ekspozycji, natomiast przewlekłe pojawiają się znacznie później, a często w wyniku wieloletniej ekspozycji na naturalne promieniowanie nadfioletowe.

**Tabela 5-8.** Klasyfikacja skutków ubocznych dla oczu, wywołanych ekspozycją na naturalne promieniowanie nadfioletowe, ze względu na czas ich wystąpienia po ekspozycji

Rodzaj skutku ubocznego	Skutek uboczny
Ostry	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zapalenie rogówki</li> <li>– zapalenie spojówki</li> <li>– łączne zapalenie rogówki i spojówki</li> </ul>
Przewlekły	<ul style="list-style-type: none"> <li>– skrzydlik</li> <li>– zaćma</li> <li>– rak oka</li> </ul>

### 5.2.2.3. Zagrożenie skóry

Zagrożenie promieniowaniem optycznym największego organu człowieka, jakim jest skóra, dotyczy przede wszystkim odsłoniętych części ciała, czyli skóry rąk, głowy, szyi i ramion. Głębokość wnikania promieniowania w obszar skóry zależy od współczynnika absorpcji tkanek, im współczynnik absorpcji większy, tym głębokość wnikania mniejsza. Najgłębiej w obszar skóry wnika promieniowanie widzialne i bliska podczerwień, które dochodzą do tkanki podskórnej. Natomiast praktycznie nie wnika w głąb skóry promieniowanie UVC i IRC, które są pochłaniane, odbijane i rozpraszane w naskórku. Szkodliwe skutki ekspozycji skóry w zależności od długości fali promieniowania optycznego odniesione do promieniowania nielaserowego i laserowego przedstawiono w tabeli 5-9.

**Tabela 5-9.** Rodzaj uszkodzenia skóry a długość fali promieniowania

Zakres promieniowania	Rodzaj skutku szkodliwego
UV	<ul style="list-style-type: none"> <li>– erytema</li> <li>– oparzenie „słoneczne”</li> <li>– fotostarzenie (pojawia się po chronicznej ekspozycji)</li> <li>– przednowotworowe i nowotworowe zmiany skórne (pojawiają się po chronicznej ekspozycji)</li> <li>– rak skóry, w tym czerniak (pojawia się po chronicznej ekspozycji)</li> <li>– fotodermatozy (z jednoczesnym występowaniem czynników fototoksycznych lub fotouczulających w środowisku pracy)</li> </ul>
VIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zaczerwienienie</li> </ul>
IR	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zaczerwienienie</li> <li>– oparzenie</li> </ul>

W zależności od długości fali promieniowanie optyczne wnika do tkanki skóry na różną głębokość i jest absorbowane w różnych jej częściach. Po wniknięciu promieniowania do tkanki jest ono w niej absorbowane i rozpraszane, a część jest także transmitowana do głębszych partii – w zależności od współczynnika absorpcji zmienia się wartość głębokości wnikania promieniowania. Skutki oddziaływania promieniowania optycznego na tkanki skóry uzależnione są od długości fali promieniowania padającego na tkankę, a tym samym od współczynnika absorpcji.

### Zagrożenie naturalnym promieniowaniem UV

Do powierzchni Ziemi dociera naturalne promieniowanie UV z zakresu UVA oraz UVB. Stosunkowo głęboko wnika ono w skórę, dochodząc odpowiednio do głębszych partii naskórka oraz do skóry właściwej. Promieniowanie z zakresu UVB w większości pochłaniane jest przez naskórek i tylko niewielka jego ilość (<10%) dochodzi do skóry właściwej. Natomiast najgłębiej w skórę wnika promieniowanie UVA, które pochłaniane jest w naskórku, skórze właściwej, a nawet w nieznaczej ilości (ok. 1%) w tkance podskórnej.

Najbardziej widocznym, najczęściej spotykanym i zbadanym objawem ekspozycji skóry na nadfiolet jest jej rumień (zaczerwienienie), czyli erytema. Stopień zaczerwienienia i jego przebieg zależą od wielkości napromienienia i długości fali promieniowania. Wzrost dawki promieniowania powoduje skrócenie okresu utajenia (latencji), po którym pojawia się zaczerwienienie. Promieniowanie pasma UVB wytwarza intensywny rumień, pojawiający się po 5–6 godzinach i trwający około 4–5 dni. Duże dawki promieniowania UVB mogą doprowadzić do poparzenia skóry objawiającego się bolesnymi obrzękami i pęcherzami. Skuteczność wywoływania rumienia przez pasmo UVA jest bardzo mała, około 1 000 razy mniejsza niż pasma UVB. Po ustąpieniu rumienia pojawia się pigmentacja, czyli opalenizna skóry, która

powstaje na skutek gromadzenia się melaniny w naskórku. Wówczas skóra nabiera ciemniejszego zabarwienia, przez co zaczyna spełniać funkcję ochronną przed promieniowaniem nadfioletowym. Mimo że powtarzająca się ekspozycja skóry na promieniowanie nadfioletowe uodparnia na jego działanie, to długotrwałe narażenie na wysokie natężenia UV prowadzi do niekorzystnych zmian w naskórku: przyspiesza proces starzenia się skóry oraz wywołuje zmiany przednowotworowe, a nawet nowotworowe.

Wielokrotne narażenie skóry na promieniowanie nadfioletowe, szczególnie na promieniowanie o dużym natężeniu, może spowodować nadmierne rogowacenie, które jest czynnikiem sprzyjającym powstawaniu nowotworów, takich jak rak podstawnokomórkowy i kolczystokomórkowy oraz czerniak. Proces powstawania nowotworów skóry pod wpływem ekspozycji na długotrwałe działanie nadfioletu jest związany z pochłanianiem tego promieniowania przez DNA. Pod wpływem nadfioletu w DNA powstają dimery pirymidyn i właśnie temu zjawisku przypisuje się główną rolę w procesie inicjowania zmian nowotworowych. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzanych na zwierzętach przyjmuje się, że najbardziej skuteczne pod względem wywoływania nowotworów jest promieniowanie o długościach fali zbliżonych do 300 nm.

Skutki szkodliwe ze względu na czas ich wystąpienia po ekspozycji skóry na naturalne promieniowanie nadfioletowe dzieli się na ostre i przewlekłe (tabela 5-10). Ostre występują maksymalnie do 24 godzin po ekspozycji, natomiast przewlekłe pojawiają się znacznie później, a często na skutek wieloletniej ekspozycji na naturalne promieniowanie nadfioletowe.

**Tabela 5-10.** Klasyfikacja skutków ubocznych dla skóry, wywołanych ekspozycją na naturalne promieniowanie nadfioletowe, ze względu na czas ich wystąpienia po ekspozycji

Rodzaj skutku ubocznego	Skutek uboczny
Ostry	<ul style="list-style-type: none"> <li>– erytema</li> <li>– fotodermatozy</li> <li>– poparzenie słoneczne</li> </ul>
Przewlekły	<ul style="list-style-type: none"> <li>– fotostarzenie skóry</li> <li>– keratozy słoneczne</li> <li>– pigmentacja (opalenizna, piegi)</li> <li>– zmiany przednowotworowe i nowotworowe</li> <li>– rak skóry (podstawno-, płasko- i kolczastokomórkowy, czerniak)</li> </ul>

#### 5.2.2.4. Zagrożenie olśnieniem

Olśnienie jest to pewien stan lub przebieg procesu widzenia, podczas którego może wystąpić odczucie przykrości, rozdrażnienia, dekoncentracji lub ograniczenie

na krótki, ale zauważalny czas, zdolności spostrzegania na skutek nadmiernych luminancji występujących w przestrzeni lub czasie. Jest to zjawisko niekorzystne dla funkcjonowania narządu wzroku, gdyż wpływa na pogorszenie cech spostrzegania, jak szybkość, pewność i dokładność, oraz powoduje niewygodę widzenia (Żagan, 2005). Stanowi ono szczególny przypadek zagrożenia w środowisku pracy, gdyż, w zależności od jego rodzaju (przykre, przeszkadzające, oślepiające), może w różny sposób stanowić o zagrożeniu i związanym z tym ryzyku zawodowym.

W przypadku olśnienia słonecznego dochodzi zazwyczaj do olśnienia przeszkadzającego lub oślepiającego, które na krótki, ale zauważalny czas ogranicza zdolność spostrzegania lub uniemożliwia widzenie. Jest szczególnie niebezpieczne podczas wykonywania prac na wysokości lub prac pod napięciem, gdyż wówczas na skutek olśnienia może dojść do błędów spostrzegania i w następstwie – do upadku z wysokości lub porażenia prądem. Olśnienie słoneczne może być bezpośrednie, jeśli w polu widzenia pracownika znajduje się tarcza słoneczna, lub pośrednie na skutek odbić światła słonecznego od połyskliwych elementów otoczenia. W przypadku olśnienia bezpośredniego promieniowaniem słonecznym może dojść ponadto do uszkodzenia termicznego lub fotochemicznego siatkówki oka. Mogą wówczas wystąpić stany zapalne siatkówki, a nawet trwałe uszkodzenie części siatkówki.

### 5.2.3. Metoda oceny narażenia

Jest kilka metod oceny ekspozycji człowieka na naturalne promieniowanie nadfioletowe, a mianowicie:

- metoda szacunkowa oparta na indeksie UV (<http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf>)
- metoda obliczeniowa oparta na współczynnikach ekspozycji (PN-EN 14255-3:2008)
- metoda obliczeniowa wspomaganą komputerowo, z wykorzystaniem modelu radiacyjnego transferu energii promieniowania słonecznego przez atmosferę (Biszczyk i in., 2008)
- metody oparte na pomiarach napromienienia promieniowaniem UV, na jakie eksponowany jest człowiek (Gies i Wright, 2003; Schmalwieser i in., 2007).

Jak wykazała praktyka, najlepszymi metodami oceny ekspozycji indywidualnej na naturalne promieniowania nadfioletowe są metody oparte na pomiarach, choć są metodami dość złożonymi i kosztownymi.

Istnieje kilka metod pomiaru dawki promieniowania UV, na jakie eksponowany jest człowiek (PN-EN 14255-3:2008):

- bezpośrednia, poprzez pomiar napromienienia za pomocą osobistego dozymetru promieniowania UV. Ten sposób pomiaru preferowany jest ze względu

du na najbardziej wiarygodne wyznaczenie dawki promieniowania, na jakie eksponowane były poszczególne fragmenty ciała poruszającego się człowieka (Knuschke i in., 2004)

- pośrednia, poprzez pomiar efektywnego erytemalnie natężenia napromienienia za pomocą stacjonarnego radiometru (miernik ustawiony w jednym miejscu i nieruchomy podczas pomiarów) z jednoczesnym pomiarem czasu ekspozycji
- pośrednia, poprzez pomiar widmowej gęstości natężenia napromienienia za pomocą stacjonarnego spektrometri matrycowego lub skanującego (miernik ustawiony w jednym miejscu i nieruchomy podczas pomiarów) z jednoczesnym pomiarem czasu ekspozycji
- pośrednia, poprzez pomiar efektywnego erytemalnie napromienienia z wykorzystaniem stacjonarnego radiometru (miernik ustawiony w jednym miejscu i nieruchomy podczas pomiarów).

Analiza doniesień literaturowych (Schmalwieser i in., 2007; Thieden i in., 2004; Holman i in., 1983; Gies i in., 1995; Thieden i in., 2005; Unverricht i in., 2006; Wolska i Latała, 2011; Wolska, 2013) dotyczących badania intensywności indywidualnej ekspozycji na naturalne promieniowanie nadfioletowe przedstawicieli różnych grup zawodowych oraz ludzi spędzających swój wolny czas na otwartym powietrzu wykazała, że najlepszą metodą oceny ekspozycji indywidualnej jest metoda bezpośrednia. Metoda ta, choć najbardziej uciążliwa (wielokrotny dojazd do różnych miejsc, w których przeprowadzane są badania, przekonanie pracowników do udziału w badaniach, analiza dużej ilości danych), charakteryzuje się największą dokładnością w ilościowej ocenie indywidualnych dawek promieniowania UV.

Najczęściej w tej metodzie stosuje się indywidualne dozymetry, które można podzielić na dwa rodzaje: aktywne i pasywne. Dozymetry aktywne są to zminiaturyzowane urządzenia elektroniczne wyposażone w detektory promieniowania nadfioletowego (Schmalwieser i in., 2007; Thieden i in., 2004; Knuschke, 2006; Enzi i in., 2006; Holman i in., 1983; Wolska i Latała, 2011; Wolska, 2013). Dozymetry pasywne mają postać cienkiej folii, najczęściej wykonanej z polisulfonu, która pod wpływem padającego na nią promieniowania UV odpowiednio zmienia swoją absorpcję (Holman i in., 1983; Gies i in., 1995; Thieden i in., 2005; Knuschke, 2006; Enzi i in., 2006; Wester, 2006) – na podstawie pomiaru spektrofotometrycznego współczynnika absorpcji określa się dawkę promieniowania. Oba rodzaje dozymetrów powinny być odpowiednio skorygowane do krzywej skuteczności erytemalnej oraz skalibrowane. Zalety i wady obydwu rodzajów dozymetrów przedstawiono w tabeli 5-11.



**Tabela 5-11.** Zalety i wady metod aktywnej oraz pasywnej pomiaru napromienienia (PN-EN 14255-3:2008)

Zalety	Wady
Metoda aktywna	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– reprezentatywny pomiar indywidualnej, skutecznej erytemalnie dawki promieniowania</li> <li>– łatwe wykonanie pomiaru</li> <li>– nie jest wymagany dodatkowy pomiar czasu</li> <li>– dowolnie długi czas przechowywania danych w dozymetrze po pomiarze</li> <li>– możliwość określenia rozkładu wielkości dawki promieniowania UV na ciele osoby ekspozowanej</li> <li>– dozymetr wielokrotnego użytku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– duża niepewność pomiaru w przypadku niewystarczającego skorygowania czułości dozymetru do krzywej skuteczności erytemalnej <math>S_{er}(\lambda)</math></li> <li>– wysoki koszt zakupu urządzeń charakteryzujących się dużą dokładnością pomiaru</li> <li>– przeprowadzenie badań mających na celu określenie rozkładu wielkości dawki promieniowania UV na ciele osoby ekspozowanej możliwe jest z wykorzystaniem kilku małych urządzeń jednocześnie</li> </ul>
Metoda pasywna	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– reprezentatywny pomiar indywidualnej, skutecznej erytemalnie dawki promieniowania</li> <li>– łatwe zbieranie danych</li> <li>– nie jest wymagany dodatkowy pomiar czasu</li> <li>– możliwość określenia rozkładu wielkości dawki promieniowania UV na ciele osoby ekspozowanej</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– duża niepewność pomiaru w przypadku niewystarczającego skorygowania czułości dozymetru do krzywej skuteczności erytemalnej <math>S_{er}(\lambda)</math></li> <li>– konieczność posiadania dodatkowego wywzorcowanego sprzętu do czytania wyników pomiarów (spektrofotometr)</li> <li>– czasochłonna analiza wyników pomiarów</li> <li>– dozymetr jednokrotnego użycia, co powoduje, że metoda ta jest kosztowna w przypadku wielokrotnego wykonywania pomiarów</li> </ul>

W celu przeprowadzenia pomiarów służących do oceny narażenia na naturalne promieniowanie UV dozymetry umieszcza się na różnych ekspozowanych częściach ciała, tak aby nie przeszkadzały podczas wykonywania czynności pracy. Są to najczęściej: ramię, nadgarstek, piersi, czoło, kark. Aby określić dawkę względną, zwykle jeden dozymetr – odniesieniowy – umieszcza się w bliskim otoczeniu wykonywanych prac, w pozycji poziomej, w bezpiecznym i nieosłoniętym miejscu. W ten sposób maksymalna dawka (napromienienie) promieniowania UV w czasie wykonywania pomiarów mierzona jest przez dozymetr odniesieniowy. Służy ona do wyznaczania względnych dawek promieniowania, na które ekspozowani są poszczególni pracownicy. Dozymetry noszone na ramieniu nie przeszkadzają pracownikom w wykonywaniu normalnych czynności pracy.

Ocena narażenia obejmuje pomiar dawki w czasie zmiany roboczej oraz zebranie dodatkowych danych dotyczących miejsca pomiaru, daty pomiaru, czasu rejestracji pomiarów, warunków pogodowych, rodzaju powierzchni odbijających,

zacienienia, czynności pracy, a także stosowanej odzieży i środków ochrony indywidualnej (sprzętu). Ponadto pracownicy wypełniają ankiety dotyczące dolegliwości i schorzeń oczu oraz skóry, które mogą mieć związek z narażeniem na promieniowanie optyczne.

## 5.2.4. Przykładowe profile narażenia na naturalne promieniowanie optyczne

### 5.2.4.1. Analizowane parametry

Na potrzeby oceny stopnia zagrożenia naturalnym promieniowaniem UV i określenia profili narażenia wykonano pomiary dozymetryczne z wykorzystaniem dozymetrów aktywnych X2000-10 produkcji firmy Gigahertz-Optik GmbH (Niemcy). Zmierzono i poddano analizie następujące parametry:

- napromienienie erytemalne (dawka erytemalna) w ciągu zmiany roboczej, SED
- uśrednione napromienienie erytemalne (uśredniona dawka erytemalna) w czasie ekspozycji, SED/h
- względny wskaźnik napromienienia erytemalnego (względna dawka erytemalna)  $W$ , %.

Napromienienie erytemalne w ciągu zmiany roboczej przedstawiaienne dawki erytemalne, jakie padają na eksponowane części ciała pracowników i odzwierciedla rzeczywiste napromienienie w rejestrowanym przez dozymetr czasie (różnym dla poszczególnych badanych pracowników). Na ich podstawie można łatwo określić, czy graniczna dawka  $1\ 000\ \text{J/m}^2$  (10 SED), przyjmowana jako wartość progowa wystąpienia rumienia skóry preadaptowanej dla fototypu IV (Vecchia i in., 2007), jest przekroczona, czy też nie. Zasadniczy wpływ na uzyskane dawki ma tu zarówno występujący w danym dniu indeks UV, jak i czas ekspozycji (pomiaru), (Wolska, 2013).

Aby wyeliminować wpływ czasu ekspozycji na analizowane dawki, przyjmuje się do analizy uśrednione za czas ekspozycji napromienienie erytemalne ( $H_{sr}$ ) wyznaczone jako iloraz napromienienia erytemalnego i czasu ekspozycji, SED/h. Na ich podstawie można łatwo określić, czy u poszczególnych pracowników graniczne uśrednione za czas ekspozycji napromienienie erytemalne wynoszące  $1,25\ \text{SED/h}$  ( $10\ \text{SED}/8\ \text{h} = 1,25\ \text{SED/h}$ ) jest przekroczone (Wolska i Latała, 2011; Wolska, 2013).

Natomiast aby wyeliminować wpływ zachmurzenia i indeksu UV na analizowany stopień zagrożenia, przyjmuje się również do analizy względny wskaźnik napromienienia erytemalnego ( $W$ , %), wyznaczany na podstawie wzoru (5-7):

$$W = \frac{H_{\text{UVery}_i}}{H_{\text{UVery}_{ref}}} \cdot 100\% \quad (5-7)$$

gdzie:

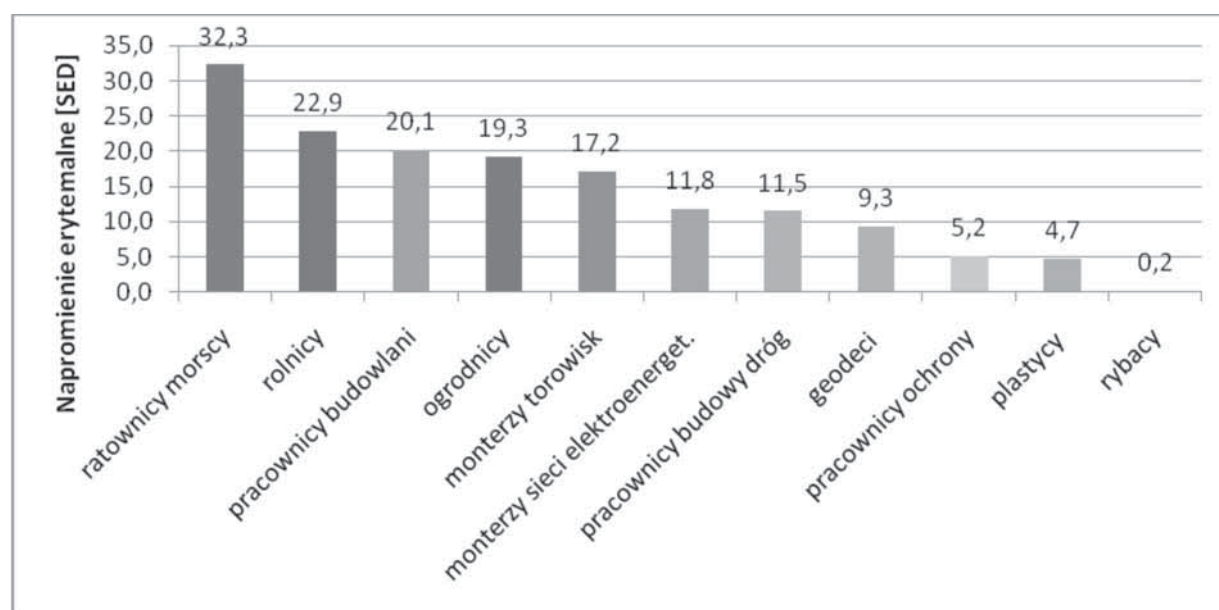
$H_{\text{UVAery}_i-r}$  – napromienienie skuteczne erytemalnie z zakresu UV mierzone przez personalny dozymetr dla  $i$ -tego pracownika

$H_{\text{UVeryr}_ref}$  – napromienienie skuteczne erytemalnie promieniowaniem z zakresu UV mierzone dozymetrem referencyjnym (gdzie dozymetr odniesieniowy umieszczony jest w nieosłoniętym miejscu w płaszczyźnie poziomej).

#### 5.2.4.2. Napromienienie erytemalne w ciągu zmiany roboczej

Badania napromienienia erytemalnego wśród monterów sieci elektroenergetycznych wykonano w okresie letnim. Prace były wykonywane na otwartym terenie bez zacienienia. Wykonywane w badanych dniach czynności pracy polegały na odłączaniu i podłączaniu kabla na słupie wsporczym linii, nadzorze dopuszczającym, wymianie odgromnika w technologii PPN. Czas pomiaru odpowiadał czasowi ekspozycji w danym dniu pracy i wynosił od 2,75 do 3,83 godzin. Ekspozycja była okołopołudniowa, tj. w godzinach od 10:00 do 13:50, co odpowiada największym wartościom indeksu UV, a tym samym największemu natężeniu napromienienia erytemalnego. Zmierzone wartości napromienienia erytemalnego wynosiły  $8,35 \div 17,24$  SED. Wartość średnia napromienienia erytemalnego wynosiła 11,83 SED. Wyniki wskazują, że we wszystkich przypadkach przekroczona była wartość 6 SED, odpowiadająca minimalnej dawce erytemalnej (MED) dla skóry preadaptowanej I i II fototypu skóry oraz w większości przypadków (65%) była przekroczona wartość 10 SED, odpowiadająca minimalnej dawce erytemalnej (MED) dla skóry preadaptowanej III i IV fototypu skóry. Należy podkreślić, że dawki te były osiągnięte przy stosunkowo niedługim czasie ekspozycji odpowiadającym  $34 \div 47\%$  dobowego wymiaru czasu pracy, chociaż w czasie największej intensywności promieniowania UV.

Na rysunku 5-7 przedstawiono wartości średnie napromienienia erytemalnego dla różnych grup zawodowych. Porównując otrzymane wyniki napromienienia erytemalnego z wynikami uzyskanymi dla innych grup zawodowych można zauważyć, że monterzy sieci elektroenergetycznych znajdują się na szóstym miejscu pod względem wielkości otrzymywanych dawek. Największe dawki zmierzono u ratowników morskich (wartości średnie powyżej 20 SED), a następnie u rolników i pracowników budowlanych. Natomiast najmniejsze dawki erytemalne zmierzono u rybaków (poniżej 1 SED). Tak małe dawki rejestrowane u rybaków wynikały z faktu, że ich zawodowa ekspozycja na naturalny UV występuje w godzinach nocnych i wczesnym rankiem, tj. od godziny 1 do 8 rano. Brak promieniowania słonecznego przez część czasu pracy oraz bardzo niskie wartości natężenia napromienienia w godzinach rannych dają w rezultacie najmniejsze napromienienie (poniżej 0,2 SED).



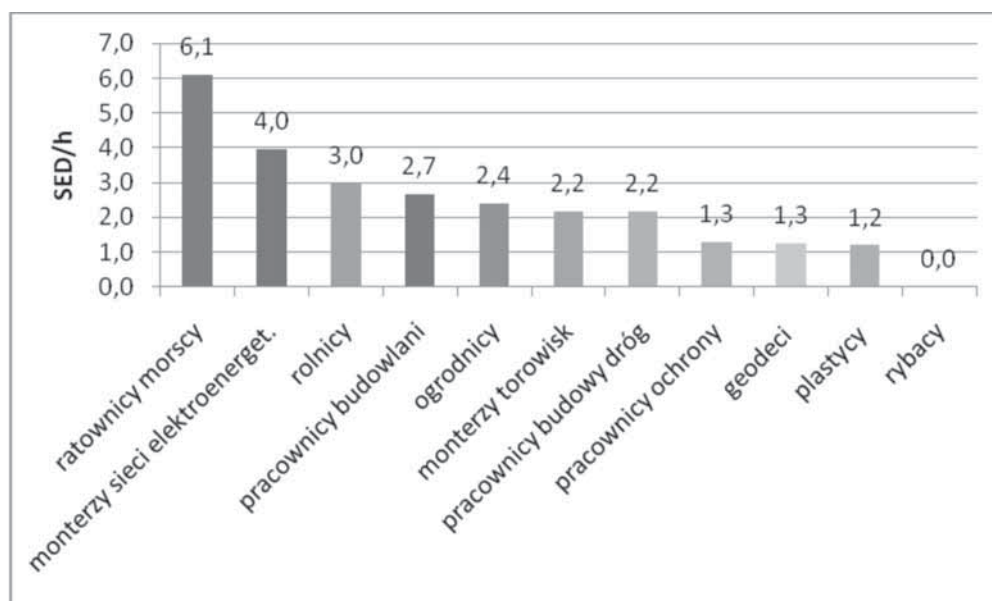
**Rys. 5-7.** Wartości średnie napromienienia erytemalnego w różnych grupach zawodowych (na podstawie: Wolska, 2013)

Zróźnicowanie otrzymywanych dawek w obrębie poszczególnych grup zawodowych wynikało (oprócz warunków pogodowych: indeks UV i zachmurzenie) zarówno z różnorodności wykonywanych przez nich czynności, jak i z zacienienia terenu lub przez sąsiednich pracowników. W przypadku monterów sieci elektroenergetycznych nie występowało zacienienie terenu, a prace były wykonywane przy słupach wsporczych linii.

#### 5.2.4.3. Uśrednione napromienienie erytemalne

Wyniki pomiarów uśrednionego napromienienia erytemalnego za czas ekspozycji u poszczególnych badanych zawierały się w przedziale  $2,58 \div 6,27$  SED/h (średnia: 3,96 SED/h). Wyniki wskazują, że we wszystkich przypadkach przekroczona jest wartość 1,25 SED/h, którą przyjmuje się jako wartość graniczną dla 8-godzinnej ekspozycji przy fototypie skóry III i IV ( $10 \text{ SED}/8 \text{ h} = 1,25 \text{ SED}/\text{h}$ ).

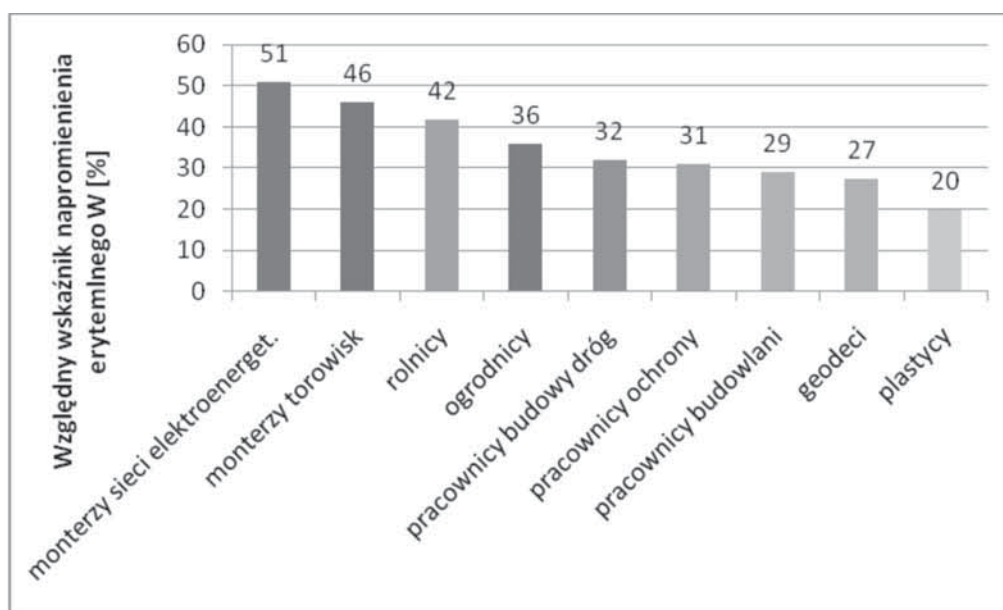
Na rysunku 5-8 przedstawiono wartości średnie uśrednionych dawek erytemalnych dla różnych grup zawodowych. Porównując otrzymane wyniki uśrednionych dawek napromienienia erytemalnego z wynikami uzyskanymi dla innych grup zawodowych, można zauważyć, że monterzy sieci elektroenergetycznych znajdują się na drugim miejscu co do ich wielkości. Największe dawki dotyczyły ratowników morskich (wartości średnie powyżej 6 SED), a następnie monterów sieci elektroenergetycznych, rolników i pracowników budowlanych. Podobnie jak w przypadku napromienienia erytemalnego, najmniejsze uśrednione dawki erytemalne za czas ekspozycji odnosiły się do grupy rybaków i pracowników ochrony.



**Rys. 5-8.** Wartości średnie uśrednionych dawek erytemalnych w różnych grupach zawodowych (na podstawie: Wolska, 2013)

#### 5.2.4.4. Wskaźnik napromienienia erytemalnego

Wskaźnik napromienienia erytemalnego dla grupy monterów sieci elektroenergetycznych, uzyskany w wyniku pomiarów, wynosił  $48 \div 53\%$ . Średnia wartość tego wskaźnika wynosiła 51%. Wskaźnik pokazuje stopień narażenia na promieniowanie słoneczne przy wyeliminowanym wpływie zachmurzenia i indeksu UV. Zestawienie względnego wskaźnika napromienienia erytemalnego dla poszczególnych grup zawodowych przedstawiono na rysunku 5-9. Porównując otrzymane wyniki wskaźnika napromienienia erytemalnego z wynikami uzyskanymi dla innych grup zawodowych można zauważyć, że monterzy sieci elektroenergetycznych znajdują się na pierwszym



**Rys. 5-9.** Wartości średnie względnego wskaźnika napromienienia dla różnych grup zawodowych (na podstawie: Wolska i Latała, 2011)



miejscu co do jego wielkości. Wynika to z faktu, że podczas wykonywania czynności dozymetr nie był przesłaniany przez zacienienie terenu ani przez innych pracowników. Zatem monterzy sieci elektroenergetycznych zaliczają się do grup zawodowych najbardziej zagrożonych ekspozycją na naturalny UV (średnie  $W$  powyżej 50%).

#### 5.2.4.5. Profile zagrożenia naturalnym UV

Profile zagrożenia naturalnym promieniowaniem UV zostały określone na podstawie analizy następujących parametrów:

- napromienienia erytemalnego w ciągu zmiany roboczej, SED
- uśrednionego napromienienia erytemalnego w czasie ekspozycji, SED/h
- względnego wskaźnika napromienienia erytemalnego  $W$ , %.

Przyjęto 5-stopniową skalę zagrożenia naturalnym promieniowaniem UV: bardzo wysokie, wysokie, średnie, małe, bardzo małe. W tabeli 5-12 przedstawiono grupy zawodowe i odpowiadający im stopień zagrożenia naturalnym promieniowaniem UV.

**Tabela 5-12.** Oszacowany stopień zagrożenia w poszczególnych grupach zawodowych (na podstawie: Wolska i Latała, 2011)

Grupa zawodowa	Stopień zagrożenia naturalnym UV
Ratownicy morscy	bardzo wysoki
Rolnicy	bardzo wysoki
Monterzy torowisk	bardzo wysoki
Monterzy sieci elektroenergetycznych	wysoki
Ogrodnicy	wysoki
Pracownicy budowlani	wysoki
Pracownicy budowy dróg	wysoki
Geodeci	średni
Pracownicy ochrony	średni
Plastycy	mały
Rybacy	bardzo mały

Podsumowując narażenie pracowników zatrudnionych na stanowiskach monterów sieci elektroenergetycznych można stwierdzić, że stopień zagrożenia promieniowaniem UV jest wysoki.

## Bibliografia

- ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) (<http://www.acgih.org>)
- ASHRAE (2009) *HVAC Fundamentals Handbook*.
- Atlas klimatu Polski* (2005) Red. H. Lorenc. Warszawa, IMiGW.
- Biszczyk J., Lityńska Z., Curyło A (2008) *Wpływ promieniowania UV na zdrowie człowieka – Funkcje czułości spektralnej: erytemalna, prowitamina D3, SCUP-H*. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 234.
- CAREX International Information System on Occupational Exposure to Carcinogens (1998) *Occupational exposure to carcinogens in the European Union in 1990-93*, FIOH, Helsinki; [http://www.ttl.fi/NR/rdonlyres/4444380F-B1FB-4D01-A9740B6A9E663C-FA/0/1\\_description\\_and\\_summary\\_of\\_results.pdf](http://www.ttl.fi/NR/rdonlyres/4444380F-B1FB-4D01-A9740B6A9E663C-FA/0/1_description_and_summary_of_results.pdf)
- CIE (1987) International Commission on Illumination, Publication CIE 017.4-1987 *International lighting vocabulary*. Geneva.
- CIE (1998) International Commission on Illumination, Standard CIE S 007-1998 *Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose*.
- CIE (2003) International Commission on Illumination, Standard CIE S013/E:2003 *International Standard Global Solar UV Index*.
- Enzi C., Weihs P., Schmalwieser A.(2006) *Ultraviolet exposure as a function of weather, occupation and 3-d environment in Vienna and environment*.
- Gies H.P., Roy C.R., Toomey S., MacLennan R., Watson M. (1995) *Solar UVR exposures of three groups of outdoor workers on the sunshine coast, Queensland*. Photochemistry and Photobiology, Vol. 62, No. 6, 1015-1021.
- Gies P., Wright J. (2003) *Measured Solar UVR exposures of outdoor workers in Queensland in the building and construction industry*. Photochemistry and Photobiology, Vol. 74(4), 342-348.
- Global Solar UV Index – A practical guide*, WHO/SDE/OEH/02.2, <http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf>
- Grether WF. (1973) *Human performance at elevated environmental temperature*. Aerospace Med., 44, 747-55.
- Holman C.D., Gibson I.M., Stephenson M., Armstrong B.K. (1983) *Ultraviolet radiation of human body sites in relation to occupation and outdoor activity: field studies using personal UVR dosimeters*. Clinical and Experimental Dermatology, 8, 269-277.
- Kaczmarek S., Mierczyk Z., Kuzaka B. (1994) *Oddziaływanie promieniowania laserowego na tkankę biologiczną*. Wiadomości Lekarskie, XLVII, 11-12, 21-24.
- Knuschke P. (2006) *Personal UV-monitoring in health prevention and risk analysis*. Helsinki University of Technology, UV News, Issue 8.

- Knuschke P., Kurpiers E., Koch R., Kuhlisch W., Witte K. (2004) *Mean individual UV-exposures in the population*. Final Report on BMBF-project 07UVB54C/3, TIB Hannover F05B898, 16-25.
- Konieczny P., Wolska A., Świdorski J., Zając A. (2008) *Symulacja zagrożeń promieniowaniem laserowym odbitym i rozproszonym oraz wybrane aspekty projektowania osłon przed tym promieniowaniem*. Biuletyn WAT.
- Lityńska Z., Łapeta B., Wolska H. (2001) *Indeks UV a człowiek. Przewodnik przeznaczony do praktycznego stosowania i interpretacji słonecznego indeksu UV opracowany przez czwartą Grupę Roboczą Akcji COST-713 "Prognoza UV-B"*. IMiGW, Warszawa.
- Lucas R., McMichael T., Smith W., Armstrong B. (2006) *Solar Ultraviolet Radiation. Global burden of disease from solar ultraviolet radiation*. Environmental Burden of Diseases Series, No 13, WHO Geneva.
- Marszałek A. (2003) *Fizjologiczne reakcje organizmu człowieka podczas pracy w odzieży ochronnej w gorącym środowisku*. Bezpieczeństwo Pracy, 3, 11-15.
- McKinlay A.F., Diffey B.L. (1987) *CIE research note. A reference action spectrum for ultraviolet – induced erythema in human skin*. CIE Journal 6(1), 17-22.
- Schmalwieser A.W., Cabaj A., Maier H., Fischer W., Stadlman H., Rohn H. (2007) *Measurement of the facial UV exposure using electronic two channel broadband devices*. EGU General Assembly, Vienna.
- Thieden E., Philipsen P.A., Heydenreich J., Wulf H.C. (2004) *UV radiation exposure related to age, sex, occupation and Sun behavior based on time-stamped personal dosimeter readings*. Arch. Dermatol. Vol. 140, 197-203.
- Thieden E., Collins S.M., Philipsen P.A., Murphy G.M., Wulf H.C. (2005) *Ultraviolet exposure patterns of Irish and Danish gardeners during work and leisure*. British Journal of Dermatology, 153, 795-801
- Unverricht I., Janßen M., Ott G., Knuschke P. (2006) *UV – monitoring at outdoor workplaces – a base for well-balanced health prevention regulations*. Helsinki University of Technology, UV News, Issue 8.
- Vecchia P., Hietanen M., Stuck B.E., van Deventer E., Niu S. (2007) *Protecting Workers from Ultraviolet Radiation*. International Commission on Non-Ionizing Radiation Prevention in Collaboration with International Labour Organisation – World Health Organization, 14.
- Wester U. (2006) *Polysulphone and spore-film UV-dosimeters compared to a UVI monitoring instrument and to radiation model systems – evaluations for a UV dosimetry study 2004 of pre-school children*. Helsinki University of Technology, UV News, Issue 8.
- Wolska A. (2013) *Promieniowanie optyczne w środowisku pracy*. Warszawa, CIOP-PIB.
- Wolska A., Flaspöler E., Reinert D., Hietanen M., Kaluza S., Udovicic L., Eeckelaert L., Tajedor M., Cavalle N., de Diego B., Salsi S. (2006) *Project P-06-07 "Emerging risks report on ultraviolet radiation"*. [Praca niepublikowana]
- Wolska A., Latała A. (2011) *Ocena ryzyka zawodowego związanego z ekspozycją na naturalne promieniowanie nadfioletowe (UV)*. Warszawa, CIOP-PIB.

Zwolińska M., Bogdan A. (2012) *Związki zmiennofazowe w zastosowaniach techniczno-użytkowych i ergonomicznych*. *Bezpieczeństwo Pracy*, 4, 22-25.

Żagan W. (2005) *Podstawy techniki świetlnej*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

[http://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie\\_słoneczne](http://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_słoneczne)

[http://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt\\_cieplarniany](http://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt_cieplarniany)

<http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf>

[http://www.imgw.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=143&Itemid=176](http://www.imgw.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=143&Itemid=176)

[http://www.imgw.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=144&Itemid=177](http://www.imgw.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=144&Itemid=177)

*Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. DzU nr 217, poz. 1833; 2005, nr 212, poz. 1769; 2007, nr 161, poz. 1142.

*Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 16 czerwca 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. DzU nr 105, poz. 873.

*Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 16 grudnia 2011 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. DzU nr 274, poz. 1621.

PN-EN 511:2009 *Rękawice chroniące przed zimnem*.

PN-EN 14255-3:2008 *Pomiar i ocena osobistej ekspozycji na niekoherentne promieniowanie optyczne – Cz. 3: Promieniowanie słoneczne UV*.

PN-EN 27243:2005 *Środowiska gorące. Wyznaczanie obciążenia termicznego działającego na człowieka podczas pracy, oparte na wskaźniku WBGT*.

PN-EN ISO 7730:2006 *Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczenie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego*. (oryg.)

PN-EN ISO 7933:2005 *Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego*. (oryg.)

PN-EN ISO 11079:2008 *Ergonomia środowiska termicznego. Wyznaczanie i interpretacja stresu termicznego wynikającego z ekspozycji na środowisko zimne z uwzględnieniem wymaganej izolacyjności cieplnej odzieży (IREQ) oraz wpływu wychłodzenia miejscowego*. (oryg.)

PN-EN ISO 9920:2009 *Ergonomia środowiska termicznego – Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży*.

PN-EN ISO 13732-3:2009 *Ergonomia środowiska termicznego – Metody oceny reakcji człowieka na dotknięcie powierzchni – Cz. 3: Powierzchnie zimne.* (oryg.)

PN-90/E-01005 *Technika świetlna – terminologia.*

PN-85/N-08011 *Środowisko gorące. Wyznaczenie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT.*



# 6. Pole elektryczne i magnetyczne sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Krzysztof Gryz, Jolanta Karpowicz

**6.1.** Pola elektryczne i magnetyczne w otoczeniu sieci elektroenergetycznych WN (149)

**6.1.1.** Pola elektryczne i magnetyczne wytwarzane przez elementy sieci elektroenergetycznych (150)

**6.1.2.** Pola elektryczne i magnetyczne źródeł niezależnych od sieci elektroenergetycznych (153)

**6.2.** Bezpośrednie i pośrednie oddziaływanie pól elektrycznych i magnetycznych na organizm człowieka i infrastrukturę techniczną (155)

**6.3.** Elektromagnetyczne zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia przy obiektach elektroenergetycznych (161)

**6.3.1.** Czynniki warunkujące poziom zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia (161)

**6.3.2.** Podstawy sparametryzowanej oceny zagrożeń elektromagnetycznych (162)

**6.3.2.1.** Pomiary miar zewnętrznych ekspozycji (poziomów narażenia) (163)

**6.3.2.2.** Pomiary pośrednich skutków ekspozycji (171)

**6.3.2.3.** Wykorzystanie technik komputerowych do oceny poziomów narażenia i oddziaływania (172)

**6.3.3.** Poziomy zagrożenia elektromagnetycznych charakterystyczne dla polskich warunków (173)

**6.4.** Przykładowe profile narażenia pracowników na pola elektryczne i magnetyczne (174)

**6.5.** Podsumowanie (178)

Bibliografia (179)

## 6.1. Pola elektryczne i magnetyczne w otoczeniu sieci elektroenergetycznych WN

Wykorzystywanie energii elektrycznej w różnych sektorach gospodarki wiąże się nierozdzielnie z powszechnym występowaniem pól elektromagnetycznych w środowisku pracy. W polskich przepisach dotyczących ochrony pracowników przed niepożądanymi oddziaływaniami czynników środowiskowych podczas wykonywania pracy, terminem *pola i promieniowanie elektromagnetyczne* określane są pola elektrostatyczne i magnetostacyjne (niezmienne w czasie) oraz pola zmienne w czasie, o częstotliwościach od 0 do 300 GHz. Do pól o częstotliwościach większych od kilku MHz może być stosowany również termin promieniowanie elektromagnetyczne.

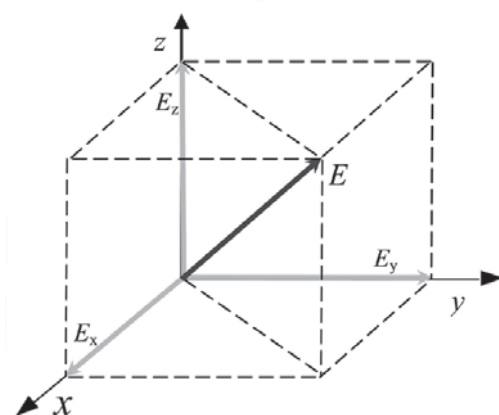
W Polsce do dystrybucji energii elektrycznej do odbiorców wykorzystuje się prąd przemienny o częstotliwości 50 Hz, przesyłany liniami elektroenergetycznymi o różnych napięciach roboczych. Linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia (WN) 110, 220 lub 400 tys. woltów (kV) przesyłają prądy o natężeniu kilkuset amperów (A). W otoczeniu pracującej linii WN występuje z tego powodu pole elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Ponadto w otoczeniu elektroenergetycznych linii WN występuje promieniowanie radiofalowe, wytwarzane przez nadajniki

wykorzystywane do komunikacji bezprzewodowej, najczęściej stacji bazowych telefonii komórkowej lub bezprzewodowych łączy internetowych, które mogą być usytuowane zarówno na wsporczych masztach linii WN, jak i na zlokalizowanych nieopodal masztach wolno stojących. Charakterystyka tych złożonych czynników środowiskowych, w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz rozkładu przestrzennego, determinuje omówione w niniejszym opracowaniu warunki narażenia pracowników obsługujących sieci elektroenergetyczne WN oraz praktyczne problemy związane z jego badaniami i oceną.

### 6.1.1. Pola elektryczne i magnetyczne wytwarzane przez elementy sieci elektroenergetycznych

Procesy energetyczne związane z ładunkami zgromadzonymi w danym ośrodku (zarówno nieruchomymi, czyli tworzącymi ładunki elektrostatyczne, jak i przepływającymi w ośrodku, czyli tworzącymi prąd elektryczny) są opisywane jako tzw. pole elektromagnetyczne. Model matematyczny pola elektromagnetycznego wykorzystuje dwie wielkości wektorowe – natężenie pola elektrycznego ( $E$ ) i natężenie pola magnetycznego ( $H$ ), (rys. 6-1), dla których w danym punkcie przestrzeni można określić zarówno moduł, jak i jego polaryzację.

**Rys. 6-1.** Przykład wielkości wektorowej:  
 $E$  – natężenia pola elektrycznego,  
 $x, y, z$  – ortogonalny układ współrzędnych



Wielkości charakteryzujące pole elektromagnetyczne i zależności między nimi w ogólności opisane są równaniami Maxwella, które w międzynarodowym układzie jednostek SI można zapisać następująco:

– prawo Faradaya  $\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  (6-1)

– prawo Ampera  $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  (6-2)

– źródłowość pola elektrycznego  $\text{div } \mathbf{D} = \rho$  (6-3)

– bezźródłowość pola magnetycznego  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  (6-4)

$$\text{– prawo zachowania ładunku elektrycznego} \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} \quad (6-5)$$

$$\text{– własność pola elektrycznego} \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6-6)$$

$$\text{– własność pola magnetycznego} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6-7)$$

$$\text{– prawo Ohma} \quad \mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \quad (6-8)$$

gdzie:

$H$  – natężenie pola magnetycznego, A/m (ampery na metr)

$B$  – indukcja magnetyczna, T (tesle)

$E$  – natężenie pola elektrycznego, V/m (wolty na metr)

$D$  – indukcja elektryczna, C/m<sup>2</sup> (kulomby na metr kwadratowy)

$J$  – gęstość prądu elektrycznego, A/m<sup>2</sup> (ampery na metr kwadratowy)

$\sigma$  – przewodność elektryczna, S/m (simensy na metr)

$\rho$  – gęstość objętościowa ładunku, C/m<sup>3</sup> (kulomby na metr sześcienny)

$\mu$  – przenikalność magnetyczna, H/m (henry na metr)

$\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni –  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

$\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna ośrodka (dla powietrza:  $\mu_r = 1$ )

$\varepsilon$  – przenikalność elektryczna, F/m (farady na metr)

$f$  – częstotliwość, Hz (herce)

$v$  – prędkość, m/s (metry na sekundę)

$t$  – czas, s (sekundy)

rot – rotacja wektora

div – dywergencja wektora.

Zależności (6-1) ÷ (6-8) umożliwiają obliczenie przestrzennego rozkładu dowolnych parametrów pól elektromagnetycznych pochodzących od źródeł o różnych parametrach elektrycznych i geometrycznych. Analiza pola pochodzącego od wielu źródeł pracujących równocześnie w ośrodku o złożonej konfiguracji elementów materialnych, takich jak np. obiekty metalowe, wymaga zwykle wykorzystania złożonych modeli numerycznych i obliczeń komputerowych z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania.

W związku z zaprezentowaną złożoną strukturą równań Maxwella, w procesie analizowania parametrów środowiskowych zagrożeń elektromagnetycznych wykorzystywane są zwykle następujące wielkości fizyczne: natężenie pola magnetycznego, natężenie pola elektrycznego i częstotliwość ich zmienności w czasie. Do scharakteryzowania pól magnetostaticznych lub magnetycznych małych częstotliwości stosowana może być również indukcja magnetyczna – alternatywnie do natężenia pola magnetycznego. Najczęściej w praktyce wykorzystywana jest następująca zależność umożliwiająca przeliczenie tych wielkości charakteryzujących pole magnetyczne w powietrzu: pole magnetyczne o natężeniu 1 A/m jest w powietrzu charakteryzowane

również indukcją magnetyczną o wartości ok.  $1,25 \mu\text{T}$ . W niniejszym opracowaniu pole magnetyczne występujące w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych scharakteryzowane jest z wykorzystaniem parametrów natężenia pola magnetycznego.

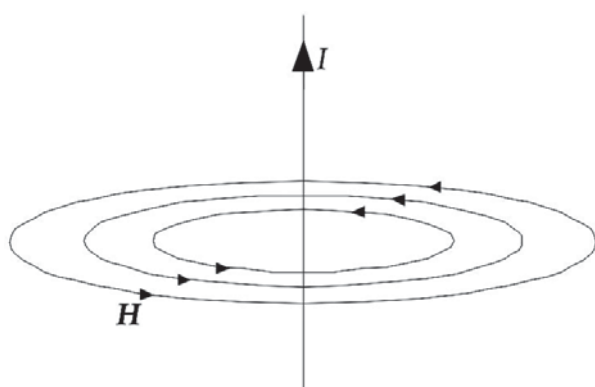
W razie analizy rozkładu pola przy pojedynczych źródłach o nieskomplikowanej geometrii można skutecznie posłużyć się zależnościami uproszczonymi. Przykładowo, natężenie pola magnetycznego wokół pojedynczego prostoliniowego przewodu z prądem (rys. 6-2) wyrażone jest zależnością (6-9):

$$H = I / (2\pi r) \quad (6-9)$$

gdzie:

$I$  – natężenie prądu w przewodzie, A

$r$  – odległość od przewodu, m.



Rys. 6-2. Natężenie pola magnetycznego wokół prostoliniowego przewodu z prądem

Na przykład, pole magnetyczne o natężeniu  $1\,000 \text{ A/m}$  ( $1 \text{ kA/m}$ ) występuje w odległości ok.  $15 \text{ cm}$  od pojedynczego długiego prostoliniowego przewodu, w którym płynie prąd o natężeniu  $1\,000 \text{ A}$ .

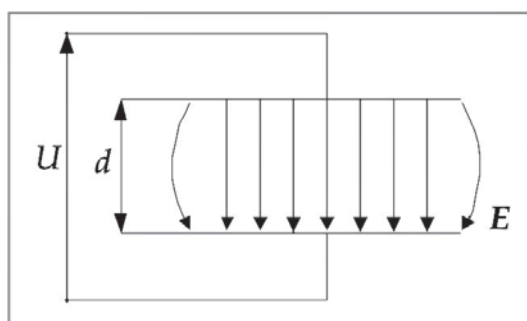
Natomiast wartość natężenia pola elektrycznego w kondensatorze płaskim (rys. 6-3) wyrażona jest zależnością (6-10):

$$E = \frac{U}{d} \quad (6-10)$$

gdzie:

$U$  – napięcie w kondensatorze, V

$d$  – odległość między płytami kondensatora, m.



Rys. 6-3. Pola elektryczne w kondensatorze płaskim

Z przytoczonych zależności wynika, że natężenie pola elektrycznego jest proporcjonalne do różnicy potencjału elektrycznego, występującego w źródle pola, a natężenie pola magnetycznego proporcjonalne do natężenia prądu. Natężenie pola magnetycznego i natężenie pola elektrycznego zmniejszają się w miarę oddalania od źródła, co najmniej proporcjonalnie do odległości.

Linie elektroenergetyczne WN eksploatowane są praktycznie przy stałym napięciu roboczym linii (zmiany nie przekraczają kilku procent) – w związku z tym rozkład pola elektrycznego w otoczeniu linii jest niemal stały, modyfikowany jedynie zmiennością wysokości zawieszenia przewodów roboczych nad ziemią, zmniejszającej się w miarę wzrastania temperatury przewodów. Natomiast natężenie prądu przesyłanego linią może ulegać znacznym zmianom – od poziomu zerowego, w linii nieobciążonej, do maksymalnego – kiedy linia pracuje pod maksymalnym obciążeniem w czasie dużego zapotrzebowania na energię elektryczną. W związku z tym również poziom pola magnetycznego w otoczeniu linii podlega znacznym fluktuacjom.

Ponadto, rozpatrując charakterystykę pól elektromagnetycznych oddziałujących na pracowników obsługujących sieci elektroenergetyczne, należy uwzględnić fakt, że dla zapewnienia niezbędnej ochrony przed porażeniem łukiem elektrycznym, jakie może wystąpić w pobliżu obiektów elektroenergetycznych pracujących pod wysokim napięciem elektrycznym, wiele prac w ich pobliżu może być wykonanych jedynie po wyłączeniu zasilania elektrycznego całej linii lub wybranego toru przesyłowego linii, czyli w czasie, kiedy w pobliżu linii nie występują pola elektromagnetyczne.

### **6.1.2. Pola elektryczne i magnetyczne źródeł niezależnych od sieci elektroenergetycznych**

Najpowszechniej w środowisku, również w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych, występuje promieniowanie nadawczych stacji radiowych i telewizyjnych oraz stacji bazowych telefonii komórkowej i systemów bezprzewodowego dostępu do Internetu.

Słupy wsporcze elektroenergetycznych linii WN są coraz częściej wykorzystywane także do innych celów, np. jako elementy nośne, na których montowane są anteny nadawcze systemów telefonii komórkowej lub sieci internetowych (rys. 6-4). Linie elektroenergetyczne mogą przebiegać w pobliżu autonomicznych obiektów radionadawczych różnego typu. W obu przypadkach w otoczeniu linii elektroenergetycznych występuje złożone pole elektromagnetyczne, ze wspomnianymi składowymi o częstotliwości 50 Hz, wytwarzanymi przez obiekty elektroenergetyczne, a także ze składowymi o częstotliwości z zakresu radiofalowego (ok. 0,1 ÷ 800 MHz wskutek działania stacji RTV, oraz ok. 900, 1 800 i 2 100 MHz – wskutek pracy róż-



nych systemów telefonii komórkowej, ok. 1,7; 1,8; 2,4 oraz 5 GHz – wskutek pracy systemów bezprzewodowego dostępu do Internetu).

Największy poziom radiofalego pola elektromagnetycznego występuje na wysokości zainstalowania anteny wzdłuż głównego kierunku jej promieniowania, najczęściej nieznacznie odchylonego w dół od poziomego. W płaszczyźnie pionowej, w pobliżu masztu natężenie promieniowania szybko maleje w miarę oddalania się od głównej wiązki promieniowania emitowanego z anteny.

Nadajniki RTV z reguły pracują ze stałą mocą w czasie, w związku z tym poziom wytwarzanego przez nie promieniowania radiofalego nie podlega istotnym fluktuacjom. Natomiast promieniowanie stacji bazowych telefonii komórkowej



**Rys. 6-4.** Słup wsporczy elektroenergetycznej linii WN 110 kV z zamontowanymi antenami nadawczymi systemu telefonii komórkowej (fot. autorzy)

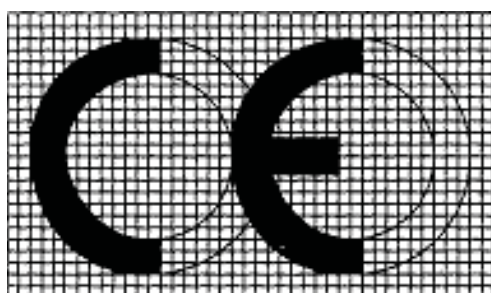
z oddziaływaniem takich obiektów na pracowników obsługujących sieci elektroenergetyczne WN, aby w razie potrzeby były wdrożone niezbędne działania profilaktyczne.

W środowisku pracy eksploatowanych jest również wiele urządzeń elektrycznych wytwarzających pola elektromagnetyczne różnych częstotliwości i natężeń, które mogą być wykorzystywane również przez pracowników obsługujących sieci elektroenergetyczne WN. Mogą to być urządzenia takie jak:

- spawarki łukowe i zgrzewarki rezystancyjne (do metalu) lub dielektryczne (do tworzyw sztucznych)
- ręczne, przenośne terminale radiotelefonów i telefonów komórkowych
- zespoły napędowe pojazdów elektrycznych

- ręczne narzędzia elektryczne, takie jak wiertarki i szlifierki
- elektryczne urządzenia grzewcze, takie jak piece oporowe i mikrofalowe
- elektryczne wyposażenie w pomieszczeniach biurowych i socjalnych, takie jak: lampy oświetleniowe, urządzenia komputerowe, kuchenki mikrofalowe, kuchenki elektryczne indukcyjne i rezystancyjne, grzałki elektryczne.

Urządzenia te wytwarzają pola elektromagnetyczne o bardzo różnorodnych częstotliwościach, od częstotliwości przemysłowej 50 Hz do pasma radiofalowego. Urządzenia elektryczne mogą być wprowadzone do sprzedaży na rynku europejskim pod warunkiem oznakowania znakiem „CE” o minimalnej wysokości 5 mm (umieszczanym przez producenta zwykle na obudowie urządzenia elektrycznego – oznakowanie wyrobów bardzo małych dopuszczalne jest na ich opakowaniu), potwierdzającym zgodność ich parametrów technicznych z wymaganiami wybranych dyrektyw europejskich, m.in. dyrektywy niskonapięciowej LVD 2006/95/WE (rys. 6-5). Większość tego typu urządzeń może być wykorzystywana zarówno w gospodarstwach domowych, jak i przy wykonywaniu czynności zawodowych – zaliczają się więc one również do urządzeń powszechnego użytku, których eksploatacja na rynku europejskim wymaga spełnienia wymagań rekomendacji europejskiej 1999/519/EC (*Council of the European Union Recommendation*, 1999).



**Rys. 6-5.** Znak CE, potwierdzający spełnienie wymagań zasadniczych wynikających z dyrektyw europejskich nowego podejścia, dotyczących m.in. urządzeń elektrycznych wprowadzanych do sprzedaży na rynku europejskim (*Dyrektywa 2006/95/WE*)

## 6.2. Bezpośrednie i pośrednie oddziaływanie pól elektrycznych i magnetycznych na organizm człowieka i infrastrukturę techniczną

### Oddziaływanie bezpośrednie pól elektromagnetycznych na organizm człowieka

Wskutek bezpośredniego oddziaływania pola elektromagnetycznego w organizmie człowieka przebywającego w polu małej i średniej częstotliwości zachodzą procesy elektrodynamiczne i biofizyczne, które wskutek przepływania w organi-

zmie zaindukowanego prądu elektrycznego mogą prowadzić do zakłócenia procesów fizjologicznych w komórkach nerwowych – zarówno centralnego układu nerwowego, jak i nerwów obwodowych. Objawami takiego oddziaływania, zależnie od natężenia i częstotliwości pola, mogą być m.in. odczucia drżenia mięśni szkieletowych, wrażenia wzrokowe – tzw. magnetofosfeny lub elektrofosfeny (WHO, 2007) czy zaburzenia równowagi i zawroty głowy, zaburzenia koordynacji wzrokowo-ruchowej lub odczuwanie metalicznego posmaku (Wilen i de Vocht, 2011; de Vocht i in., 2006), a nawet zaburzenia sercowo-naczyniowe (ICNIRP, 2010). Odczucia takie mogą utrudnić lub wręcz uniemożliwić wykonanie czynności zawodowych, wymagających od pracownika zachowania precyzji, mogą też spowodować poważne rozproszenie uwagi lub nieskoordynowane reakcje ruchowe i wypadki przy pracy, szczególnie przy pracach wymagających zachowania równowagi, jak różnorodne prace na wysokości – na pomostach, drabinach, rusztowaniach, masztach.

Wyniki badań epidemiologicznych wskazują na zachorowania na nowotwory występujące częściej u osób poddanych wieloletniej, chronicznej ekspozycji na pola elektromagnetyczne. Badania takie, zapoczątkowane w latach 70. ubiegłego wieku, dotyczyły najczęściej dzieci zamieszkujących w pobliżu przesyłowych linii elektroenergetycznych – stwierdzono m.in. zwiększone ryzyko zachorowań na białaczki u dzieci amerykańskich mieszkających w domach zlokalizowanych w polach magnetycznych o wyższych od typowych poziomach pola magnetycznego małej częstotliwości (50/60 Hz) w pobliżu linii elektroenergetycznych WN (Wertheimer i Leeper, 1979, 1982). W latach 1980–2007 przeprowadzono blisko 250 znaczących badań epidemiologicznych odnoszących się do zachorowalności na nowotwory u dzieci i osób dorosłych narażonych na pola magnetyczne 50/60 Hz. Dotyczyły one ludności zamieszkującej w pobliżu linii elektroenergetycznych oraz pracowników energetyki, w większości badań nie wykonano oceny narażeń na podstawie indywidualnych pomiarów pól magnetycznych oddziałujących na uczestników badań. Wyniki wykonanych badań są m.in. z tego powodu niejednoznaczne (Zmysłony, 2008) – część badań wskazuje na zwiększone ryzyko zachorowań na nowotwory wśród ludzi podlegających przewlekłej ekspozycji, inne badania tego związku nie potwierdzają. Podsumowując zebrane dowody naukowe stwierdzono, że zachorowania na niektóre postacie białaczek występują 2-krotnie częściej niż w całej populacji u dzieci narażonych w mieszkaniach na pola magnetyczne o średnim natężeniu ok. 0,3 A/m. Dotychczas nie wyjaśniono, czy pole magnetyczne jest czynnikiem przyczynowym takich zachorowań. Badania ryzyka zachorowań na nowotwory u osób dorosłych, zamieszkałych w takich samych warunkach, nie są tak jednoznaczne. W niektórych badaniach dotyczących pracowników elektroenergetyki,

którzy są narażeni na silniejsze pola magnetyczne (kilka – kilkanaście A/m) stwierdzono 1,2–1,8-krotnie zwiększone ryzyko zachorowań na nowotwory, w innych wzrostu ryzyka nie wykazano.

Pomimo kilku dziesięcioleci ekstensywnych badań naukowych nie rozstrzygnięto dotychczas, czy istnieje związek między przewlekłym oddziaływaniem pola magnetycznego małej częstotliwości a rozwojem chorób nowotworowych. Wyniki badań laboratoryjnych, polegające na obserwacji skutków ekspozycji zwierząt lub kultur komórkowych na pola magnetyczne, wskazują na działanie epigenetyczne (nasilanie skutków innych czynników rakotwórczych) pola magnetycznego, jednocześnie przemawiają przeciw możliwości działania genotoksycznego (bezpośrednie uszkodzenie aparatu genetycznego komórki i zapoczątkowanie procesu transformacji nowotworowej).

Badania dotyczące zagrożeń zdrowia innych niż nowotworowe, przy przewlekłym oddziaływaniu pola magnetycznego częstotliwości przemysłowej, obejmowały również m.in. ryzyko zachorowania na choroby neurodegeneratywne – zwłaszcza stwardnienie zanikowe boczne (ALS) i choroba Alzheimera, zakłóceń funkcjonowania układu krążenia i oddziaływania na funkcje rozrodcze człowieka. Ich wyniki nie są rozstrzygające (Huss i in., 2009; Schüz i Ahlbom, 2008; Wiaderkiewicz, 2008; Ahlbom i in., 2001; Bortkiewicz, 2008; IARC 2002; SCENIHR 2009; WHO 2007).

Bezpośrednim skutkiem oddziaływania elektromagnetycznego promieniowania radiofalowego na organizm żywy jest absorpcja energii promieniowania w organizmie i będący jej konsekwencją wzrost temperatury obiektu – tzw. skutek termiczny (urządzeniem wykorzystującym taki mechanizm oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego na obiekty jest kuchenka mikrofalowa, w której skutkiem absorpcji energii promieniowania mikrofalowego w potrawach jest ich podgrzanie). Skutki termiczne absorpcji promieniowania radiofalowego w organizmie zależą od poziomu i rozkładu ekspozycji w czasie oraz od tego, jaka część ciała jest narażona, tzn. od wydajności procesów termoregulacji poszczególnych części organizmu (związanych m.in. ze stopniem ukrwienia różnych tkanek). Kiedy skutki termiczne absorpcji energii promieniowania przekraczają możliwości regulacyjne organizmu, dochodzi do narastania temperatury tkanek (które może wystąpić zarówno na powierzchni ciała, jak i wewnątrz). Przy temperaturze tkanek przekraczającej 42 °C występują ich uszkodzenia termiczne.

Również skutki zdrowotne przewlekłego oddziaływania promieniowania radiofalowego na organizm człowieka były badane, począwszy od połowy ubiegłego wieku. Przegląd aktualnych publikacji naukowych omawiających wyniki takich badań wskazuje na związek zachorowań na choroby nowotworowe z przewlekłym na-



rażeniem na elektromagnetyczne promieniowanie radiofalowe (Bortkiewicz, 2008; Wiaderkiewicz, 2008; IARC, 2013). Stwierdzono, że istnieją powiązania między przewlekłą ekspozycją na promieniowanie radiofalowe, emitowane m.in. przez telefony komórkowe, a częstością zachorowań na nowotwory. Jednak, ze względu na długotrwały okres rozwoju takich chorób (przekraczający nawet 20 lat), zagrożenia takie wymagają dalszej obserwacji. Badania naukowe wskazują również na innego rodzaju zagrożenia zdrowia dotyczące osób przewlekle narażonych na oddziaływania promieniowania radiofalowego, np. wśród pracowników radiowo-telewizyjnych stacji nadawczych stwierdzono, że ciśnienie tętnicze, stężenie całkowitego cholesterolu i frakcji LDL były istotnie większe w grupach narażonych oraz że skurczowe ciśnienie krwi jest uzależnione od poziomu narażenia (Bortkiewicz, 2008; Vangelova i in., 2006).

Badań dotyczących skutków oddziaływania pól elektromagnetycznych o częstotliwościach pośrednich (z pasma kHz) oraz oddziaływania pola elektrycznego częstotliwości przemysłowej przeprowadzono znacznie mniej i są one nierozstrzygające.

Na podstawie wyników badań epidemiologicznych Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) w roku 2002 sklasyfikowała pola magnetyczne 50/60 Hz do grupy 2B, a pole elektryczne 50/60 Hz – do grupy 3. czynników rakotwórczych (IARC, 2002). W roku 2011 również promieniowanie radiofalowe zaliczono do grupy 2B (IARC, 2013). Według przyjętego przez IARC podziału (IARC, 2002, 2013):

- grupa 2B to grupa czynników lub zespołu czynników przypuszczalnie rakotwórczych dla ludzi (tj. istnieje ograniczony dowód działania rakotwórczego dla ludzi z badań epidemiologicznych przy braku wystarczającego dowodu rakotwórczości u zwierząt doświadczalnych)
- grupa 3. to grupa czynników lub zespołu czynników, których nie można sklasyfikować pod względem działania rakotwórczego dla ludzi wobec braku co najmniej ograniczonych dowodów działania rakotwórczego dla ludzi z badań epidemiologicznych i dowodu rakotwórczości u zwierząt doświadczalnych.

Stanowisko IARC zostało potwierdzone w monografii Światowej Organizacja Zdrowia (WHO, 2007), dotyczącej pól małej częstotliwości. Podano tam, że występuje możliwość związku przyczynowego ekspozycji na pola magnetyczne z ryzykiem białaczki u dzieci oraz że brak jest dowodów na ryzyko innych nowotworów u dzieci i wszelkich nowotworów u osób dorosłych, w tym u pracowników narażonych na pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50/60 Hz. Dotychczas nie opublikowano aktualnej monografii WHO dotyczącej skutków narażenia na promieniowanie radiofalowe.



Tak więc wyniki badań naukowych nie dają obecnie podstaw do przyjęcia, że brak jest zagrożeń zdrowia dla pracowników podlegających przewlekłe narażeniu zawodowemu na pola elektromagnetyczne, nawet znacznie słabsze od limitów ograniczających poziom narażenia ze względu na oddziaływanie elektrodynamiczne.

### **Oddziaływanie pośrednie – prądy kontaktowe**

Oprócz bezpośredniego oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka, pola elektromagnetyczne mogą również powodować zagrożenia dla pracowników związane z tzw. oddziaływaniem pośrednim, to jest przepływem prądów kontaktowych przez ciało człowieka dotykającego do obiektów metalowych znajdujących się w pobliżu źródła pola elektromagnetycznego, lub oddziaływaniem pól elektromagnetycznych na infrastrukturę techniczną.

Zjawisko przepływu prądu kontaktowego przez ciało człowieka ma miejsce, kiedy dotyka on obiektu, który wskutek oddziaływania pola ma inny niż ciało człowieka potencjał elektryczny. W przypadku pola elektromagnetycznego małej i średniej częstotliwości (poniżej 100 kHz) zjawisko to może wywoływać stymulację tkanek i odczuwanie bólu lub wrażenie rażenia prądem elektrycznym. Prądy kontaktowe o większych częstotliwościach nie są odczuwalne, natomiast przy dużych natężeniach mogą, mimo braku percepcji, powodować poparzenia (tzw. poparzenia radiofalowe), prowadzące do poważnych uszkodzeń termicznych ciała w miejscu kontaktu z obiektem przewodzącym lub uszkodzenia układu nerwowego w pobliżu (np. do trwałego niedowładu rażonej prądem kontaktowym kończyny). Pracownik, który niespodziewanie odczuje rażenie prądem kontaktowym, może wykonać gwałtowne, nieskoordynowane czynności, co sprzyja wystąpieniu nawet poważnych wypadków przy pracy, takich jak błędne wykonanie zadań, uderzenie innego pracownika, utrata równowagi czy upadek (m.in. upadek z wysokości – pomostu, rusztowania itp.).

Odczuwalne skutki przepływu prądu kontaktowego (tj. odczucie przez pracownika rażenia elektrycznego) mogą wystąpić przy pracach takich jak konserwacja lub naprawa elektroenergetycznych linii WN. Odłączone od napięcia przewody jednego toru linii elektroenergetycznej (obwód bierny), znajdujące się obok przewodów drugiego toru obciążonego prądowo (obwód czynny), będących źródłem pola magnetycznego, są elementem odbierającym energię. W przypadku zamknięcia dużych wymiarów pętli z elementów linii tworzących obwód bierny możliwe jest zaindukowanie w nich napięcia elektrycznego wystarczającego, aby rażony tym prądem pracownik odczuł to. Natężenie prądów kontaktowych zależne jest od konfiguracji przewodów fazowych obwodu czynnego oraz kształtu i wymiarów słupów, na których prowadzona jest linia, a próg ich odczuwania przez pracowników jest

ponadto znacznie zindywidualizowany. Uzyskane wyniki symulacji wskazują, że w przypadku linii prowadzonych na słupach różnego typu, długości pętli, w których może zaindukować się odczuwalny prąd kontaktowy, znacznie się różnią (Gryz, Karpowicz, Molenda, Zradziński, 2004). Odczuwalne rażenia prądem kontaktowym mogą zatem wystąpić w razie niesprawnego uziemienia torów linii wyłączonych spod napięcia, zalecanego w instrukcjach bhp prowadzenia prac w energetyce, a w niektórych przypadkach nawet przy sprawnym uziemieniu. Powinno być to uwzględnione w instrukcjach bezpieczeństwa prowadzenia prac w energetyce przy dostosowaniu zaleceń dotyczących odległości pomiędzy kolejnymi uziemieniami torów linii wyłączonych spod napięcia, nie tylko do napięć linii, ale również do ich konfiguracji geometrycznej i obciążenia prądowego równoległych linii czynnych.

### **Oddziaływanie pośrednie – oddziaływanie na urządzenia elektroniczne**

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na infrastrukturę techniczną związane jest ze skutkami wystąpienia w urządzeniu napięć i prądów elektrycznych, zaindukowanych wskutek oddziaływania pola elektromagnetycznego. Mogą one powodować m.in. zakłócenia pracy urządzeń elektronicznych.

Zarówno prądy kontaktowe przepływające w organizmie, jak i wspomniane oddziaływania pola elektromagnetycznego na aparaturę elektroniczną mogą zakłócać pracę aktywnych wyrobów medycznych przeznaczonych do implantacji (implantów medycznych), takich jak stymulatory serca i defibrylatory, implanty słuchowe, pompy insulinowe. Pomimo wprowadzenia w ostatnich latach znacznie udoskonalonych stymulatorów serca, o stosunkowo dużej odporności na zakłócenia powodowane skutkami oddziaływania pól elektromagnetycznych, nadal mogą być używane modele starsze, których odporność na zakłócające pole może być mniejsza niż urządzeń współcześnie implantowanych.

Nieoczekiwane zakłócenie funkcjonowania stymulatora serca lub innego implantu elektronicznego może być dużym stresem, odczuwalnym przez pracownika przebywającego w polu elektromagnetycznym. Stres taki może skutkować jego nieprzewidywalnym lub nieskoordynowanym zachowaniem, które w pewnych sytuacjach może stać się przyczyną różnorodnych zdarzeń wypadkowych, na przykład takich jak opisano przy omawianiu skutków odczucia prądów kontaktowych. Z tego powodu zalecane jest np. ograniczanie dostępu osób z wszczepionymi elektronicznymi implantami do obszarów występowania silnych pól (Tiikkaja, Hietanen, Alanko, Lindholm, 2013).

W odniesieniu do pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz – na przykład według zaleceń ACGIH osoby z elektrostymulatorami serca nie powinny przebywać w polu elektrycznym o natężeniu przekraczającym 1 kV/m i w polu

magnetycznym o natężeniu przekraczającym 80 A/m (indukcji przekraczającej 100  $\mu$ T), (ACGIH, 2013). W normach europejskich dotyczących zasad oceny narażenia na pole elektromagnetyczne o częstotliwości z pasma 0 Hz ÷ 300 GHz, odnośnie do pracowników będących użytkownikami implantów medycznych podano, że w przypadku ich narażenia przekraczającego wartości dopuszczalne dla ludności wg zaleceń Międzynarodowej Komisji ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) i nieobligatoryjnej rekomendacji europejskiej 1999/519/EC, niezbędna jest szczegółowa indywidualna ocena warunków tego narażenia i zagrożeń dla funkcjonowania konkretnego implantu – dla częstotliwości 50 Hz wymagania te są zbieżne z zaleceniami ACGIH dotyczącymi pola magnetycznego, natomiast mniej wymagające w odniesieniu do ochrony przed oddziaływaniem pola elektrycznego, dla którego limit wynosi 5 kV/m (ICNIRP, 1998; *Council of the European Union Recommendation*, 1999; EN 50527-1:2010).

## **6.3. Elektromagnetyczne zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia przy obiektach elektroenergetycznych**

### **6.3.1. Czynniki warunkujące poziom zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia**

Poziomy natężenia pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości przemysłowej w miejscach aktywności pracowników w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych uzależnione są od:

- napięcia roboczego i natężenia przepływającego w torze prądowym prądu elektrycznego (zależność proporcjonalna)
- odległości stanowisk pracy od przesyłowych przewodów fazowych (zależność odwrotnie proporcjonalna)
- konfiguracji geometrycznej poszczególnych przewodów fazowych linii elektroenergetycznej (złożona zależność)
- proporcji obciążenia prądowego poszczególnych przewodów fazowych linii elektroenergetycznej (symetria obciążenia zmniejsza natężenie pola magnetycznego w otoczeniu trójfazowych obiektów elektroenergetycznych).

Rozkład przestrzenny pola elektrycznego w sąsiedztwie elementów roboczych sieci elektroenergetycznych zależy istotnie od wielkości, rozmieszczenia i przewodności elektrycznej elementów otoczenia, takich jak: słupy przesyłowe, drzewa, kon-

strukcje przewodzące znajdujące się w sąsiedztwie przewodów pod napięciem (np. ogrodzenia, ściany budynków, balustrady).

Rozkład przestrzenny pola magnetycznego w otoczeniu przewodów sieci elektroenergetycznych, w przeciwieństwie do pola elektrycznego, nie podlega takim deformacjom.

W przypadku prądu kontaktowego o poziomie zagrożenia decyduje impedancja na drodze przepływu prądu, a więc jego natężenie jest modyfikowane przez stosowanie np. rękawic i obuwia elektroizolacyjnego. Środki ochrony indywidualnej przewidziane do ochrony pracowników przed skutkami rażenia prądem elektrycznym przy dotykaniu urządzeń pod napięciem ograniczają również zagrożenia związane z prądem kontaktowym małej częstotliwości. Ochrony takie nie są natomiast z reguły ochroną przez prądami kontaktowymi częstotliwości radiowych.

Poziomy natężenia pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwościach radiofalowych w miejscach aktywności pracowników w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych uzależnione są od:

- odległości od pobliskich anten nadawczych (zależność odwrotnie proporcjonalna)
- konfiguracji geometrycznej w stosunku do głównej wiązki promieniowania (lokalizacja bliżej głównej wiązki zwiększa poziom narażenia)
- mocy emitowanej z obiektu nadawczego (zależność proporcjonalna)
- elementów otoczenia przesłaniających lub odbijających promieniowanie emitowane z anteny, takich jak budynki, drzewa, metalowe ogrodzenia itp. (zależność złożona).

Konsekwencją zasygnalizowanej złożoności zależności poziomu pól elektromagnetycznych oddziałujących na pracowników wykonujących prace przy eksploatacji sieci elektroenergetycznych WN od parametrów obiektów elektroenergetycznych oraz zlokalizowanej w pobliżu stanowisk pracy infrastruktury są znaczne trudności w oszacowaniu parametrów narażeń. W wielu przypadkach jedynie specjalistyczne badania środowiska pracy umożliwiają ustalenie charakterystyki narażenia pracowników.

### **6.3.2. Podstawy sparametryzowanej oceny zagrożeń elektromagnetycznych**

Przy identyfikacji, badaniach i ocenie parametrów narażeń zawodowych na pola elektromagnetyczne przy obsłudze sieci elektroenergetycznych zastosowanie mają zarówno techniki pomiarowe, symulacje komputerowe, jak i analiza parametrów technicznych obiektów lub instalacji emitujących pola elektromagnetyczne. W pewnych przypadkach można wykorzystać techniki kombinowane celem redukcji złożoności i kosztów oceny narażeń, jednakże takie podejście nie jest uniwersalne. Nie

zawsze można zastąpić badania środowiskowe innymi metodami oceny zagrożeń zawodowych.

Wobec zaprezentowanej wcześniej charakterystyki bezpośredniego i pośredniego oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka, podstawą badania zawodowych zagrożeń elektromagnetycznych w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych i oceny poziomu narażenia pracowników są przede wszystkim ustalone różnymi technikami:

- natężenia pola elektrycznego oddziałującego na pracowników,  $E$ , wyrażone w woltach na metr (V/m)
- natężenia pola magnetycznego oddziałującego na pracowników,  $H$ , wyrażone w amperach na metr (A/m)
- natężenia prądu kontaktowego, przepływającego w kończynach pracowników,  $I_C$ , wyrażone w miliamperach (mA).

Natężenie pola elektrycznego i natężenie pola magnetycznego, oceniane na stanowisku pracownika, są nazywane miarami zewnętrznymi ekspozycji na pola elektromagnetyczne lub poziomami narażenia. Zarówno w zaleceniach międzynarodowych, jak i przepisach prawa pracy w Polsce są podane dotyczące ich wartości dopuszczalnego narażenia pracowników (NDN – „najwyższe dopuszczalne narażenie” w przepisach polskich i IPN – „interwencyjny poziom narażenia” w dyrektywie europejskiej 2013/35/UE). Natomiast prąd kontaktowy jest parametrem narażenia charakteryzującym pośrednie skutki ekspozycji na pola elektromagnetyczne w środowisku pracy. Ponadto do oceny skutków ekspozycji na pola elektromagnetyczne wykorzystywane są limity miar wewnętrznych narażenia (GPO – „graniczny poziom oddziaływania” w dyrektywie europejskiej 2013/35/UE), dotyczące indukowanych w organizmie pól elektrycznych i pochłoniętej w tkankach energii pola. Limity dotyczące miar wewnętrznych i prądu kontaktowego są obecnie podane jedynie w zaleceniach międzynarodowych.

### 6.3.2.1. Pomiary miar zewnętrznych ekspozycji (poziomów narażenia)

#### Pola elektromagnetyczne częstotliwości przemysłowej

W Polsce dystrybucja energii elektrycznej liniami elektroenergetycznymi WN odbywa się z wykorzystaniem prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz i natężeniu kilkuset amperów, przy różnych napięciach roboczych: 110, 220 lub 400 kV. W otoczeniu pracującej linii WN występują z tego powodu pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz, z przeważającą składową elektryczną (czyli tzw. pola dużej impedancji), oddziałujące na przebywających w pobli-



żu pracowników i ludność, a także na znajdujące się w pobliżu urządzenia. W związku z tym, że są to pola, dla których długość fali wynosi 6 tys. km, ocena narażenia na pola w otoczeniu linii WN odbywa się w obszarze tzw. pola bliskiego. Składowe elektryczna i magnetyczna pola elektromagnetycznego w strefie bliskiej nie są jednoznacznie powiązane między sobą, natomiast zależą od stosunku napięć i prądów występujących w źródle pola. Ocena ekspozycji w polu bliskim wymaga niezależnego pomiaru natężenia pierwotnego pola magnetycznego i natężenia pierwotnego pola elektrycznego (tj. pola niezakłóconego obecnością ludzi w obszarze pomiarowym).

### **Pole elektromagnetyczne radiofalowe**

W otoczeniu elektroenergetycznych linii WN występuje również promieniowanie radiofalowe, wytwarzane przez nadajniki wykorzystywane do komunikacji bezprzewodowej. Pomiar promieniowania radiofalowego mogą dotyczyć zarówno oceny narażenia ludności zamieszkującej w pobliżu, jak i pracowników wykonujących czynności zawodowe związane z eksploatacją linii WN lub w miejscach pracy znajdujących się w sąsiedztwie nadajników. Wspomniane anteny nadawcze wytwarzają najczęściej radiofalowe promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu ok. 0,1 ÷ 5 GHz.

Dla promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwościach przekraczających 100 MHz (tj. 0,1 GHz) długość fali jest mniejsza od 3 m i zwykle można przyjąć, że w odległości przekraczającej 10 m od anten występuje promieniowanie strefy dalekiej, które charakteryzuje się stosunkiem wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego do wartości skutecznej natężenia pola magnetycznego wynoszącym ok. 377 omów (tzw. impedancja falowa wolnej przestrzeni,  $Z_0$ ). W związku z tym, oceniając poziom narażenia ludności, można ograniczyć badania do pomiaru pola elektrycznego (pole magnetyczne jest jednoznacznie określone z zależności:  $H = E/Z_0$ ). Postępowanie takie sankcjonują wymagania ministra środowiska dotyczące oceny narażenia ludności, w których ustalono limit narażenia jedynie dla pól elektrycznych radiofalowych ( $E = 7$  V/m) w paśmie częstotliwości (3 MHz ÷ 300 GHz). Odmienne zasady obowiązują przy ocenie narażenia pracowników – ponieważ mogą oni wykonywać czynności zawodowe zarówno w odległości dziesiątków metrów od anten, jak i w ich pobliżu, gdzie występuje promieniowanie strefy bliskiej – ocena narażenia dotyczy obu składowych pola ( $E$  i  $H$ ) w paśmie częstotliwości do 3 GHz. Oszacowanie pola magnetycznego na podstawie pomiarów pola elektrycznego, lub odwrotnie, dopuszczalne jest jedynie po uprzednim wykazaniu, że w ocenianym miejscu występuje promieniowanie strefy dalekiej (PN-T-06580-3:2002, pkt 2.1.4.1).

## Metrologia pola elektrycznego i magnetycznego

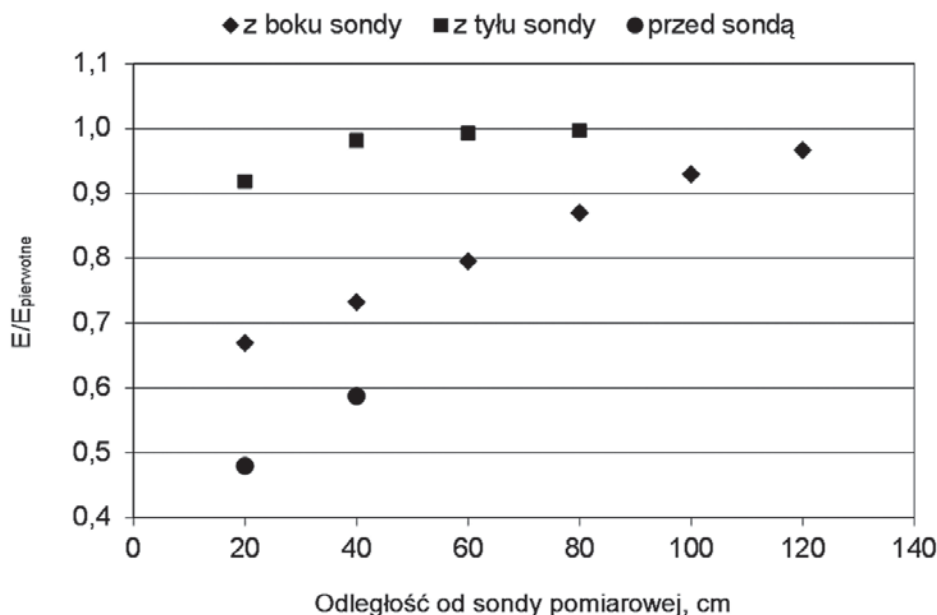
Metrologia pól elektromagnetycznych na stanowisku pracy oraz interpretacja wyników pozwalająca na poprawną ocenę higieniczną warunków pracy jest zagadnieniem złożonym. Do specyficznych właściwości pól elektromagnetycznych należy to, że proces pomiarowy oddziałuje na rozkład pola elektromagnetycznego w obszarze pomiarowym, a także to, że brak bezpośrednich metod pomiaru pola elektromagnetycznego – pomiary natężeń pól elektrycznych i magnetycznych faktycznie polegają na pomiarze siły elektromotorycznej zaindukowanej w czujnikach pomiarowych, najczęściej dipolowych lub ramowych. Ocena ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne wymaga, wobec przytoczonych właściwości pól oddziałujących na pracowników, techniki pomiarowej umożliwiającej niezależny pomiar natężenia pola magnetycznego ( $H$ ) i natężenia pola elektrycznego ( $E$ ). Dla uzyskania powtarzalności wyników badań do oceny oddziaływania pól elektromagnetycznych na ludzi mierzone jest tzw. pole pierwotne, czyli pole niezakłócone obecnością ludzi lub obiektami przewodzącymi, które nie są stałymi elementami środowiska (PN-T-06580:2002; Dyrektywa 2013/35/UE). Badania takie prowadzi się według metodyki określonej w odpowiednich przepisach, zaleceniach lub normach. Szczególnie ważnym elementem procesu pomiarowego jest aparatura stosowana w badaniach terenowych – jej właściwości metrologiczne decydują o miarodajności badań środowiska pracy.

Obsługa współcześnie stosowanych elektronicznych przyrządów pomiarowych jest pozornie łatwa. Mierniki realizują wiele funkcji, które w przeszłości musiała przeprowadzić osoba wykonująca pomiary (np. bezpośrednie wskazania wielkości mierzonego parametru, równoczesne pomiary składowych wielkości wektorowych w 3 ortogonalnych kierunkach, przeliczanie kompatybilnych wielkości charakteryzujących mierzone pole, archiwizowanie wyników w wewnętrznej pamięci). Jednak, pomimo rozwoju technicznego, nadal lekceważenie podstawowych zasad wykonywania pomiarów, wypracowanych w celu ograniczania niepewności wyników (wynikających m.in. z właściwości metrologicznych przyrządów pomiarowych i ich oddziaływania z mierzonym polem elektromagnetycznym), może prowadzić do nawet wielokrotnego zawyżenia lub zaniżenia wyniku i oceny analizowanych zagrożeń dalece odbiegającej od stanu faktycznego. Dodatkowym elementem zwiększającym niepewność oceny może być także niewłaściwa identyfikacja właściwości mierzonego pola elektromagnetycznego i błędny wybór wielkości charakteryzujących pole oraz kryteriów ich oceny.

Metodyka prowadzenia badań pola elektromagnetycznego określona jest w Polskiej Normie PN-T-06580:2002. Do oceny narażenia pracowników przyjmuje się

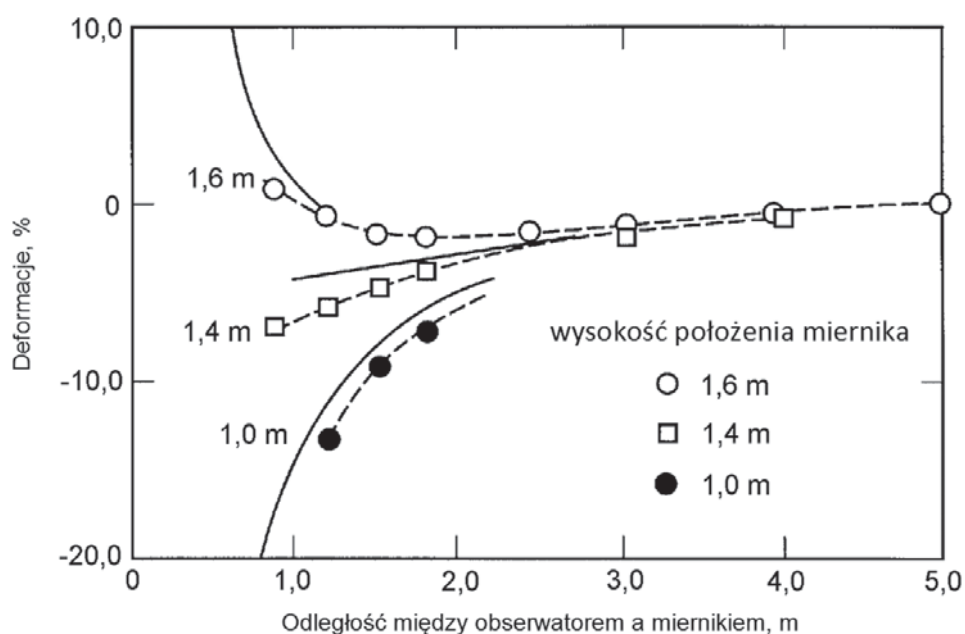
wartości zmierzone w określonych punktach pomiarowych, w pionie pokrywającym się z osią tułowia pracownika.

W przypadku pomiarów pola elektrycznego małej częstotliwości zarówno pracownik, którego narażenie podlega ocenie, jak i osoba wykonująca pomiary, wpływają istotnie na rozkład pola elektrycznego. Na skutek większej przewodności ciała człowieka w stosunku do powietrza następuje zagęszczenie linii sił pola elektrycznego w otoczeniu człowieka. Zależnie od konfiguracji geometrycznej „człowiek – miernik – źródło pola”, w miejscu umieszczenia miernika pola zjawisko to może wywołać zwiększenie lub zmniejszenie pierwotnego natężenia pola. Zaburzający wpływ osoby mierzącej na rozkład przestrzenny pola elektrycznego ilustruje rysunek 6-6. Przedstawia on wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz mierzonego w obecności człowieka przy sondzie pomiarowej, unormowane w stosunku do wyników pomiarów pola pierwotnego. Do badań eksperymentalnych wykorzystano pole elektryczne wytwarzane w pionowym kondensatorze powietrznym (źródło pola elektrycznego o wymiarach 125×125×62,5 cm, wykorzystywanym do wzorcowania aparatury pomiarowej w akredytowanym laboratorium CIOP-PIB – certyfikat PCA nr AP 061), mierzone na wysokości 150 cm i w odległości 1 m od źródła pola za pomocą sondy pojemnościowej, odseparowanej od monitora za pomocą światłowodu. Osoba zakłócająca wyniki pomiarów przebywała z boku lub z tyłu sondy, albo między sondą a źródłem pola, powodując znaczne różnice wskazań przyrządu pomiarowego.



**Rys. 6-6.** Wyniki badań wpływu obecności człowieka na wynik pomiaru natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w zależności od miejsca przebywania w otoczeniu sondy pomiarowej

Także w rzeczywistych warunkach oceny narażenia pracowników energetyki w pobliżu linii elektroenergetycznych WN występują podobne zakłócenia rozkładu pola elektrycznego pierwotnego wskutek obecności ludzi. Na rysunku 6-7 przedstawiono dane literaturowe dotyczące takiej zależności. W związku z inną polaryzacją pola niż we wcześniej omówionych badaniach laboratoryjnych, zaobserwowano inne poziomy zakłóceń. Zaprezentowane przykłady wskazują, że zmiany natężenia pola elektrycznego małej częstotliwości, wynikające z obecności pracownika lub osoby wykonującej pomiary w pobliżu sondy pomiarowej i ich wpływu na wynik pomiaru, są niemożliwe do oszacowania i skorygowania przez wprowadzenie odpowiednich współczynników korekcyjnych przy interpretacji wyników pomiarów (mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne). Dlatego też dla jednoznaczności wyników badań dotyczących narażenia pracowników na pola elektryczne należy ściśle przestrzegać sformalizowanych (m.in. w normach pomiarowych) zasad wykonywania badań pola, aby uzyskać wyniki pomiarów odpowiadające natężeniu pola niezakłóconego obecnością człowieka, tzw. pola pierwotnego.



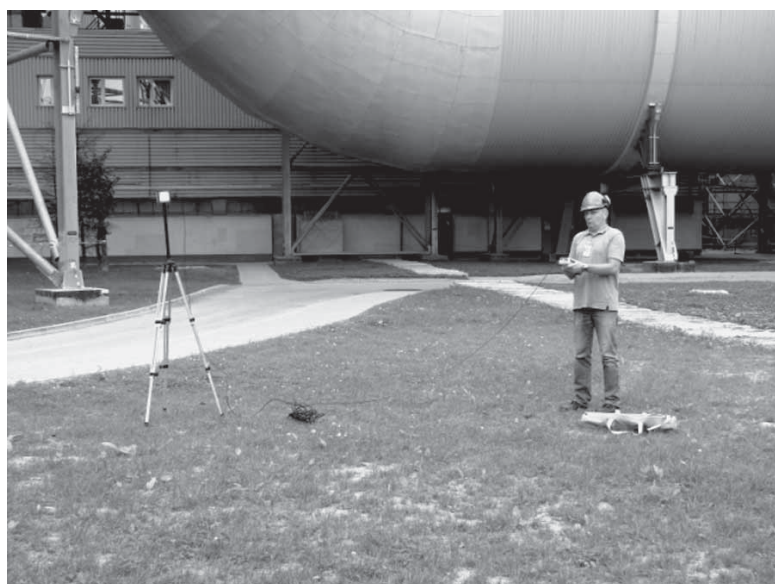
**Rys. 6-7.** Deformacje pola elektrycznego spowodowane przez uziemionego obserwatora o wzroście 1,8 m; odległość między obserwatorem a sondą pomiarową oraz wysokość położenia sondy ponad ziemią. Linie ciągłe – wartości obliczone, linie przerywane ze znacznikami – wartości zmierzone pod linią 500 kV (PN-IEC 833; IEC 61786-2)

W celu minimalizacji oddziaływania osoby mierzącej na wynik pomiaru zaleca się, aby sonda pomiarowa lub cały miernik (w przypadku konstrukcji zintegrowanej) były odsunięte od osoby wykonującej pomiary na odległość co najmniej 1,8 m. Aby spełnić to wymaganie, konieczne jest używanie jedynie specjalistycz-



nych mierników, które nie tylko mają odpowiednio szeroki zakres pomiarowy (do co najmniej 20 kV/m), ale również wyposażone są w sondy pomiarowe pola elektrycznego odseparowane na odpowiednią odległość od trzymanego przez osobę wykonującą pomiar monitora (zalecana jest separacja z połączeniem światłowodowym, które zapewnia odpowiednio dużą impedancję łącza, aby proces pomiaru nie zakłócał rozkładu pierwotnego pola elektrycznego – rys. 6-8a). Alternatywnym rozwiązaniem mogą być mierniki o konstrukcji zintegrowanej z sondami pomiarowymi, które umieszcza się na drążku izolacyjnym separującym ten układ pomiarowy od osoby wykonującej obserwację wskazań na monitorze (rys. 6-8b). Jednakże zapewnienie odpowiednio dużej impedancji takiego drążka dystansowego oraz wskaźnika miernika umożliwiającego odczyt wskazań z odległości ponad 2 m jest w praktyce trudne. Ponadto ze względu na dużą odległość od tułowia, w jakiej miernik jest utrzymywany na drążku, obciążenie mięśniowo-szkieletowe osoby wykonującej badania znacznie wzrasta, dlatego ten sposób wykonywania badań można uznać za nieergonomiczny.

a)



b)



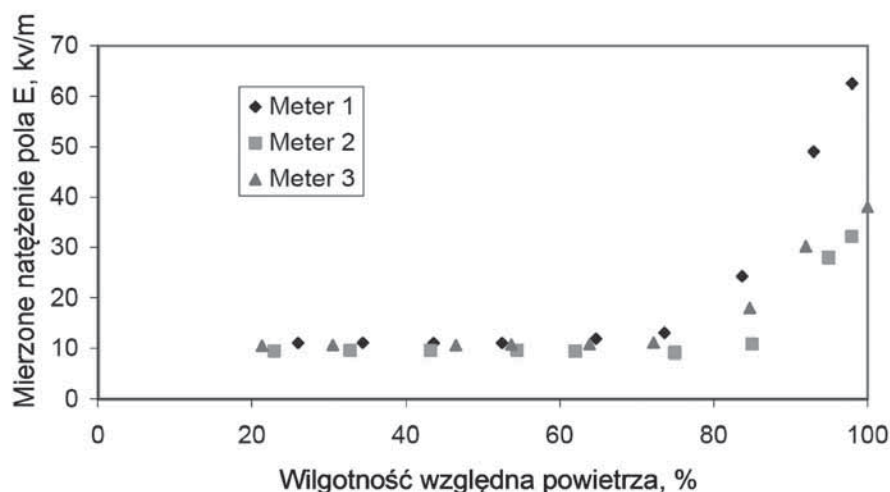
**Rys. 6-8.** Separacja sondy pomiarowej od osoby mierzącej pole elektryczne małej częstotliwości. a) sonda umieszczona na statywie i połączona z miernikiem światłowodem; b) sonda z miernikiem umieszczona na drążku izolacyjnym (fot. autorzy)

Tego rodzaju obostrzenia nie dotyczą pomiarów pola magnetycznego małej częstotliwości, które nie jest deformowane przez ciało człowieka.

Również warunki środowiskowe mogą istotnie zmodyfikować wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego. Pod wpływem wilgoci zawartej w powietrzu atmosferycznym impedancja drążków separujących miernik od osoby wykonującej



pomiary lub dielektrycznego statywu, na którym ustawiony jest miernik (lub sonda pomiarowa), może znacznie się zmniejszyć. Ponadto przy podwyższonej wilgotności względnej powietrza właściwości izolacyjne elementów miernika pogarszają się, co również może prowadzić do błędów pomiarowych (rys. 6-9). Dlatego też zaleca się, aby w czasie wykonywania pomiarów względna wilgotność powietrza nie przekraczała 75% (np. *Rozporządzenie Ministra Środowiska...*, 2003).



**Rys. 6-9.** Wpływ wilgotności względnej powietrza na wynik pomiaru natężenia pola elektrycznego małej częstotliwości (pomiar 3 miernikami różnej konstrukcji wykonane w polu elektrycznym o natężeniu 10 kV/m) (IEC 61786-1)

Na rozkład pola elektrycznego małej częstotliwości w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych wpływają także elementy metalowe oraz roślinność (np. drzewa). Dlatego też rzeczywisty rozkład pola elektrycznego w otoczeniu urządzeń może się znacznie różnić od oszacowanego na podstawie zależności teoretycznych, np. symulacji komputerowych.

Problemy techniczne mogą być związane również z pomiarami natężenia pola elektrycznego i magnetycznego częstotliwości radiowych na stanowiskach pracy w pobliżu linii elektroenergetycznych WN. Podobnie jak przy pomiarach pola małej częstotliwości celem badań jest ocena pola pierwotnego. W tym wypadku zakłócenia powodowane obecnością człowieka są nieco mniejsze, niż w polu elektrycznym małych częstotliwości. Jednakże również konieczne jest zachowanie dystansu między osobą wykonującą pomiary i sondą pomiarową – dane literaturowe wskazują, że odległość 1 m jest wystarczająca do uniknięcia zakłóceń procesu pomiarowego. Przy pomiarze pola magnetycznego nie jest to konieczne.

W związku z zaprezentowaną w rozdziałach 6.1 i 6.3.3 charakterystyką pól elektromagnetycznych, jakie mogą występować w otoczeniu elektroenergetycznych linii przesyłowych WN, w ich pobliżu może zachodzić konieczność zmierzenia

zarówno radiofalego pola elektrycznego, jak i pola magnetycznego. W miejscu pomiarów usytuowanym pod lub w otoczeniu linii elektroenergetycznych WN w miejscach przebywania ludzi na poziomie ziemi (tj. na wysokości 2 m nad ziemią) może występować pole elektryczne o częstotliwości 50 Hz i natężeniu z zakresu  $1 \div 10$  kV/m, a na dachach budynków, balkonach, rusztowaniach lub na słupach wsporczych linii – nawet znacznie silniejsze.

Ze względu na to, że w otoczeniu linii elektroenergetycznych mogą występować silne pola elektromagnetyczne częstotliwości przemysłowej, istotnym czynnikiem zakłócającym pomiary pól radiofalego w takich miejscach może być wrażliwość mierników natężenia radiofalego pola elektrycznego lub magnetycznego na oddziaływanie pól 50 Hz. Do oceny istotności tego czynnika przeprowadzono badania laboratoryjne czułości poza pasmem pomiarowym mierników elektromagnetycznego promieniowania radiofalego na sinusoidalnie zmienne pole elektryczne o częstotliwości przemysłowej 50 Hz i natężeniu z zakresu  $5 \div 30$  kV/m. Badania w laboratorium CIOP-PIB wykonano z użyciem wspomnianego laboratoryjnego źródła pola elektrycznego. Zbadano czułość różnych analogowych i cyfrowych mierników radiofalego pola elektromagnetycznego, z izotropowymi sondami o różnych zakresach częstotliwości z pasma od 3 kHz do 38 GHz. Czułość na pole elektryczne 50 Hz zbadanych mierników jest zróżnicowana. Zbadane mierniki pola elektrycznego charakteryzuje czułość z przedziału  $KE = 0,08 \div 2,4$  (V/m)/(kV/m), a mierników pola magnetycznego  $KH = 0,0002 \div 0,02$  (A/m)/(kV/m), (Gryz, Karpowicz, 2013).

Badania wykazały, że przy zaobserwowanej czułości KE i KH mierników promieniowania radiofalego na pole elektryczne 50 Hz, oddziaływanie to może spowodować nieuprawnione zidentyfikowanie radiofalego pól elektrycznych o natężeniach przekraczających dopuszczalne dla narażenia ludności w otoczeniu elektroenergetycznych linii WN i nieprawidłowe zidentyfikowanie występowania tam pól radiofalego, w których konieczne jest wdrożenie działań profilaktycznych celem ochrony pracowników przed oddziaływaniem pól radiofalego – czyli możliwe jest absolutnie nieuprawnione zidentyfikowanie narażeń zawodowych, które w rzeczywistości nie istnieją, a wskazania przyrządów są jedynie artefaktami wynikającymi z oddziaływań środowiskowych na układ pomiarowy.

Z tego powodu w przypadku oceny narażenia na radiofalego promieniowanie elektromagnetyczne w otoczeniu linii elektroenergetycznych WN lub innych źródeł silnego pola elektrycznego małych częstotliwości, w tym przemysłowej 50 Hz, konieczne jest wykorzystywanie jedynie takich przyrządów pomiarowych, dla których ustalono czułość poza pasmem pomiarowym na takie pola elektryczne (tj. czułość mierników przeznaczonych do pomiarów pól radiofalego na oddziaływanie pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz). Czułość poza pasmem pomiarowym

powinna być na tyle mała, aby oddziaływanie pola elektrycznego o częstotliwości przemysłowej nie wpłynęło istotnie na wynik oceny pól radiofalowych. Przy analizie wyników pomiarów pól radiofalowych w pobliżu źródeł pól elektrycznych małych częstotliwości, np. w otoczeniu linii elektroenergetycznych WN, konieczne jest więc również rozpoznanie poziomu pola elektrycznego małej częstotliwości, zakłócającego w takiej sytuacji pomiar pola radiofalowego i oszacowanie istotności tych zakłóceń na podstawie czułości miernika poza pasmem pomiarowym.

### 6.3.2.2. Pomiary pośrednich skutków ekspozycji

Prąd kontaktowy przepływający między ciałem pracownika a dotykanym przez niego elementem metalowym mierzony może być w celu oceny możliwości wystąpienia zagrożeń związanych ze stymulacją układu nerwowego. Brak jest znormalizowanej metody pomiarowej do oceny tego parametru charakteryzującego skutki oddziaływania pól elektromagnetycznych na pracowników i infrastrukturę techniczną środowiska pracy.

Najczęściej badania w celu oceny prądu kontaktowego dotyczą bezpośredniego pomiaru prądu przepływającego między dłonią człowieka, stojącego na izolowanej elektrycznie powierzchni, a uziemionym elektrycznie przewodzącym obiektem. Badania tego typu mogą stanowić element oceny zagrożeń elektromagnetycznych na rzeczywistych stanowiskach pracy.

W badaniach naukowych, wykorzystując specjalnie skonstruowane układy pomiarowe, można również przeprowadzić pomiary umożliwiające określenie prądów kontaktowych przepływających przy dotknięciu do różnych części ciała pracownika (Korpinen, Elovaara, Kuisti, 2009). Ze względów bezpieczeństwa pracowników, pożądane jest wyeliminowanie konieczności włączenia ciała pracownika w tor pomiaru prądu kontaktowego. Aby to osiągnąć, konieczne byłoby stosowanie w badaniach prądów kontaktowych fantomów odwzorowujących impedancje występujące na drodze przepływu tego prądu, tj.: impedancję kontaktu ciała człowieka z dotykanym elementem, impedancję skóry i wnętrza ciała na drodze przepływu prądu, impedancję obuwia (Gryz, Karpowicz, 2008). Obecnie tego typu fantomy nie są dostępne komercyjnie.

Na podstawie analiz wyników pomiarów prądu kontaktowego przeprowadzonych w rozdzielniach elektroenergetycznych w Finlandii ustalono przybliżoną zależność, która może być wykorzystywana do szacowania natężenia prądu kontaktowego w zależności od natężenia pola elektrycznego oddziałującego na pracownika:  $I (\mu\text{A}) = 5,26 \cdot E (\text{kV/m})$  (Korpinen, Elovaara, Kuisti, 2011). Nie ma obecnie danych literaturowych wskazujących, czy zależność ta może mieć zastosowanie również w obiektach elektroenergetycznych o innych cechach konstrukcyjnych, np. typowych dla Polski.

### 6.3.2.3. Wykorzystanie technik komputerowych do oceny poziomów narażenia i oddziaływania

Oprócz pomiarów, do wyznaczania i analizowania parametrów charakteryzujących narażenie pracowników na pola elektromagnetyczne można zastosować metody numeryczne. Symulacje numeryczne dotyczą zarówno obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu źródeł i w miejscach przebywania pracowników (poziomów narażenia), jak również bezpośrednich skutków oddziaływania pola na człowieka (poziomów oddziaływania). Na drodze symulacji numerycznych można wyznaczyć poziom i rozkład w organizmie zarówno pola elektrycznego indukowanego wewnątrz organizmu (pole  $E_{ind}$ , które zgodnie z prawem Ohma wywołuje w tkankach przepływ prądów o gęstości  $J_{ind}$ , która jest funkcją przewodności tkanki  $\sigma$  i częstotliwości  $f$  pola), jak i zaabsorbowaną w tkankach energię pola radiofaleowego, charakteryzowaną poprzez tzw. współczynnik SAR (ang. *Specific Absorption Rate*). Obliczenia mogą dotyczyć również prądu kontaktowego. Limity odnoszące się do obu parametrów charakteryzujących poziom skutków narażenia pracownika na pola elektromagnetyczne (skutków oddziaływania) są podane w zaleceniach międzynarodowych.

Konfrontacja wyników pomiarów rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu źródła pola bądź pomiarów prądu kontaktowego, może być wykorzystana do walidacji modeli numerycznych stosowanych do oceny zagrożeń elektromagnetycznych w modelach reprezentujących warunki takie, jak w miejscach, gdzie wykonano wspomniane pomiary.

Ze względu na wirowy charakter prądów indukowanych przez pole magnetyczne nie są dostępne techniki pomiarowe do ich oceny w organizmie człowieka, dlatego też obliczenia numeryczne są jedyną metodą oceny tego zjawiska i związanego z nim zagrożenia dla pracowników przebywających w polach magnetycznych.

W symulacjach numerycznych dotyczących oceny zagrożeń elektromagnetycznych stosowane są obliczenia z różnorodnymi fantomami numerycznymi, tj. modelami o wymiarach i przewodności elektrycznej reprezentujących organizm człowieka, oraz z modelami obiektów materialnych o kształtach, wymiarach i impedancji, które umożliwiają odzwierciedlenie rozkładu prądu w obwodach reprezentujących źródło pola magnetycznego lub elektrycznego w środowisku pracy (ICNIRP, 2010; PN-EN 50413:2009; PN-EN 50505:2008).

W badaniach analitycznych można wykorzystać jedynie bardzo uproszczone modele, np. dwuwymiarowy model jednorodnej elipsy bądź trójwymiarowy model walcowy lub elipsoidalny (ICNIRP, 1998; Reilly, 1998). Techniki symulacji numerycznych umożliwiają badania zagrożeń elektromagnetycznych z modelami o różnej złożoności i rozdzielczości przestrzennej – bryłowymi lub reprezentu-

jącymi budowę anatomiczną ciała, z uwzględnieniem nawet kilkudziesięciu różnych struktur tkankowych wewnątrz organizmu (Dimbyłow, 2005; ICNIRP, 2010; PN-EN 50413:2009; PN-EN 50505:2008).

### 6.3.3. Poziomy zagrożenie elektromagnetycznych charakterystyczne dla polskich warunków

Przesyłowe linie elektroenergetyczne WN są projektowane i budowane tak, aby spełnić wymagania przepisów dotyczących ich oddziaływania na środowisko. Natężenie pola elektrycznego o częstotliwości przemysłowej 50 Hz w miejscach dostępnych dla ludności nie może przekraczać 10 kV/m, a natężenie pola magnetycznego – 60 A/m (indukcja magnetyczna 75  $\mu$ T), przy dodatkowym obostrzeniu dotyczącym terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową, gdzie natężenie pola elektrycznego nie może przekraczać 1 kV/m (*Rozporządzenie Ministra Środowiska...*, 2003). W *Rozporządzeniu* określono również dopuszczalny poziom radiofalego pola elektrycznego w miejscach dostępnych dla ludności – na poziomie 7 V/m. Oddziaływanie obiektów radionadawczych na środowisko powinno być zgodne z tymi wymaganiami. W odniesieniu do pracowników wykonujących prace w otoczeniu źródeł pól elektromagnetycznych dopuszczalne są silniejsze narażenia, pod warunkiem spełnienia określonych wymagań prawa pracy, dotyczących tzw. ekspozycji zawodowej.

Wspomniane wymagania ochrony środowiska determinują poziom pola elektromagnetycznego, jaki może wystąpić na stanowiskach pracy w otoczeniu linii elektroenergetycznych, które są zlokalizowane na poziomie ziemi, czyli w miejscach dostępnych dla ludności. Jeżeli zadania wykonywane przez pracowników obsługujących sieci elektroenergetyczne odbywają się w takich miejscach bądź w otoczeniu linii elektroenergetycznej odłączonej od zasilania (bez zbliżania się do czynnych obiektów radionadawczych) – to nie są one zaliczane do narażeń zawodowych, ponieważ poziom ekspozycji nie przekracza dopuszczalnego dla ludności.

Problem oceny poziomu narażeń zawodowych występuje jedynie, jeśli prace przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN wykonywane są w miejscach zlokalizowanych bliżej obiektów elektroenergetycznych pod napięciem i/lub obciążonych prądowo, niż miejsca dostępne dla ludności (np. na podnośnikach, słupach wsporczych, rusztowaniach) lub w wydzielonych miejscach niedostępnych dla ludności (np. na terenie rozdzielni elektroenergetycznych WN zamkniętych i ogrodzonych) gdzie mogą występować pola elektromagnetyczne o większych natężeniach niż dopuszczalne w miejscach dostępnych dla ludności. Również w pobliżu czynnych obiektów radionadawczych (np. anten stacji bazowych telefonii komórkowej) mogą



lokalnie występować radiofalowe pola elektromagnetyczne o natężeniach przekraczających dopuszczalne dla ludności.

Takie stanowiska pracy (stałej lub czasowej) wymagają oceny poziomu narażenia, i w razie stwierdzenia, że przekracza on poziom pól elektromagnetycznych dopuszczalnych dla ludności, dostosowania warunków wykonywania pracy do wymagań prawa pracy.

#### **6.4. Przykładowe profile narażenia pracowników na pola elektryczne i magnetyczne**

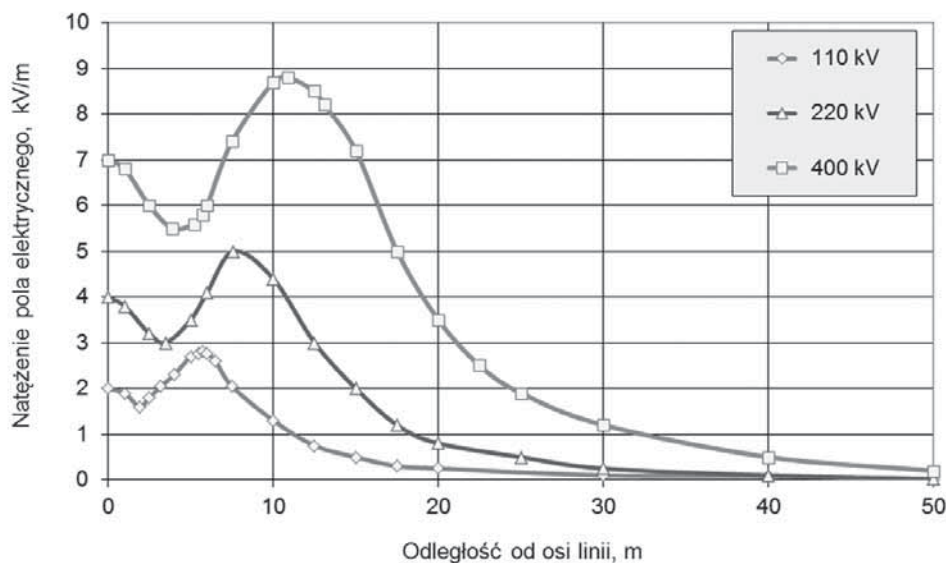
Linie elektroenergetyczne WN 110, 220 lub 400 kV, są źródłami pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz, z przeważającą składową elektryczną (czyli tzw. pola dużej impedancji), oddziałującego na przebywających w pobliżu pracowników i ludność, a także na znajdujące się w pobliżu urządzenia. Oprócz elektroenergetycznych urządzeń przesyłowo-rozdzielczych, również instalacje i kable elektryczne w budynkach i elektryczny sprzęt powszechnego użytku, zlokalizowane we wszystkich mieszkaniach i w biurach, są źródłami pola elektromagnetycznego częstotliwości przemysłowej 50 Hz.

Elektroenergetyczne sieci przesyłowe WN o określonym napięciu przesyłowym są projektowane i prowadzone w terenie z wykorzystaniem znormalizowanych konstrukcji wsporczych (słupów), które decydują o układzie geometrycznym przewodów fazowych. W takim przypadku natężenie pola elektrycznego pod linią i w jej sąsiedztwie na powierzchni ziemi zależy jedynie od odległości przewodów fazowych od ziemi, natomiast natężenie pola magnetycznego także od obciążenia prądowego przewodów (maksymalnie do ok. 2,8 kA, w zależności od rodzaju linii) – im odległość mniejsza, tym poziom obu pól większy. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występują w środku między słupami wsporczymi, przy największym zwisie przewodów fazowych (np. przy wysokich temperaturach w porze letniej).

Przykładowe rozkłady natężenia pola  $E$  pod liniami 110, 220 i 400 kV przedstawiono na rysunku 6-10.

Według danych literaturowych największe natężenia pola elektrycznego i magnetycznego mogą występować pod jednotorową linią 400 kV i na wysokości 2 m nad ziemią – nie przekroczą one, odpowiednio, 9 kV/m i 60 A/m (Jaworski

i Wróblewski, 2008). W przypadku linii wielotorowych wartości maksymalne obu rodzajów pól są mniejsze niż dla linii jednotorowych.



**Rys. 6-10.** Typowy rozkład natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii WN o napięciach 110, 220 i 400 kV, na wysokości 2 m nad ziemią (za: Różycki, 2011)

Bezpośrednio przy przewodach linii elektroenergetycznych WN pole elektryczne jest na tyle silne, że mogą tam przebywać jedynie pracownicy (*Rozporządzenie Ministra Pracy...*, 2002). Przekraczają one poziom pól zdefiniowanych w przepisach ochrony środowiska dla miejsc dostępnych dla ludności (*Rozporządzenie Ministra Środowiska...*, 2003). W związku z tym od wielu lat wykonywane są oceny i pomiary rozkładów przestrzennych pola elektrycznego i magnetycznego, zarówno ze względu na analizę spełnienia kryteriów dotyczących ochrony ludności, jak i ochrony pracowników.

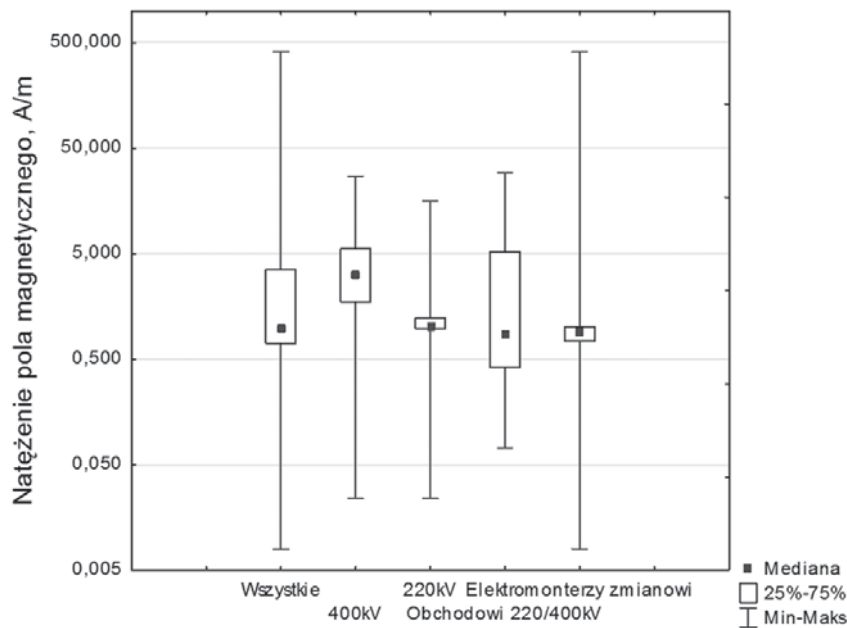
W rozdzielniach napowietrznych 110, 220 i 400 kV, w miejscach przebywania pracowników, możliwe jest narażenie na pole elektryczne przekraczające poziom dopuszczalny dla narażenia ludności, o natężeniach do 20 kV/m. W rozdzielniach 6, 15 i 30 kV, lokalizowanych najczęściej wewnątrz budynków, w miejscach możliwego przebywania pracowników pole elektryczne nie przekracza dopuszczalnego w miejscach dostępnych dla ludności. W nowoczesnych rozdzielniach elektroenergetycznych (gdzie stosowane są zamknięte kompaktowe celki rozdzielcze średniego, a nawet wysokiego, napięcia, skonstruowane z zabudowanych układów szynowych wysokich napięć wypełnionych izolatorem gazowym – sześciofluorkiem siarki) natężenie pola elektrycznego nie odbiega od poziomu występującego w środowisku mieszkalnym czy biurowym.

Wynik badań własnych autorów oraz dostępne dane literaturowe wskazują, że pole elektryczne i magnetyczne o częstotliwości przemysłowej 50 Hz, występujące poza terenem napowietrznych rozdzielni elektroenergetycznych oraz w sąsiedztwie przesyłowych sieci elektroenergetycznych WN, nie przekraczają poziomów dopuszczalnych dla środowiska, tzn. 10 kV/m i 60 A/m.

Jak już wspomniano, wielkości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego 50 Hz w rozdzielniach elektroenergetycznych zależą nie tylko od napięcia i obciążenia układów przesyłowych, ale także od konfiguracji geometrycznej urządzeń i sposobu oszynowania. Wyniki badań własnych autorów, dotyczących rozkładów pola elektromagnetycznego 50 Hz w rozdzielniach elektroenergetycznych 6, 15, 30, 110, 220 i 400 kV napowietrznych i w budynkach wskazują, że w miejscach możliwego wykonywania typowych czynności zawodowych, np. przy kontroli poprawności pracy urządzeń elektroenergetycznych i obchodach w sąsiedztwie urządzeń elektroenergetycznych oraz dokonywaniu niezbędnych napraw i konserwacji przy wyłączonym zasilaniu urządzeń poddawanych naprawom (a przy pracujących urządzeniach sąsiednich) możliwa jest ekspozycja na pole magnetyczne jedynie kilkakrotnie przekraczające poziom dopuszczalny dla ludności. Jedynie przy maksymalnych obciążeniach, lokalnie przy osłoniętych ekranami pola elektrycznego obiektach, np. pod mostami szynowymi, mogą wystąpić znacznie silniejsze pola magnetyczne, które należy oceniać z wykorzystaniem szczegółowych wymagań dotyczących narażenia pracowników.

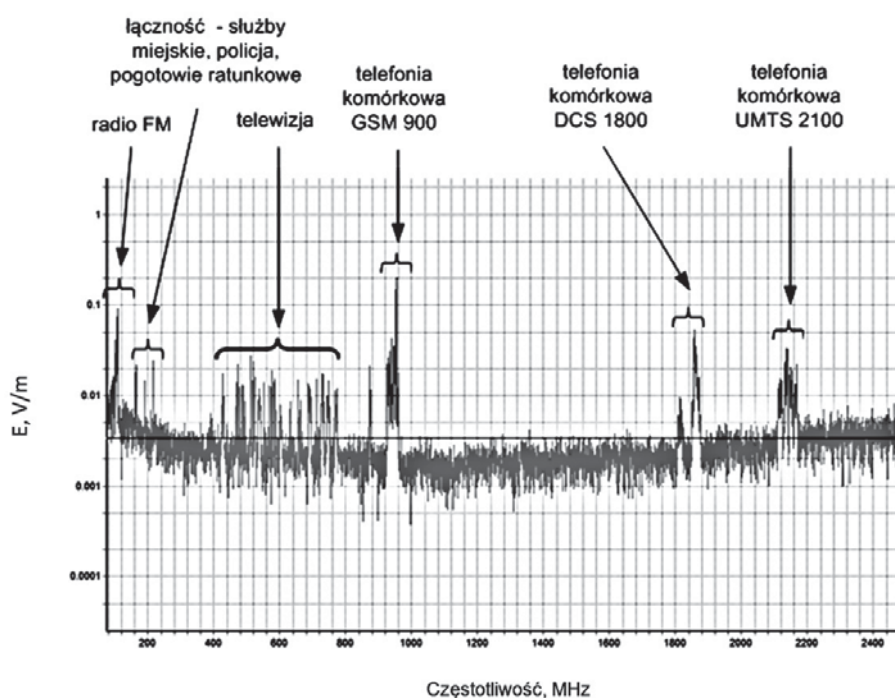
Występujące w rozdzielniach najsilniejsze narażenie pracowników na pola magnetyczne, o natężeniach do ok. 200 A/m, jest krótkotrwałe. Największe poziomy pola magnetycznego i narażenie pracowników mogą mieć miejsce przy torach silnoprządowych lub przy pojedynczych kablach, odsuniętych od innych torów prądowych. Stosunkowo słabe pola magnetyczne, pomimo dużych natężeń prądów, występują przy wiązkach kabli (lub izolowanych kablach trójfazowych, wielożyłowych), ponieważ pole magnetyczne w takim przypadku jest zredukowane wskutek wzajemnej kompensacji pola magnetycznego pochodzącego od poszczególnych kabli fazowych.

Badania ekspozymetryczne, czyli pomiary ciągłe natężenia pola magnetycznego o częstotliwości przemysłowej 50 Hz oddziałującego na pracowników w czasie ich rutynowych czynności, wykonywanych w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych, potwierdzają omówione powyżej wnioski wypływające z badań rozkładu pola magnetycznego – ok. 75% wyników pomiarów nie przekracza poziomu ok. 2,5 A/m, natomiast maksymalny poziom pola magnetycznego dochodzi do 400 A/m (500  $\mu$ T; rys. 6-11).



**Rys. 6-11.** Parametry statystyczne rejestracji natężenia pola magnetycznego o częstotliwości przemysłowej 50 Hz (wartości minimalne, maksymalne, mediany i przedział interkwartylowy – 25 ÷ 75% wyników), oddziałującego na pracowników energetyki w czasie rutynowych czynności zawodowych (mierniki EM-DEX II w kieszeni ubrania na piersi pracowników objętych badaniami – natężenie pola o wartości 1 A/m odpowiada indukcji magnetycznej ok. 1,25  $\mu$ T)

Stosunkowo nowym rodzajem zagrożeń elektromagnetycznych, jakie występują w otoczeniu elektroenergetycznych linii WN, jest promieniowanie radiofalowe, wytwarzane przez nadajniki wykorzystywane do komunikacji bezprzewodowej, najczęściej stacji bazowych telefonii komórkowej lub bezprzewodowych łączy internetowych, które mogą być usytuowane zarówno na słupach wsporczych linii WN, jak i na zlokalizowanych nieopodal masztach wolno stojących. W takim przypadku w ich otoczeniu występuje pole elektromagnetyczne ze składowymi częstotliwościami 50 Hz i złożone pole o częstotliwościach z zakresu radiofalowego (rys. 6-12).



**Rys. 6-12.** Przykładowe widmo częstotliwości radiofalowych pól elektromagnetycznych z pasma częstotliwości 75 MHz ÷ 2,5 GHz, zmierzone w centrum Warszawy

Największy poziom pola elektromagnetycznego występuje na wysokości zainstalowania anteny wzdłuż kierunku jej promieniowania (zwykle nieznacznie odchylonego w pionie od poziomego). Obliczenia numeryczne rozkładu pola elektrycznego w otoczeniu anten systemu telefonii komórkowej GSM 900 i DCS 1800 dla maksymalnych mocy nadajników i zysków energetycznych anten (odpowiednio dla każdego z systemów 80 W i 20 dB oraz 20 W i 20 dB) wskazują, że pole elektryczne o wartości 7 V/m – dopuszczalnej dla narażenia ludności, może występować w odległości do 57 m i 28 m od anten w osi wiązki głównej promieniowania oraz w odległości mniejszej niż 10 m w obszarze listków bocznych (Karwowski, 2002). Obliczenia te wskazują również, że narażenie przekraczające poziom dopuszczalny dla pracowników może wystąpić jedynie bezpośrednio przy antenach (w odległości rzędu jednego metra lub nawet mniejszej, zależnie od mocy nadajnika). Natomiast w płaszczyźnie pionowej, w pobliżu masztu natężenie promieniowania szybko maleje w miarę oddalania się od głównej wiązki promieniowania emitowanego z anteny i narażenie istotne z punktu widzenia przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy może występować nie dalej niż do kilku metrów od anten. Dlatego też każdorazowe zbliżanie się do anten przez pracowników wykonujących prace na słupie wsporczym lub linii WN może wiązać się z ich istotnym narażeniem. Problem ten nie dotyczy prac wykonywanych na poziomie ziemi, bowiem w płaszczyźnie pionowej, w pobliżu masztu natężenie promieniowania szybko maleje w miarę oddalania się od anteny.

## 6.5. Podsumowanie

Praca w sąsiedztwie linii elektroenergetycznych WN może wiązać się z istotnym narażeniem na wytwarzane przez nie pola elektromagnetyczne o częstotliwości przemysłowej 50 Hz – dopuszczalnym jedynie dla pracowników objętych nadzorem wynikającym z postanowień przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. Linie WN mogą przebiegać również w pobliżu ośrodków nadawczych radiowo-telewizyjnych, gdzie wśród składowych promieniowania elektromagnetycznego występującego w środowisku można wyróżnić też składowe o częstotliwości ok. 100 MHz emitowanych przez stacje radiowe i promieniowanie o częstotliwościach z pasma ok. 200-800 MHz emitowanych przez stacje telewizyjne, czy nadajników łączności wykorzystywanych przez takie służby jak policja, pogotowie ratunkowe i straż pożarna. W związku z tym w wielu miejscach, szczególnie na terenie dużych miast,



występują w środowisku pola elektromagnetyczne radiofalowe o bardzo złożonym widmie częstotliwości. Zatem analizując narażenie pracowników energetyki na pole elektromagnetyczne, należy również uwzględnić inne źródła, nie tylko związane z wytwarzaniem, przesyłem i dystrybucją energii elektrycznej. Jak wynika z przytoczonych przykładów, również dobór aparatury pomiarowej do oceny narażeń na pola elektromagnetyczne w pobliżu linii elektroenergetycznych WN wymaga uwagi i szczególnej znajomości jej parametrów metrologicznych.

## Bibliografia

- ACGIH (2013) *American Conference of Governmental Industrial Hygienists: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents. Biological Exposure Indices.*
- Ahlbom i in. (2001) *ICNIRP Sci Review of the Epidemiologic Literature on EMF and Health. Environ. Health Perspect.*, 109(6), 911-933.
- Bortkiewicz A. (2008) *Skutki zdrowotne działania pól elektromagnetycznych – przegląd badań.* Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, 4(58), 67-87.
- Dimbylow P.J. (2005) *Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields.* Phys. Med. Biol., 50, 1047-1070.
- Gryz K., Karpowicz J. (2008) *Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych.* Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, 4(58), 137-171.
- Gryz K., Karpowicz J. (2013) *Znaczenie pozapasmowej czułości aparatury pomiarowej przy ocenie narażenia na radiofalowe pola elektromagnetyczne w sąsiedztwie linii energetycznych wysokiego napięcia.* Bezpieczeństwo Pracy, 9(504), 6-11.
- Gryz K., Karpowicz J., Molenda M., Zradziński P. (2004) *Zagrożenia wtórne w otoczeniu linii elektroenergetycznych WN – analiza z wykorzystaniem metody elementów skończonych.* Przegląd Elektrotechniczny, 12, 1240-1243.
- Huss i in. (2009) *Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population.* Am. J. Epidemiol., Jan. 15, 169(2), 167-75.
- IARC (2002) *International Agency for Research on Cancer: IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields.* Lyon, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 80.
- IARC (2013) *International Agency for Research on Cancer: Non-ionizing radiation, part 2: Radiofrequency electromagnetic fields,* Lyon, France, 2013, The WHO/IARC, IARC Monographs Volume 102.

- ICNIRP (1998) International Commission on Non-Radiation Protection: *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*. Health Physics, 74(4), 494-522.
- ICNIRP (2010) International Commission on Non-Radiation Protection: *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)*. Health Physics, 99(6), 818-836.
- Jaworski M., Wróblewski Z. (2008) *Pole elektromagnetyczne w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych*. [W:] Materiały konferencyjne XXII Szkoły Jesiennej Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych „Pola elektromagnetyczne w środowisku – problemy zdrowotne, ekologiczne, pomiarowe i administracyjne”, Zakopane, 20-24.10.2008 r. 187-200.
- Karpowicz J. (2007) *Pola elektromagnetyczne*. [W:] Ryzyko zawodowe. Metodyczne podstawy oceny. Red. W.M. Zawieska. Warszawa, CIOP-PIB, 227-258.
- Karpowicz J., Gryz K. (2009a) *Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (1) – środki ochrony zbiorowej i indywidualnej*. Bezpieczeństwo Pracy, 1(448), 6-9.
- Karpowicz J., Gryz K. (2009b) *Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (2) – wybrane źródła pól i charakterystyka odzieży ochronnej*. Bezpieczeństwo Pracy, 2(449), 2-5.
- Karpowicz J., Gryz K. (2010) *Pola i promieniowanie elektromagnetyczne*. [W:] Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne. Red. D. Augustyńska, M. Pośniak. Warszawa, CIOP-PIB, 223-241.
- Karpowicz J., Zradziński P., Gryz K. (2012) *Miary narażenia zawodowego na zmienne pole magnetyczne małej częstotliwości o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym uwzględniające naturę elektrodynamicznego oddziaływania pola na organizm człowieka i zalecenia międzynarodowe*. Medycyna Pracy, 63(3), 317-328.
- Karwowski A. (2002) *Czy promieniowanie stacji bazowych telefonii komórkowej stanowi zagrożenie? Cz. 3. Budowa i modele anten, pole w sąsiedztwie anten, bezpieczne odległości*. Przegląd Telekomunikacyjny, 4(75), 224-231.
- Korniewicz H. i in. (2001) *Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych ekspozycji zawodowej*. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, 2(28), 97-237.
- Korpinen L., Elovaara J., Kuisti H. (2009) *Evaluation of Current Densities and total contact Currents in Occupational Exposure at 400 kV Substations and Power Lines*. Bioelectromagnetics, 30, 231-240.
- Korpinen L., Elovaara J., Kuisti H. (2011) *Occupational Exposure to Electric Fields and Induced Currents Associated With 400 kV Substation Tasks From Different Service Platforms*. Bioelectromagnetics, 32, 79-83.
- Reilly P.J. (1998) *Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology*. New York, Springer-Verlag.

- Różycki S. (2011) *Ochrona środowiska przed polami elektromagnetycznymi. Informator dla administracji samorządowej*. Warszawa, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, 69. <http://www.gdos.gov.pl/Articles/view/3036/>
- SCENIHR (2009) Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks: *Health Effects of Exposure to EMF, Opinion adopted at the 28th plenary on 19 January 2009*. Brussels [http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenih/docs/scenih\\_r\\_o\\_022.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenih/docs/scenih_r_o_022.pdf).
- Schüz J., Ahlbom A. (2008) *Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review*. Radiation Protection Dosimetry, Radiation Prot. Dosimetry, 132, 202-211.
- Tiikkaja M., Hietanen M., Alanko T., Lindholm H. (2103) *Możliwości powrotu do pracy w polach elektromagnetycznych po implantacji stymulatora serca*. Bezpieczeństwo Pracy, 9(504), 12-14.
- Vangelova K., Deyanov C., Israel M. (2006) *Cardiovascular risk in operators under radio-frequency electromagnetic radiation*. Int. J. Hyg. Environ. Health, 209, 133-138.
- de Vocht F., Stevens T., van Wendel-de-Joode B., Engels H., Kromhout H. (2006) *Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations*. J. Magn. Reson. Imaging., 23(3), 291-297.
- Wertheimer N., Leeper E. (1979) *Electrical wiring configurations and childhood cancer*. Am. J. Epidemiol., 109(3), 273-284.
- Wertheimer N., Leeper E. (1982) *Adult cancer related to electrical wires near the home*. Int. J. Epidemiol., 11(4), 345-355.
- WHO (2007) World Health Organization: *Environmental Health Criteria 238, Extremely Low Frequency Fields (ELF)*. Geneva.
- Wiaderkiewicz R. (2008) *Efekty biologiczne ekspozycji na pola elektromagnetyczne – badania eksperymentalne*. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, 4(58), 47-65.
- Wilen J., de Vocht F. (2011) *Health complaints among nurses working near MRI scanners – a descriptive pilot study*. Eur. J. Radiol., 80(2), 510-513.
- Zmyślony M. (2008) *Efekty biologiczne i ryzyko zdrowotne PEM sieciowych (z wyłączeniem nowotworów)*. [W:] Materiały XXII Szkoły Jesiennej Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych „Pola elektromagnetyczne w środowisku – problemy zdrowotne, ekologiczne, pomiarowe i administracyjne”, Zakopane, 20-24.10.2008. 238-245.
- Council of the European Union Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), 1999/519/EC*. Official Journal of the European Communities, L 199/59.
- Dyrektywa 2013/35/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu*

*art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 179/1, 2013.*

*Dyrektywa 2006/95/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 12 grudnia 2006 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do sprzętu elektrycznego przewidzianego do stosowania w określonych granicach napięcia. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 374/10, 2006.*

*Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 217, poz. 1833 (zm. DzU 2005, nr 212, poz. 1759).*

*Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. DzU nr 192, poz. 1883.*

*Zarządzenie Ministra Górnictwa i Energetyki z dnia 28 stycznia 1985 r. w sprawie szczegółowych wytycznych projektowania i eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych w zakresie ochrony ludzi i środowiska przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego. M.P. nr 3, poz. 24. [Przestało obowiązywać w 1998 r. z uwagi na zmianę Ustawy o ochronie i kształtowaniu środowiska]*

*EN 50527-1:2010 Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices – Part 1: General.*

*IEC 61786-1 Measurement of DC magnetic fields, AC magnetic and electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Requirements for instruments.*

*IEC 61786-2 Measurement of DC magnetic fields, ac magnetic and electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Guidance for measurements.*

*PN-EN 50413:2009 Metody pomiaru i obliczeń ekspozycji ludzi w polach elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych (0 Hz–300 GHz).*

*PN-EN 50505:2008 Norma podstawowa dla oceny ekspozycji człowieka na pola elektromagnetyczne pochodzące od sprzętu do zgrzewania rezystancyjnego i procesów pokrewnych.*

*PN-IEC 833:1997 Pomiar pól elektrycznych częstotliwości przemysłowej.*

*PN-T-06580:2002 Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Arkusz 01. Terminologia. Arkusz 03. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.*

# 7. Wyładowania ulotowe z przewodów linii elektroenergetycznych i związane z nimi zjawiska jonizacji powietrza. Promieniowanie jonizujące w otoczeniu linii

Zygmunt Grabarczyk, Krzysztof Pachocki

7.1. Wyładowania ulotowe w otoczeniu przewodów wysokiego napięcia linii elektroenergetycznych (183)

7.1.1. Jonizacji powietrza i zmiany w rozkładzie pola elektrostatycznego (184)

7.1.2. Generowanie ozonu (190)

7.2. Potencjalne zagrożenia wynikające z ulotu z linii WN (191)

7.2.1. Elektryzacja fazy dyspersyjnej aerozolu powietrznego (192)

7.2.2. Strącenie zanieczyszczeń stałych i ciekłych fazy rozproszonej aerozolu w otoczeniu linii elektroenergetycznych WN (195)

7.2.3. Wpływ linii wysokiego napięcia na osadzanie powierzchniowe i wdychanie produktów rozpadu radonu (197)

7.3. Czynniki warunkujące poziom zagrożenia zdrowia (205)

7.4. Podsumowanie (209)

Bibliografia (210)

## 7.1. Wyładowania ulotowe w otoczeniu przewodów wysokiego napięcia linii elektroenergetycznych

Wyładowanie ulotowe jest zjawiskiem powielania nośników prądu elektrycznego, elektronów i jonów, na skutek występowania bardzo silnego pola elektrycznego o natężeniu zbliżonym do wytrzymałości dielektrycznej powietrza. W odróżnieniu od innych typów wyładowań występuje ono w bezpośrednim otoczeniu cienkich lub ostrych metalowych elektrod. Wyładowanie to (niezależnie od polaryzacji) zachodzi w bardzo małej odległości,  $r_0$ , od powierzchni przewodu, przy którym występuje odpowiednio duże natężenie pola (zwane także gradientem potencjału). Jest to odległość, w której zredukowane natężenie pola elektrycznego jest większe od  $120 T_d$  ( $1 T_d = E/N = 10^{-21} \text{ V} \cdot \text{m}^2$ ). Zazwyczaj ta odległość jest mniejsza niż 1 mm. Poza ten obszar wydostają się już jedynie, w zależności od polaryzacji, jony ujemne lub dodatnie. Dlatego w przypadku wyładowania ulotowego, zaliczanego do niezupełnych lub jednoelektrodowych, strumień plazmy nie dosięga drugiej elektrody (w odróżnieniu od wyładowania iskrowego). Nośnikami ładunku podczas przepływu prądu ulotowego są lekkie jony, dlatego natężenie tego prądu jest stosunkowo małe, rzędu od pikoamperów do mikroamperów w przypadku wyładowań z ostrza, a w przypadku cienkich przewodów – do mikroamperów na 1 metr długości przewodu.



Zjawisko elektrycznych wyładowań ulotowych (w terminologii popularnej – koronowych) na powierzchni przewodów jest jednym z ubocznych efektów stosowania napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć (odpowiednio WN i NN). Wyładowania ulotowe występują wokół przewodów, jeżeli natężenie pola elektrycznego przy powierzchni przewodnika osiąga wartość wytrzymałości dielektrycznej powietrza (ok. 3 MV/m). Wyładowania te występują zarówno wokół przewodów pod napięciem, jak i znajdujących się w ich polu elektrycznym przewodów uziemionych. W otoczeniu linii zmiennoprądowych przy powierzchni przewodów występują naprzemiennie wyładowania ujemne lub dodatnie, zależnie od fazy napięcia danego przewodu. Zatem można oczekiwać emisji jonów lekkich obu polaryzacji. Ze względu na bardzo duże natężenie pola między przewodami linia jest w pewnym stopniu pułapką, z której tylko nieznaczna część jonów może się wydostać. Przemienność napięcia powoduje naprzemienną emisję i powrót jonów. Tylko na skutek starzenia się jonów oraz zmniejszenia ich ruchliwości jest możliwa większa szybkość emisji niż powrotu jonów do przewodu i wydostawanie się części z nich z tej pułapki. Odrywanie się jonów od linii zachodzi prawdopodobnie na jej obrzeżach i w dużej mierze na skutek wiatru.

Zjawisko ulotu jest niekorzystne z powodów technicznych oraz środowiskowych. Prowadzi do utraty części przesyłanej energii, a w dłuższym czasie może powodować uszkodzenia niektórych podzespołów systemu przesyłowego.

Istotność wpływu wyładowań ulotowych na środowisko wydaje się nietrwała, ponadto zależy w dużym stopniu od położenia linii względem infrastruktury mieszkalnej. Obecnie ten wpływ jest stosunkowo słabo zbadany. Potencjalnie istotnego wpływu można oczekiwać w wypadku pracowników energetyki, obsługujących linie WN, jeśli ich stanowiska są położone w małej odległości (kilka do kilkudziesięciu metrów) bądź bezpośrednio na masztach lub przewodach linii. Pod kątem przyszłej oceny tego zagrożenia dalej przeprowadzono przegląd wyników badań dostępnych w literaturze i badań własnych autorów.

Podstawowymi zjawiskami związanymi z ulotem z przewodów linii są:

- jonizacja powietrza
- generacja ozonu
- emisja hałasu o podstawowej częstotliwości 50 Hz harmonicznym (por. rozdz. 8)
- zakłócenia radioelektryczne.

### 7.1.1. Jonizacja powietrza i zmiany w rozkładzie pola elektrostatycznego

Jonizacja powietrza polega na odrywaniu elektronów od cząsteczek gazów (tlen, azot, dwutlenku węgla itp.) znajdujących się w powietrzu atmosferycznym

i przyłączaniu ich do cząsteczek obojętnych. Prowadzi to do powstania dodatnich jonów pierwotnych ( $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$ ) oraz ujemnych ( $O_2^-$ ). W czasie od 0,01 do kilku mikrosekund, na skutek zderzeń i działania sił elektrostatycznych, do jonów pierwotnych dołączane są cząsteczki wody (zwykle kilka), a następnie w zanieczyszczonym powietrzu dołączane są inne cząsteczki, zazwyczaj węglowodorowe i amoniak (Grabarczyk, 2000). Skład chemiczny jonów jest zależny od zanieczyszczeń gazowych występujących w powietrzu. Tak utworzone jony w fizyce atmosfery są nazywane jonami lekkimi. Ich rozmiary są mniejsze niż 2 nm. Są nietrwałe (ich czas życia, w zależności od zanieczyszczenia powietrza i obecności aerozoli, jest rzędu od ułamków sekund do kilkudziesięciu sekund). Jony ulegają neutralizacji i rozpadają się przeważnie w momencie zderzenia z cząstkami aerozolu lub przedmiotami (ściany, meble, rośliny, błona śluzowa dróg oddechowych itp.), lub na skutek rekombinacji (neutralizacji ich ładunków) podczas zderzeń jonów dodatnich i ujemnych.

Obecność tego typu jonów (zwanym także w fizyce atmosfery aerojonami), obok innych większych i silniej naelektryzowanych cząsteczek w powietrzu, jest zjawiskiem naturalnym.

Podstawowym źródłem energii niezbędnej do powstawania aerojonów jest promieniowanie jonizujące. Udział poszczególnych źródeł tego promieniowania pokazano w tabeli 7-1.

**Tabela 7-1.** Udział głównych naturalnych czynników jonizujących w szybkości generacji jonów lekkich (Grabarczyk, 2000)

Czynnik jonizujący	Średnia liczba generowanych par jonów $1/(s \cdot cm^3)$	Komentarz
Promieniowanie pierwiastków radioaktywnych występujących w podłożu – głównie $\gamma$ (90 ÷ 97%) i $\beta$ (3 ÷ 10%)	średnio 3 (2-6)	więcej nad podłożem skalistym (do 75 par jonów/ $(s \cdot cm^3)$ – Alpy, Skandynawia), mniej nad osadowym (ok. 2 par jonów/ $(s \cdot cm^3)$ – Polska nizinna). Maleje z wysokością. Nad powierzchnią mórz nie występuje, w jaskiniach – do kilku tysięcy par jonów/ $(s \cdot cm^3)$
Promieniowanie pierwiastków radioaktywnych w powietrzu – $\alpha$ (90 ÷ 92%), $\beta$ (4%), $\gamma$ (3%)	średnio 5	głównie przy rozpadzie radonu i pochodnych, więcej w piwnicach, jaskiniach, kopalniach. Radon wydziela się z gruntu, nad powierzchnią mórz nie występuje
Promieniowanie kosmiczne	1,5-2	jedyne źródła nad powierzchnią mórz
Razem:	średnio ok. 10-13	nad powierzchnią mórz – ok. 1,5-2 par jonów/ $(s \cdot cm^3)$
Wyładowania atmosferyczne	lokalnie do $10^{17}$	wzdłuż drogi wyładowania

Przeciętne wartości stężenia jonów lekkich w atmosferze są zależne z jednej strony od szybkości ich generacji, z drugiej zaś od szybkości neutralizacji. Czynnikiem zwiększającym ich stężenie jest promieniowanie jonizujące, zmniejszającym – obecność aerozolu (zanieczyszczeń powietrza i wody w stanie ciekłym i stałym rozdrobnionym). Typowe średnie wartości stężeń aerojonów w różnych regionach geograficznych pokazano w tabeli 7-2.

**Tabela 7-2.** Typowe stężenia jonów lekkich w różnych państwach (Grabarczyk, 2000)

Państwo	Stężenie lekkich jonów ujemnych 1/cm <sup>3</sup>	Stężenie lekkich jonów dodatnich 1/cm <sup>3</sup>	Komentarz
Szwecja (środkowa)	600 ÷ 2 400	700 ÷ 2 000	podłoże skaliste
USA (stany nizinne)	180 ÷ 400	200 ÷ 500	–
USA (stany górzyste)	440 ÷ 1 000	540 ÷ 2 000	–
Francja	ok. 180	ok. 220	obszary nizinne
Anglia	50 ÷ 2 000	50 ÷ 2 000	
Izrael	575 ÷ 1 100	700 ÷ 1 500	wpływ pustynnych wiatrów i skalistego podłoża
Polska	100 ÷ 300	100 ÷ 350	wartości średnie z różnych obserwacji na terenach nizinnych

Stężenie jonów dodatnich jest o kilkanaście procent większe niż ujemnych. Wynika to z dwóch przyczyn – jony ujemne są lżejsze, szybciej się poruszają i częściej ulegają neutralizującym je zderzeniom z cząstkami aerozolu, a ponadto wektor natężenia pola elektrycznego ziemskiego jest skierowany do powierzchni ziemi, co powoduje dryfowanie jonów dodatnich w kierunku ziemi, a ujemnych wzwyż, w głąb troposfery.

Znacznie silniejszym źródłem generacji jonów w porównaniu ze źródłami naturalnymi są wyładowania elektryczne różnego typu (ulotowe, snopiaste, iskrowe). Jednakże, z powodu ich przestrzennego skupienia (zajmują względnie niewielką część przestrzeni) oraz szybkiej neutralizacji jonów, mają nieznaczny wpływ na średnie stężenie jonów w środowisku. Ich wpływ może występować w niewielkich (liczonych w metrach) odległościach od miejsca występowania wyładowania.

Właściwości fizyczne jonów wytwarzanych przez ulot są podobne do właściwości jonów naturalnych, natomiast ich budowa chemiczna nieco się różni. O ile jądrem jonów naturalnych dodatnich są formy tlenu lub dwutlenku węgla, o tyle w przypadku jonów z ulotu przeważają tlenki azotu (Grabarczyk, 2000), natomiast w przypadku obu rodzajów jonizacji jony dodatnie mają postać stabilnych klastrów  $H_3O^+ \cdot (H_2O)_n$ .

Jony i cząstki naładowane elektrycznie w obecności pola elektrycznego o stałym natężeniu dryfują z powodu lepkości powietrza ze stałą szybkością proporcjonalną do natężenia pola. Współczynnik proporcjonalności, tzw. ruchliwość, jest podstawowym parametrem fizycznym jonu. Typowe wartości ruchliwości jonów lekkich pokazano w tabeli 7-3. Z danych tych wynika, że jony wytwarzane przez ulot są nieco mniej ruchliwe niż naturalne, co może świadczyć o ich większych rozmiarach.

**Tabela 7-3.** Zależność średniej ruchliwości jonów lekkich od sposobu jonizacji (wg pracy Eichmeiera i Herdena, 1968)

Czynnik jonizujący	Średnia ruchliwość jonów ujemnych, $k_-, \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	Średnia ruchliwość jonów dodatnich, $k_+, \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	$k_-/k_+$
Promieniowanie $\alpha$	2,08	1,21	1,71
Promieniowanie $\beta$	1,95	1,35	1,43
Promieniowanie $\gamma$	0,29	0,22	1,32
Promieniowanie X	1,33	1,22	1,09
Promieniowanie UV	0,68	–	–
Wyładowanie ulotowe	1,2	0,86	1,40
Łuk elektryczny	1,12	–	–

Gęstość natężenia prądu jonowego, wymuszonego przez pole elektryczne, jest równa:

$$j = E e (k_+ n_+ + k_- n_-) \quad (7-1)$$

gdzie:

$E$  – wektor natężenia pola elektrycznego, V/m

$k$  – ruchliwość jonów,  $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

$n$  – stężenie jonów,  $1/\text{m}^3$

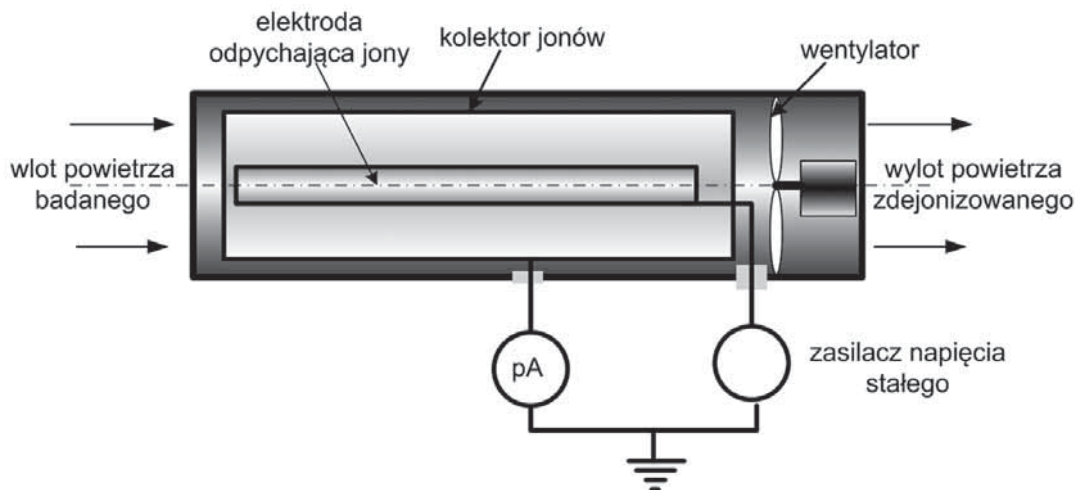
$e$  – elementarny ładunek elektryczny,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

W przypadku jonizacji ulotowej unipolarnej, przyjmując maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego równą wytrzymałości dielektrycznej powietrza, można oszacować maksymalne osiągalne gęstości prądu ulotu:

- ulot ujemny  $j_{\text{max}} < 1,9 n_- 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>
- ulot dodatni  $j_{\text{max}} < 1,4 n_+ 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>.

Zależności te pozwalają jedynie na oszacowanie wydajności jonowej źródła, jeżeli możliwy jest pomiar średniej gęstości natężenia prądu na powierzchni otaczającej całe źródło ulotu. Jednak takie pomiary w otoczeniu przewodów linii są niezwykle trudne do wykonania.

Wyznaczenie wartości stężenia jonów lekkich w powietrzu w otoczeniu linii, w obecności jej pola elektrycznego, jest szczególnie trudne. Stężenie jonów mierzy się za pomocą tzw. mierników aspiracyjnych, których zasadę pracy pokazano na rysunku 7-1. W przypadku jonów lekkich wykorzystuje się fakt, że niosą one tylko jeden ładunek elementarny, zatem dzieląc natężenie prądu przez ładunek elementarny, otrzymuje się liczbę jonów zasysanych do wnętrza miernika.



**Rys. 7-1.** Schemat miernika stężenia jonów lekkich; jony zadanej polaryzacji są kierowane przez wewnętrzne pole elektryczne do kolektora, prąd kolektora jest wprost proporcjonalny do stężenia jonów

Badane powietrze jest zasysane mechanicznie do wnętrza współosiowego kondensatora. Polaryzację stałego napięcia zasilania kondensatora dobiera się tak, by jony mierzonej polaryzacji skierować do kolektora. W odróżnieniu od mierników rezystywności powietrza (mają identyczną budowę), miernik stężenia jonów pracuje w nasyceniu, to znaczy wartość napięcia zasilającego dobiera się tak względem szybkości przepływu powietrza, że wszystkie jony o ruchliwości większej od ruchliwości krytycznej,  $k_c$ , są zatrzymywane w kondensatorze. Wartość ruchliwości krytycznej miernika wynosi (Charry i Kavet, 1987):

$$k_c = \frac{\varepsilon_0 M_0}{U_0 C_0} \quad (7-2)$$

gdzie:

$\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna powietrza, F/m

$M_0$  – objętościowa szybkość przepływu powietrza przez miernik, m<sup>3</sup>/s

$U_0$  – napięcie zasilające kondensator miernika, V

$C_0$  – pojemność kondensatora, F.

Z przedstawionej budowy miernika wynika ograniczenie jego stosowalności do pomiarów stężenia jonów lekkich w polu elektrycznym, zatem także bezpo-



średnio przy przewodach linii wysokiego napięcia. Obudowa i jedna z elektrod miernika w czasie pomiaru muszą być uziemione, by zapobiec jego elektryzowaniu się. W konsekwencji miernik skupia na sobie część linii sił pola elektrycznego linii WN. Na jony w pobliżu miernika działają dwie podstawowe siły – siła związana z ruchem zasysanego powietrza oraz siły elektryczne spowodowane obecnością pola elektrycznego linii. Warunkiem wciągnięcia jonów wraz powietrzem do wnętrza kondensatora jest prędkość zasysania powietrza istotnie większa od prędkości dryfu jonów w polu elektrycznym ( $v = k E$ ). Typowa prędkość liniowa zasysania powietrza przez miernik wynosi ok. 1 m/s. Zatem, przyjmując ruchliwość jonów lekkich ok.  $2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , uzyskuje się maksymalną wartość natężenia pola, w którym można jeszcze mierzyć stężenie jonów, na poziomie 5 kV/m. Wynika stąd, że pomiary stężenia jonów mają sens jedynie w zasięgu pół strefy bezpiecznej, przy większym natężeniu pola będą obarczone rosnącym ujemnym błędem.

Wyniki pomiarów stężenia jonów lekkich w powietrzu w otoczeniu linii elektroenergetycznych są trudno dostępne, gdyż nieliczne zespoły badaczy takie pomiary wykonywały. Dostępne są tylko wyniki pomiarów naziemnych. Szerokie badania wykonał australijski zespół profesor Lidii Morawskiej (J-Fatokum i in., 2008; Jayaratne i in., 2008, Ling i in., 2010). Pomiary wykonane poza miastem, po zawiętrznej stronie dwuobwodowych linii 220-330 kV i 110-132 kV, z przewodami na wysokości od 10 m do 25 m, w odległości 20-30 m od linii (Ling i in., 2010), wykazały medianę stężenia jonów ujemnych na poziomie  $229/\text{cm}^3$  oraz dodatnich na poziomie  $3430/\text{cm}^3$ . Przy braku jonizacji mediana stężenia jonów ujemnych była na poziomie  $449/\text{cm}^3$ , a dodatnich –  $50/\text{cm}^3$ . Zdaniem autorów świadczy to o obecności unipolarnego źródła jonizacji (dodatniego).

Podobne pomiary pod takimi samymi liniami na terenie miejskim wykonali Jayaratne i in. (2008). Jednocześnie prowadzono pomiar natężenia pola elektrostatycznego 1,5 m nad ziemią. Łączne średnie stężenie jonów obu polaryzacji pod liniami w mieście wynosiło  $776/\text{cm}^3$ , podczas gdy za miastem ok.  $400/\text{cm}^3$ . Ponadto stwierdzono, że stężenie jonów w powietrzu miejskim pod liniami było większe o 76% niż w oddaleniu od linii. Średnie stężenie pod liniami 220 kV i 330 kV, wynoszące ok.  $905/\text{cm}^3$ , było istotnie większe niż pod liniami 110-132 kV ( $501/\text{cm}^3$ ). Obserwowano wzrost stężenia jonów dodatnich i ujemnych, z istotną przewagą dodatnich. Autorzy nie byli w stanie uzasadnić tej nierównowagi. Pomiary zmian natężenia pola elektrycznego stałego pod linią w stosunku do strony nawietrznej potwierdziły, zdaniem autorów, przewagę jonów dodatnich.

Inne wyniki otrzymano w Wielkiej Brytanii, mierząc natężenie pola elektrostatycznego pod liniami 132 kV, 275 kV i 400 kV (Fews i in., 1999a,b). Pomiary wykonywano na dystansie ok. 700-800 m od linii, prostopadle do niej, po stronie

nawietrznej i zawietrznej. Naturalne natężenie ziemskiego pola elektrostatycznego po stronie nawietrznej wynosiło od 150 V/m do 200 V/m. Pod linią następował zanik pola i zmiana znaku. W odległości ok. 400-600 m od linii, po stronie zawietrznej, kierunek natężenia pola elektrostatycznego pozostawał odwrócony w stosunku do pola ziemskiego. Zdaniem autorów taka zmiana kierunku pola wymagała obecności za/nad linią dodatkowego ładunku ujemnego o przewodze ok. 2 000/cm<sup>3</sup> cząstek naelektryzowanych ujemnie nad cząstkami dodatnimi. Z tego pomiaru nie wynikało bezpośrednio, czy ładunek ten tworzyły jony lekkie, czy naelektryzowany aerozol. Stwierdzono, że takie zachwianie równowagi ładunku prowadzi do zmiany naturalnego, bipolarnego charakteru naelektryzowania aerozolu na unipolarny, co może powodować wzrost depozycji aerozolu w drogach oddechowych człowieka. Hipoteza ta jest dyskutowana w rozdziale 7.2.

Z pomiarów przy liniach WN (Matthews i in., 2012) oraz przeglądu danych literaturowych wynika, że możliwa jest przewaga zarówno jonów dodatnich, jak i ujemnych. Przyczyna tych dysproporcji nie jest jasna, prawdopodobnie zależy od konstrukcji linii, pogody itp.

### 7.1.2. Generowanie ozonu

Energia kinetyczna zderzeń w obrębie obszaru jonizacji jest wystarczająco duża do rozerwania wiązań cząsteczki dwuatomowego tlenu. Uwolnione pojedyncze atomy łączą się z tlenem dwuatomowym, tworząc trzyatomowe cząsteczki ozonu, O<sub>3</sub>. Ilość ozonu wytwarzanego przez wyładowania ulotowe przy liniach wysokiego napięcia jest trudna do ustalenia, dostępne dane literaturowe dotyczą badań laboratoryjnych. Dlatego dalej przedstawiono zgrubne, nadmiarowe oszacowanie maksymalnej ilości generowanego ozonu. Według Kogelschatza i Eliassona (1995) podczas produkcji ozonu z powietrza metodą jonizacji przez wyładowania elektrostatyczne maksymalną wydajność, równą 180 g/kWh (18%), uzyskuje się przy wartości zredukowanego natężenia pola równej 200 T<sub>d</sub>.

Według Agrasińskiej (1996) ilość mocy traconej w sześcioprzewodowej linii 220 kV wynosi ok. 23 ÷ 31 W/m linii. Moc tej odpowiada wartość skuteczna natężenia prądu ulotu ok. 23 μA/m przewodu. Z analizy tych danych wynika, że ilość generowanego ozonu nie przekracza 50 mg/s/m jednego przewodu. Wydajność wytwarzania ozonu przez ulot dodatni jest ok. 10-krotnie mniejsza niż przez ulot ujemny. Można zatem przyjąć, że szybkość generowania ozonu jest na pewno mniejsza niż 25 mg/s/m. Ponieważ warunki generacji ozonu przy linii są dalekie od optymalnych warunków produkcji ozonu w laboratorium, więc można założyć,

że szybkość generacji przy linii jest o rząd wielkości mniejsza, czyli wynosi co najwyżej 2,5 mg/s/m.

Nowsze badania laboratoryjne, prowadzone przez Abdel-Salma i Muftiego (1998) na modelach linii stałoprądowych, wykazały przy linii 100 kV i odległości przewodów 0,42 m straty nie większe niż 1 W/m, podczas gdy prąd ulotu wynosił ok. 0,2  $\mu\text{A}/\text{m}$ . Wynika stąd, że przy liniach 110 kV szybkość generacji ozonu jest co najmniej 20-krotnie mniejsza niż w pobliżu linii 220 kV (czyli nie przekracza wartości rzędu 1 mg/m/s).

Analiza wyładowań koronowych dla potrzeb chemicznych, wykonana przez Chena (2002), pokazała, że jeśli szybkość wiatru jest rzędu 0,5 m/s, stężenie ozonu przy ułocie ujemnym zmniejsza się do poziomu kilku miligramów na metr sześcienny w odległości ok. 1 mm od przewodu, przy czym stężenie takie występuje tylko wewnątrz strugi o szerokości ok. 2 mm. W odległości rzędu centymetrów od przewodu można oczekiwać zmniejszenia się stężenia ozonu poniżej 0,1 mg/m<sup>3</sup> [wg własnego oszacowania autora, na podstawie analizy wyników Chena (2002)]. Oszacowania te nie mogą być obecnie potwierdzone wiarygodnymi danymi pomiarowymi. Natomiast w przypadku pracowników przebywających na ziemi lub na masztach, w odległości co najmniej kilku metrów, przepływ powietrza (wiatr) o szybkości rzędu 0,5-1 m/s jest wystarczający do skutecznego zmniejszenia stężenia ozonu do poziomów nieistotnych biologicznie.

Całkowicie inne warunki, w stosunku do terenu otwartego, panują w budynkach i pomieszczeniach, w których znajdują się urządzenia lub instalacje wysokiego napięcia. Zachodząca w sposób ciągły generacja ozonu prowadzi do ustalenia się jego stężenia na poziomie nasycenia, o którym decyduje rozpad cząsteczek ozonu zderzających się wzajemnie i z obiektami stałymi w budynku. W literaturze z zakresu bezpieczeństwa pracy brakuje obecnie wyników badań stężenia ozonu w takich pomieszczeniach.

## 7.2. Potencjalne zagrożenia wynikające z ulotu z linii WN

Produktami wyładowań ulotowych są jony lekkie oraz ozon i nieznaczna ilość tlenków azotu. Stężenie jonów lekkich mierzone tylko na poziomie ziemi. Po stronie zawiętrznej linii obserwowano kilkakrotnie większy wzrost stężenia jonów lekkich w porównaniu ze stroną nawietrzną. Na poziomie przewodów pomiary nie były wykonywane. Zwiększone stężenie aerojonów lekkich oraz obecność pola elektrosta-

tycznego i silnego pola elektrycznego naprzemiennego ma wpływ na stan aerozolu powietrznego w otoczeniu linii. Istotność tego wpływu zależy od stężenia cząstek aerozolu oraz od ich ruchliwości. Istnieje kilka hipotez dotyczących potencjalnego zagrożenia. Na skutek wzrostu ładunku elektrycznego cząstek aerozolu teoretycznie jest możliwy wzrost ich depozycji w drogach oddechowych oraz na powierzchni skóry, spowodowany zjawiskiem odbić zwierciadlanych.

Potencjalne zdrowotne znaczenie tego zjawiska zostanie omówione w rozdz. 7.3.

### 7.2.1. Elektryzacja fazy dyspersyjnej aerozolu powietrznego

Powietrze atmosferyczne jest aerozolem, którego fazą dyspersyjną są cząstki pyłu, wody, małe obiekty biologiczne. Na skutek występowania w powietrzu lekkich jonów dodatnich i ujemnych, w zbliżonych proporcjach, i ich zderzeń z cząstkami aerozolu dochodzi do elektryzacji tych ostatnich. Dzięki temu powstają tzw. jony średnie i ciężkie, o ruchliwości podanej w tabeli 7-4. Na skutek przypadkowości tego zjawiska ilość ładunku na poszczególnych cząstkach podlega rozkładowi Maxwella-Boltzmana. Cząstki o średnicy mniejszej niż 10 nm w 99% pozostają elektrycznie obojętne, cząstki poniżej 100 nm są naładowane pojedynczo dodatnio lub ujemnie lub są neutralne, a cząstki o średnicy powyżej 100 nm niosą ładunek zbliżony do  $2,37 (d)^{0,5}$ . Poziom naelektryzowania aerozolu w warunkach naturalnych (w dużej odległości od linii) pokazano na rysunku 7-2.

**Tabela. 7-4.** Klasyfikacja aerojonów stosowana w fizyce atmosfery, wg Hörraka (2001)

Klasa aerojonów	Podklasa	Średnica nm	Ruchliwość cm <sup>2</sup> /(V·s)
Lekkie ( <i>small</i> )	małe klastry ( <i>small cluster</i> )	0,36 ÷ 0,85	3,14 ÷ 1,28
	duże klastry ( <i>big cluster</i> )	0,85 ÷ 1,60	1,28 ÷ 0,5
Średnie ( <i>intermediate</i> )		1,6 ÷ 7,4	0,50 ÷ 0,034
Ciężkie ( <i>large</i> )	lekkie duże ( <i>light large</i> )	7,4 ÷ 22	0,034 ÷ 0,0042
	ciężkie duże ( <i>heavy large</i> )	22 ÷ 79	0,0042 ÷ 0,00041

Ruchliwość aerojonu jest związana z wymiarami cząstki (np. promieniem –  $r$ ) i jej ładunkiem, będącym całkowitą wielokrotnością  $m$  ładunku elementarnego  $e$  lub  $-e$ , zależnością (Cross, 1987):

$$k = \frac{me(1 + d_s / r)}{6\pi\eta r} \quad (7-3)$$

gdzie:

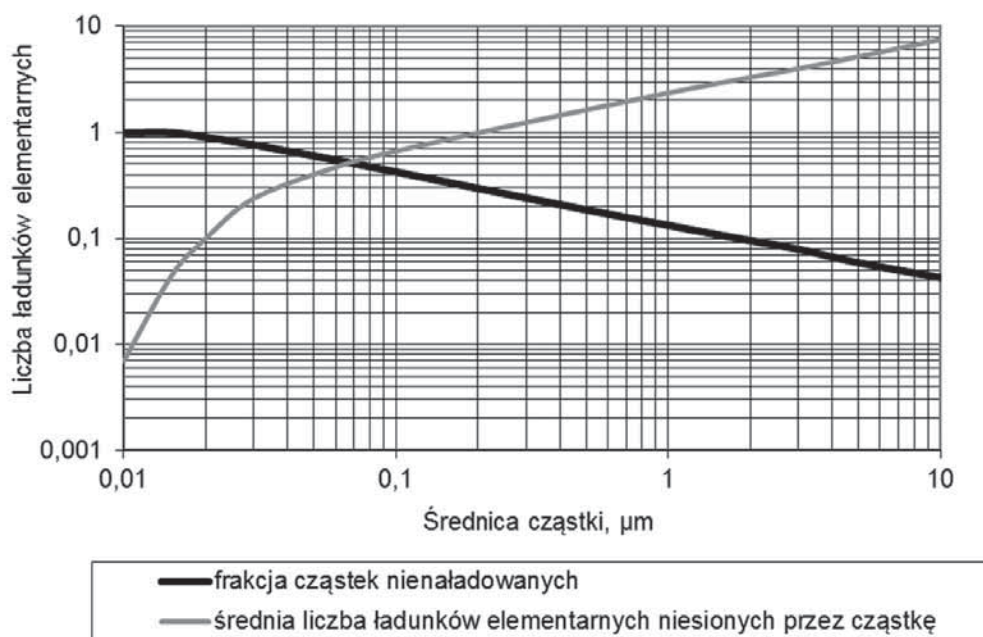
$m_e$  – ładunek cząstki (wielokrotność ładunku elementarnego  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

$d_s$  – średnia droga swobodna cząstki, w warunkach normalnych (STP – ang. *standard temperature and pressure*), ok.  $10^{-7}$  m

$r$  – promień cząstki, m

$\eta$  – dynamiczna lepkość powietrza w warunkach STP, ok.  $1,7 \cdot 10^{-7}$  kg/(m·s).

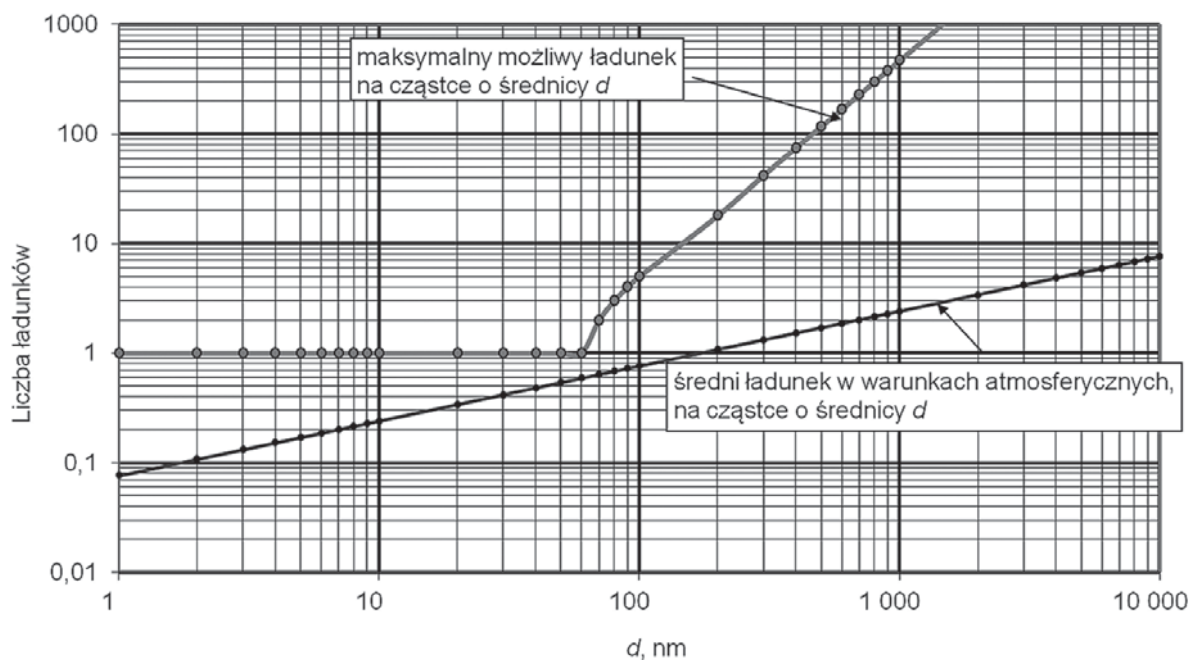
W warunkach naturalnych większość cząstek stałych i ciekłych aerozolu powietrznego jest naelektryzowana. Zilustrowano to na rysunku 7-2.



**Rys. 7-2.** Stopień naładowania elektrycznego cząstek aerozolu atmosferycznego w warunkach równowagi termodynamicznej, w bipolarnej atmosferze aerojonów lekkich

Zmiana stężenia aerojonów lekkich w powietrzu prowadzi do zmiany wartości ładunków niesionych przez cząstki. W przypadku chmury jonowej odległej od linii (poza zasięgiem pola elektrycznego linii) dochodzi do wzmożonej elektryzacji dyfuzyjnej, zwłaszcza małych cząstek, o rozmiarach do kilkudziesięciu nanometrów. Cząstki o średnicy mniejszej niż 30 nm nie mogą nieść więcej niż jednego ładunku elementarnego, dlatego elektryzacja powoduje istotny przyrost stężenia jonów średnich. Natomiast w obecności pola elektrycznego linii oprócz ładowania dyfuzyjnego pojawia się także ładowanie polowe, szczególnie istotne dla cząstek większych (powyżej 30 nm). W tym przypadku nie następuje istotny wzrost stężenia jonów ciężkich, lecz wzrost ich ładunku i związanej z tym ruchliwości. W rezultacie stają się one bardziej podatne na wpływ pola elektrycznego, szczególnie stałego. Maksymalną liczbę ładunków elementarnych, jaką może przyłączyć cząstka, pokazano na rysunku 7-3.





**Rys. 7-3.** Maksymalna i średnia (w powietrzu atmosferycznym) liczba ładunków elementarnych, jaką może nieść cząstka aerozolu o średnicy  $d$

Obecnie nie ma wyników pomiarów spektralnego rozkładu ładunku na cząstkach aerozolu w otoczeniu linii wysokiego napięcia. Próbę takich badań z zastosowaniem licznika jonów średnich i ciężkich własnej konstrukcji wykonano w CIOP-PIB (Grabarczyk i Berliński, 2005). Przeprowadzono pomiary stężenia ładunku niesionego przez jony średnie i ciężkie przy powierzchni ziemi. W ich wyniku stwierdzono istotny wpływ wyładowania ulotowego między przewodami linii WN na ilość ładunku niesionego przez aerozol po stronie zawietrznej. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 7-5.

**Tabela 7-5.** Zmiany średniej wartości ładunku elektrycznego niesionego przez jony średnie i ciężkie po przejściu powietrza przez linię WN; pomiary w odległości 20 ÷ 50 m od linii

<b>Linia 400 kV</b>				
<b>Rodzaj jonów</b>	<b>Wartość ładunku jonów średnich e/cm<sup>3</sup></b>		<b>Wartość ładunku jonów ciężkich e/cm<sup>3</sup></b>	
	<b>przed linią</b>	<b>za linią</b>	<b>przed linią</b>	<b>za linią</b>
Jony dodatnie	140	525	4 100	5 900
Jony ujemne	200	365	2 100	4 400
<b>Linia 110 kV</b>				
Jony dodatnie	910	1 230	3 200	4 800
Jony ujemne	710	780	3 100	3 950

W przypadku obu linii następował wzrost przestrzennej gęstości ładunku obu polaryzacji, przy czym zgodnie z badaniami geofizycznymi stężenie jonów średnich było znacznie mniejsze od stężenia jonów ciężkich. Także sumaryczny ładunek po stronie zawietrznej linii był dodatni, podobnie jak w badaniach australijskich (Jayaratne i in., 2008; J-Fatokum i in., 2008). Ponieważ nie mierzono stężenia jonów w samej linii i nad nią, ani nie mierzono natężenia pola elektrostatycznego, nie można odnieść się do badań brytyjskich (Matthews i in., 2010, 2012).

Z przedstawionego przeglądu wynika, że wyładowania ulotowe z przewodów linii WN powodują wzrost naelektryzowania aerozolu.

Obecnie jest zgoda co do tego, że aerosolowe zanieczyszczenia powietrza, przechodząc z wiatrem przez linię, ulegają zwiększonemu naelektryzowaniu (*Particle Deposition...*, 2004), choć trudno jest ocenić jego stopień. Ponieważ nie ma wyników pomiarów w płaszczyźnie pionowej, nie jest znana wysokość naelektryzowanej chmury.

Badania przeprowadzone w CIOP-PIB (Grabarczyk i Berliński, 2005) miały na celu sprawdzenie, czy aerozol naelektryzowany między przewodami linii osiąga powierzchnię ziemi, co miałoby potencjalne znaczenie zdrowotne (wdychanie naelektryzowanego aerozolu przez ludzi przebywających w otoczeniu linii). Badania te wykazały, że istotnie za linią wzrastało stężenie naelektryzowanego aerozolu, jednak ten wzrost był zazwyczaj od 1,3- do 3-krotny (por. tab. 7-5).

### **7.2.2. Strącenie zanieczyszczeń stałych i ciekłych fazy rozproszonej aerozolu w otoczeniu linii elektroenergetycznych WN**

Istnieją dwa mechanizmy wymuszające ruch cząstek aerozolu w polu elektrycznym.

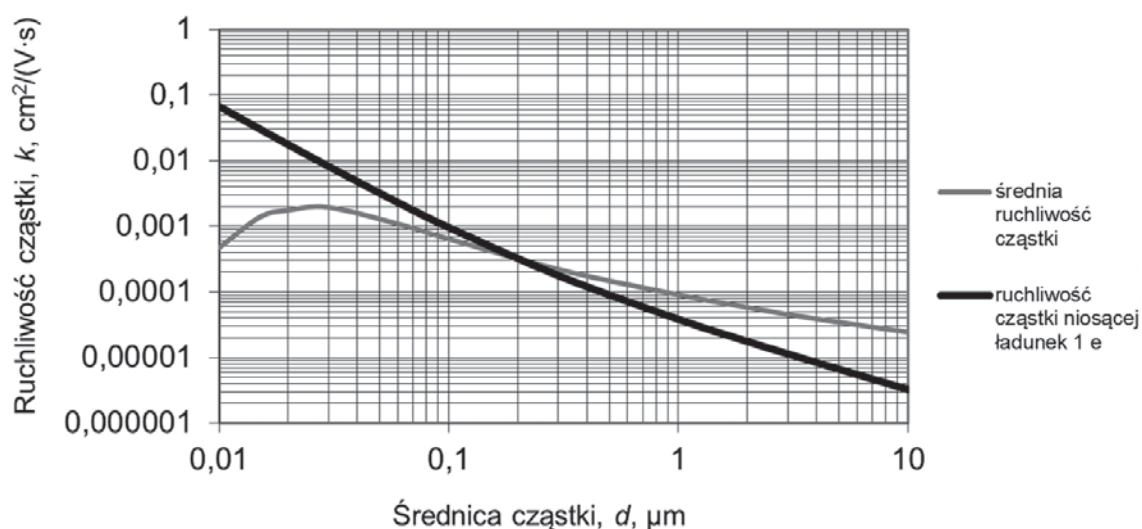
Zjawisko typu dielektroforezy powoduje ruch cząstek dielektrycznych, mających trwałą lub indukowany moment elektryczny, w kierunku wzrastającego gradientu natężenia pola elektrycznego, niezależnie od tego czy jest to pole stałe, czy też zmienne. Cząstki aerozolu, bez względu na ich ładunek (także elektrycznie obojętne), dryfują w kierunku wzrastającego natężenia pola, czyli w praktyce w kierunku ostrzy, cienkich przewodów (np. przewodów linii, ale także krawędzi metalowych dachów, siatek ogrodzeniowych itp.). Zjawisko to jest najbardziej skuteczne przy przewodach linii pod napięciem.

Zjawiskiem typu elektroforezy jest ruch cząstek naładowanych elektrycznie wzdłuż linii sił pola elektrostatycznego lub chwilowo skierowanego w jednym kierunku. W polu zmiennym można oczekiwać jedynie ruchów oscylacyjnych, nadążających za zwrotem wektora natężenia pola. Obecnie trudno stwierdzić, które z tych zjawisk jest dominujące przy liniach wysokiego napięcia.

Pole elektrostatyczne ziemskie ma wartość ok. 130 V/m tylko w warunkach pięknej pogody i jest skierowane do powierzchni ziemi. Powoduje to strącanie naelektryzowanych cząstek fazy dyspersyjnej aerozolu o ładunku dodatnim i zmniejszenie intensywności osiadania cząstek ujemnych. W warunkach zachmurzenia zarówno polaryzacja jak i natężenie ulegają dynamicznym zmianom, przy czym zazwyczaj wartość bezwzględna natężenia pola wzrasta o jeden do dwóch rzędów wielkości. Zjawisko strącania cząstek przez naturalne pole elektrostatyczne dotyczy całej powierzchni ziemi, jednak przy samych przewodach i słupach może być kilkakrotnie silniejsze niż w terenie odległym od linii.

Z przedstawionych badań brytyjskich wynika, że linia ekranuje przestrzeń pod nią i naturalne pole elektrostatyczne zanika. Fakt, że jego natężenie odzyskuje wartość pierwotną na odcinku kilkuset metrów za linią, oznacza, że aerozol przemieszczający się przez linię został dodatkowo naelektryzowany. Ekranowanie i neutralizacja naturalnego pola elektrostatycznego pod linią powoduje, że intensywność strącania cząstek aerozolu na powierzchnię ziemi może być mniejsza niż poza linią, natomiast kilkakrotny wzrost może nastąpić na elementach podporowych i przewodach ochronnych (uziemionych) linii, na skutek koncentracji pola ziemskiego przy tych elementach.

Ze wspomnianych wcześniej badań polskich i australijskich wynika, że należy oczekiwać wzrostu intensywności osadzania się cząstek aerozolu naelektryzowanych dodatnio pod linią, a zwłaszcza po jej stronie zawietrznej.



**Rys. 7-4.** Ruchliwość cząstek aerozolu atmosferycznego,  $k$ ,  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ; linia czarna dotyczy cząstek naładowanych pojedynczym ładunkiem elementarnym, linia szara – cząstek o ładunku średnim dla zrównoważonego układu

Intensywność strącania cząstek aerozolu można oszacować na podstawie wykresu z rysunku 7-4. Średnia prędkość dryfowania cząstek w polu elektrycznym

jest równa iloczynowi ich ruchliwości i natężenia pola elektrycznego. Jak widać z wykresu, te prędkości nie są duże. W polu elektrostatycznym 130 V/m prędkość dryfowania nie przekracza 1 mm/s w przypadku najliczniejszych cząstek o średnicy 100 nm.

Strącanie aerozolu przez zmienne pole elektryczne może zachodzić tylko w miejscu gwałtownego wzrastania jego natężenia, czyli przy przewodach linii, a także przy cienkich metalowych obiektach w pobliżu linii (np. druty siatki ogrodzeniowej, przewód telefoniczny itp.). Średnia siła działająca na cząstkę dielektryczną o promieniu  $x$  i przenikalności elektrycznej  $\varepsilon$  w zmiennym polu elektrycznym  $E$  wynosi (Peek, 1929):

$$\langle F \rangle = 2\pi x^3 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \nabla |E_{sk}|^2 \quad (7-4)$$

gdzie:

$x$  – promień cząstki, m

$\varepsilon_r$  – przenikalność elektryczna względna materiału cząstki.

Wielkość tej siły jest zależna od układu elektrod. W polu jednorodnym siła ta zanika, a największą wartość ma w pobliżu elektrody punktowej lub ostrzowej. Dla układu walcowego maleje z trzecią potęgą stosunku promienia cząstki do odległości od przewodu i jej istotny zasięg w otoczeniu przewodów linii jest rzędu od milimetrów do kilku centymetrów. W przypadku tego mechanizmu strącania ładunek cząstki, ulot z linii, nie ma znaczenia, istotny jest jedynie gradient natężenie pola elektrycznego 50 Hz.

### 7.2.3. Wpływ linii wysokiego napięcia na osadzanie powierzchniowe i wdychanie produktów rozpadu radonu

W literaturze spotyka się doniesienia o możliwym oddziaływaniu elektroenergetycznej linii wysokiego napięcia na rozkład przestrzenny naturalnego promieniowania jonizującego. Teorie te odnoszą się przede wszystkim do promieniowania kosmicznego oraz produktów rozkładu gazu promieniotwórczego – radonu. Wiąże się to ze zjawiskiem ulotu, które w pewnych warunkach może występować na elementach (przewodach, izolatorach itp.) urządzeń energetycznych, w szczególności najwyższych napięć.

#### Hipoteza o ugięciu promieniowania kosmicznego

Promieniowanie kosmiczne, to zarówno promieniowanie korpuskularne jak i elektromagnetyczne, docierające do Ziemi z otaczającej ją przestrzeni kosmicznej. Korpu-

skularna część promieniowania składa się głównie z protonów (90% cząstek), cząstek alfa (9%), elektronów (ok. 1%) i nielicznych cięższych jąder. Promieniowanie docierające bezpośrednio z przestrzeni kosmicznej nazywa się promieniowaniem kosmicznym pierwotnym. Zderzenia cząstek promieniowania pierwotnego z jądrami atomów atmosfery powodują powstawanie strumienia wysokoenergetycznych elektronów, protonów, mionów i fotonów. Jest to tak zwane wtórne promieniowanie kosmiczne. Promieniowanie kosmiczne może stanowić zagrożenie dla zdrowia człowieka.

W 1992 r. Anthony Hopwood opublikował artykuł (Hopwood, 1992), w którym zasugerował, iż zarówno elektryczne jak i magnetyczne pola od linii energetycznej mogą odbijać, uginać (ang. *deflection*) promieniowanie kosmiczne, które przechodzi w pobliżu linii elektroenergetycznej, w taki sposób, by otrzymać efekt skupienia blisko linii. Zmierzył wartości minimalne promieniowania kosmicznego pod linią, natomiast maksymalne kilka metrów od osi linii. Wraz ze wzrostem odległości od linii wartość ta ulegała zmniejszeniu. Hopwood sformułował hipotezę, iż linie elektroenergetyczne WN „koncentrują” promieniowanie kosmiczne w pewnej odległości od linii, co może mieć istotne znaczenie dla zdrowia ludzi. Bardziej wyrafinowane pomiary, przeprowadzone dwa lata później (Burgess i Clark, 1994), nie wykazały tego efektu. Podobnie Martinson i in. (1996) wykonali pomiary dawki w odległościach do 100 m od linii (autorzy nie podali napięcia), na wysokości 1,7 m nad ziemią. Nie wykazały one istotnych różnic w dawkach promieniowania beta, alfa i gamma. Wiarygodność tych wyników jest jednak ograniczona, gdyż część pomiarów wykonywano zimą, co istotnie zmniejszało promieniowanie od gruntu. Także angielska Narodowa Rada Ochrony Radiologicznej (NRPB), by sprawdzić tę hipotezę, przeprowadziła swoje badania. Naukowcy z NRPB próbowali odtworzyć eksperyment Hopwooda, używając nowocześniejszych i bardziej specjalistycznych urządzeń pomiarowych. Mierzyli promieniowanie wokół linii i pod linią testowaną przez Hopwooda (11 kV) oraz pod dodatkową linią (440 kV). Nie potwierdzono wyników otrzymanych przez Hopwooda ani nie znaleziono istotnych różnic wartości mierzonego promieniowania pod linią 440 kV i obok niej (Burgess i Clark, 1994).

W 1997 r., a także w 2000 r. podjęto ponownie próbę potwierdzenia tej hipotezy. W obu badaniach naukowcy doszli do wniosku, iż nie ma przekonujących dowodów na poparcie hipotezy Hopwooda, że linie energetyczne mogą odbijać (koncentrować) promieniowanie kosmiczne do takich wartości, by mogło to stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi (Vistnes i in., 1997). Vistnes i in. mierzyli kosmiczne promieniowanie pod linią energetyczną 300 kV i 420 kV i wokół linii. Zaobserwowali bardzo małe zmiany mocy dawki wraz z odległością od linii. Rozkład nie był jednak symetryczny.



Przeprowadzone obliczenia analityczne sugerują, że możliwe jest słabe oddziaływanie pól elektromagnetycznych na trajektorię cząstek promieniowania kosmicznego, ale ugięcia mogą być niewielkie i mogą dotyczyć tylko cząstek, które przechodzą bardzo blisko przewodów.

Bardziej wyrafinowane modelowanie numeryczne pokazało, że nawet w przypadku elektronów o niskich energiach (cząstek najbardziej podatnych na odkształcenia trajektorii) różnice gęstości strumienia cząstek pod linią i na jej bocznych stronach są mniejsze niż 0,15%, a w odniesieniu do wszystkich cząstek promieniowania kosmicznego są mniejsze niż 0,01%. Efekt jest więc zbyt mały, by mógł być istotny ze względów zdrowotnych (Skedsmo i Vistnes, 2000).

### Wpływ linii wysokiego napięcia na zanieczyszczenia występujące w powietrzu i na produkty rozpadu radonu

Promieniowanie alfa jest podstawowym czynnikiem jonizującym powietrze atmosferyczne przy powierzchni ziemi. Jego głównym źródłem jest gaz promieniotwórczy, radon, i produkty jego rozpadu. Promieniowanie alfa powstaje przy rozpadzie radonu  $^{222}\text{Rn}$  oraz jego pochodnych: RaA ( $^{218}\text{Po}$ ) i RaC ( $^{214}\text{Po}$ ). W tabeli 7-6 podano energie promieniowania i czasy połowicznego rozpadu, a w tabeli 7-7 potencjalną energię alfa przypadającą na radionuklid (Pachocki, 1995).

**Tabela 7-6.** Charakterystyczne parametry promieniowania emitowanego przez radon i krótkożyciowe produkty jego rozpadu

Radionuklid	Okres połowicznego rozpadu	Energia promieniowania:					
		alfa		beta		gamma	
		MeV	%	MeV	%	MeV	%
$^{222}\text{Rn}$	3,82 dnia	5,49	100	–	–	–	–
$^{218}\text{Po}$	3,05 min	6,00	100	–	–	–	–
$^{214}\text{Pb}$	26,8 min	–	–	1,02	6	0,35	37
		–	–	0,70	42	0,30	19
		–	–	0,65	48	0,24	8
$^{214}\text{Bi}$	19,9 min	–	–	3,27	18	0,61	46
		–	–	1,54	18	1,77	16
		–	–	1,51	18	1,12	15
$^{214}\text{Po}$	164 $\mu\text{s}$	7,69	100	–	–	–	–

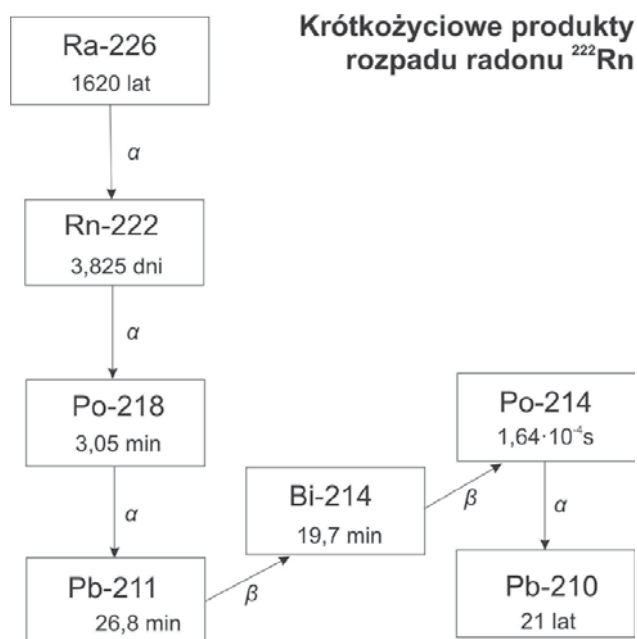
W 1983 r. Huertas i Fontan zbadali metodą spektrometrii masowej skład chemiczny jonów lekkich wytwarzanych dwoma różnymi sposobami: metodą wyładowania koronowego oraz z zastosowaniem źródła promieniowania alfa (radionuklid ameryk), (Huertas i Fontan, 1983). W przypadku jonów dodatnich uzyskali dla obu

źródeł jonizacji stabilne formy w postaci klastrow  $H_3O^+ \cdot (H_2O)_n$ . Natomiast jony ujemne generowane elektrycznie różniły się od generowanych przez promieniowanie alfa.

**Tabela 7-7.** Potencjalna energia alfa na atom i jednostkę aktywności

Radionuklid	Okres połowicznego zaniku	Potencjalna energia alfa:			
		na atom		na jednostkę aktywności	
		MeV	$10^{-12}$ J	Me·V·Bq <sup>-1</sup>	$10^{-10}$ J·Bq <sup>-1</sup>
Pochodne radonu <sup>222</sup> Rn:					
<sup>218</sup> Po	3,05 min	13,69	2,19	3 615	5,79
<sup>214</sup> Pb	26,8 min	7,69	1,23	17 840	28,6
<sup>214</sup> Bi	19,9 min	7,69	1,23	13 250	21,2
<sup>214</sup> Po	164 μs	7,69	1,23	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Razem (w równowadze) na Bq radonu:				34 710	55,6

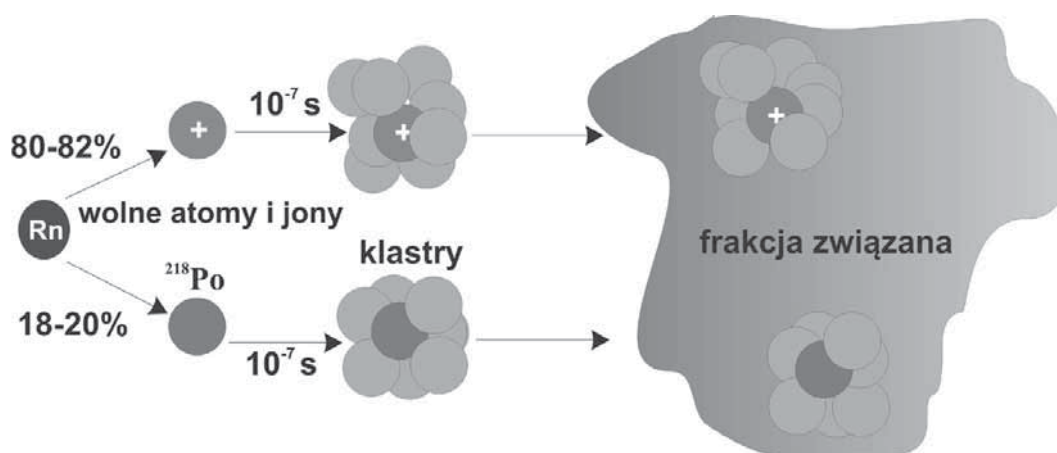
Radon <sup>222</sup>Rn powstaje w szeregu promieniotwórczym uranowo-radowym z rozpadu radu <sup>226</sup>Ra. Jest powszechnie występującym w środowisku gazem szlachetnym, pozbawionym zapachu i smaku, niereagującym chemicznie. Gęstość radonu w normalnych warunkach wynosi 9,82 kg/m<sup>3</sup>, jest on zatem ok. 7,6 razy cięższy od powietrza. Łatwo rozpuszcza się w wodzie, a jeszcze lepiej w alkoholach i innych rozpuszczalnikach organicznych. W wyniku ich podgrzania do temperatury wrzenia jest całkowicie usuwany (stąd woda może łatwo emanować rozpuszczony w niej radon, np. podczas gdy korzystamy z prysznica w mieszkaniu). Radon ulega promieniotwórczemu rozpadowi na kilka kolejnych radionuklidów będących ciałami stałymi. Krótko żyjące produkty rozpadu radonu: polon-218, ołów-214, bizmut-214



i polon-214 (rys. 7-5), występują początkowo w powietrzu jako niezwiązane, dodatkowo naładowane jony, które w krótkim czasie, rzędu  $10 \div 100$  s, łączą się z cząstkami pyłu, tworząc promieniotwórcze areozole.

**Rys. 7.5.** Krótkożyciowe produkty rozpadu radonu <sup>222</sup>Rn; fragment naturalnego szeregu promieniotwórczego – seria uranowo-radowa

Zachowanie powstających z radonu produktów rozpadu radonu  $^{222}\text{Rn}$  jest bardzo zróżnicowane. Ich migracja w powietrzu, stan i losy są uwarunkowane ich ładunkiem elektrycznym i rozkładem pola elektrycznego oraz pól elektrostatycznych wewnątrz pomieszczeń, stopniem i rodzajem zapylenia oraz innymi czynnikami. Produkty te tworzą dynamiczny układ z ośrodkiem, w którym powstają. W powietrzu oprócz gazów znajdują się cząstki stałe i ciekłe fazy dyspersyjnej, do których mogą się przyłączyć produkty rozpadu radonu. Aeroszol atmosferyczny jest zawieszoną złożoną z ciekłych i stałych cząstek o rozmiarach od  $0,001\ \mu\text{m}$  do ponad  $100\ \mu\text{m}$ . Większe obiekty nie utrzymują się przez wystarczająco długi czas w powietrzu, nie można więc ich nazywać „zawieszonymi”. Około 80-82% izotopów polonu, powstających w wyniku rozpadu radonu, występuje w postaci jonów dodatnich (Reineking i Porstendörfer, 1986). W ciągu ok.  $10^{-7}\ \text{s}$  od momentu powstania większość z nich tworzy, wraz z molekułami pary wodnej i gazów, tzw. klastry. Klastry i wolne atomy to tzw. frakcja wolna, która w czasie  $1 \div 100\ \text{s}$  łączy się z większymi cząstkami aerozoli o rozmiarach najczęściej do  $1\ 000\ \text{nm}$  ( $1\ \mu\text{m}$ ). Tak utworzona formacja nosi nazwę frakcji związanej (rys. 7-6), (Skubacz, 2006).



**Rys. 7.6.** Proces tworzenia się frakcji wolnej i frakcji związanej podczas rozpadu radonu  $^{222}\text{Rn}$  (Skubacz, 2006)

Ważnym czynnikiem wpływającym na usuwanie produktów rozpadu radonu z powietrza jest ich depozycja na powierzchniach różnych przedmiotów (depozycja powierzchniowa). Składają się na nią takie procesy, jak sedymentacja grawitacyjna, wychwytywanie inercyjne i bezpośrednie oraz dyfuzja (Skubacz, 2006).

Jak już nadmieniono, zarówno radon jak i niektóre produkty jego rozpadu, są emiterami cząstek alfa. Wdychanie radonu i aerozoli promieniotwórczych wraz z powietrzem powoduje napromieniowanie układu oddechowego. Rozpad alfa pochodnych radonu: polonu-218 i polonu-214, jest głównym źródłem dawek promieniowania jonizującego, jakie człowiek otrzymuje przez drogi oddechowe. W ocenie

ekspozycji na pochodne radonu szczególnie ważna jest znajomość udziału produktów jego rozpadu niezwiązanych z aerozolami oraz rozmiary cząstek aerozolu.

Otrzymane dawki promieniowania alfa mogą się manifestować zwiększoną zapadalnością na nowotwory płuc i krtani, ujawniające się w populacji po wielu latach ekspozycji na radon. Jest to prawdopodobnie druga po paleniu papierosów przyczyna zachorowań na raka płuc w ogólnej populacji. Według Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (EPA) ekspozycja na radon powoduje każdego roku w USA od 15 000 do 22 000 zgonów na skutek raka płuc. Według badań przeprowadzonych w 13 krajach europejskich radon występujący w mieszkaniach jest przyczyną 9% zgonów z powodu raka płuc i 2% zgonów z powodu wszystkich przypadków raka w Europie (Darby i in., 2005).

Dla osób przebywających w mieszkaniach, w których stężenie radonu przekracza  $100 \text{ Bq/m}^3$ , palenie tytoniu i/lub przebywanie w dymie tytoniowym stwarza poważne ryzyko zachorowania na raka płuc. Ryzyko palących 15 ÷ 25 papierosów dziennie jest 25,8 (21,3 ÷ 31,2) razy większe od ryzyka, jakie dotyczy osób nigdy niepalących. Należy jednocześnie podkreślić, iż duże stężenie radonu w powietrzu nie stwarza rzeczywistego ryzyka zachorowania na nowotwory inne niż nowotwory płuc.

Głównym źródłem radonu w atmosferze jest rad  $^{226}\text{Ra}$  obecny w litosferze (glebie i skałach). Mniej istotnymi źródłami radonu w powietrzu są rośliny, wody gruntowe, oceany itp. Udział poszczególnych rodzajów źródeł w ogólnej ilości radonu przedstawiono w tabeli 7-8. Zakłada się przy tym, że tempo wydzielania radonu przez łądy wynosi  $0,02 \text{ Bq/(m}^2\cdot\text{s)}$ , a przez oceany  $0,00007 \text{ Bq/(m}^2\cdot\text{s)}$ . Całkowite tempo produkcji radonu jest rzędu  $10^{20} \text{ Bq/rok}$ .

**Tabela 7-8.** Źródła występowania radonu w atmosferze

Źródła radonu	Produkcja radonu na rok, $10^6 \text{ Bq}$
Gleba	9 000
Rośliny i wody gruntowe	< 2 000
Oceany	90
Budynki *)	3
Gaz naturalny	0,02
Węgiel kamienny	0,002

\*) Podana w tej pracy wartość dla budynków jest oszacowana przy założeniu liczby  $10^9$  obiektów.

Źródłami radonu o lokalnym znaczeniu są odpady kopalniane powstające podczas wydobywania i rozdrabniania uranu i fosforanów oraz siłownie geotermiczne. Tempo wydzielania radonu z tych odpadów zależy od ilości zawartego w nich radu i od współczynnika emanacji (stosunek ilości radonu wydzielonego do radonu zgromadzonego w obiekcie) oraz od sposobu regenerowania powierzchni ziemi na składowisku. Stę-

żenie radonu w powietrzu przy powierzchni ziemi jest pochodną zawartości radu-226 w glebie. Należy podkreślić, że przede wszystkim w skałach magmowych obserwuje się dużą zawartość radu-226 (granity – 59,2 Bq/kg, dioryty – 22,9 Bq/kg, bazalty – 11,5 Bq/kg), większą niż w skałach pochodzenia osadowego (wapienie – 27,8 Bq/kg, piaskowce – 18,5 Bq/kg), poza łupkami ilastymi (44,4 Bq/kg).

Stężenia naturalnych radionuklidów (w tym Ra-226) w glebie mogą ulegać zmniejszeniu, w stosunku do ich wartości dla skał, w wyniku procesów rozpuszczania i wymywania przez wody podskórne, nasycenia gleby wilgocią i substancjami organicznymi. Mogą też się zwiększać na skutek absorpcji w glebie i przechodzenia do gleby radionuklidów z substancjami ją zasilającymi. Promieniotwórczość gleby zależy więc w dużym stopniu od jej porowatości, występowania w niej substancji organicznych, przepływu wód itp. Stwierdzono, że w glebach darniowo-bielicowych, bielicowych i bagnistych naturalne stężenie Ra-226 jest małe (6,3 ÷ 15,2 Bq/kg), podczas gdy w glebach typu czarnoziemów i leśnych duże (17,8 ÷ 31,5 Bq/kg). W Polsce średnia wartość stężenia radu 226Ra w powierzchniowej warstwie gleby wynosi 24,9 Bq/kg.

Stężenie radonu w powietrzu jest największe tuż przy powierzchni ziemi. Po wydostaniu się do atmosfery następuje jego bardzo szybkie rozprzestrzenianie się, a w konsekwencji natychmiastowy spadek stężenia. Stężenie radonu (emisja z podłoża) zależy nie tylko od miejsca (rodzaju podłoża), lecz również od warunków atmosferycznych. Szczególne znaczenie mają: siła i kierunek wiatru, ciśnienie atmosferyczne, lokalne turbulencje powietrza, wilgotność powierzchniowej warstwy gleby, występowanie pokrywy śnieżnej oraz lokalnych przymrozków czy głębokich zamrożeń ziemi po długotrwałych mrozach.

Stężenie radonu w atmosferze podlega zarówno zmianom sezonowym, jak i dobowym. Maksymalne wartości obserwuje się w okresie letnim (lipiec-sierpień), minimalne zimą (w lutym nawet 3 razy mniejsze). Maksyma zmian dobowych wypadają ok. północy, minima w południe.

Średnie roczne stężenie radonu w powierzchniowych warstwach powietrza atmosferycznego wynosi ok. 5 Bq/m<sup>3</sup>. Nad kontynentami wartość ta wynosi w przybliżeniu 10 Bq/m<sup>3</sup>, natomiast nad wyspami i brzegiem mórz obserwowany poziom jest 2-4 razy niższy. Na terenie Polski wartości średnich rocznych stężeń <sup>222</sup>Rn w powietrzu na wysokości 1 m nad powierzchnią ziemi, w zależności od miejsca pomiaru, wynosiły od 0,7 Bq/m<sup>3</sup> do 12,6 Bq/m<sup>3</sup>, a średnia 5,1 Bq/m<sup>3</sup>.

W 1996 r. i ponownie w 1999 r. grupa prof. Denisa Henshawa z Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Bristolu w Wielkiej Brytanii opublikowała prace (Henshaw, 1996a,b) sugerujące, iż pole elektryczne wytworzone przez linie energetyczne wysokiego napięcia może znacząco zwiększyć stężenie i osadzanie pro-



duktów rozpadu radonu w sąsiedztwie linii. Z kolei wdychanie powietrza o większym stężeniu radonu i jego produktów rozpadu w pobliżu linii zwiększa ryzyko zachorowania na raka płuc. Ta teoria jest czasem nazywana hipotezą Henshawa. Należy jednak podkreślić, iż na podstawie innych przeprowadzonych badań nie można było wykazać, że linie elektroenergetyczne mogą znacząco zwiększać lokalne stężenia radonu.

Miles i Algar (1997) mierzyli stężenie produktów rozpadu radonu w silnym i słabym polu elektrycznym pochodzącym od linii WN 400 kV. Nie stwierdzili istotnych różnic. W innym badaniu McLaughlin i Gath (1999) badali zachowanie radonu w powietrzu w sąsiedztwie linii 400 kV, podczas jej pracy i gdy była wyłączona. Stwierdzono, że pola wytwarzane przez linię nie zwiększały stężenia produktów rozpadu radonu pod linią czy w jej pobliżu. Zwrócono także uwagę na fakt, że jeśli nawet stężenie radonu i jego produktów rozpadu nieznacznie wzrasta w pobliżu linii elektroenergetycznej, to ze względu na czas przebywania i obserwowane poziomy stężenia wzrost ryzyka nowotworów płuc jest nieistotny w stosunku do ryzyka wynikającego z występowania radonu w powietrzu w mieszkaniach i biurach (stężenie radonu przeciętnie ok. 4 razy większe).

Białaczka dziecięca może być indukowana na przykład przez zanieczyszczenia komunikacyjne. Na tej podstawie oraz opierając się na sugestii, że w pobliżu linii elektroenergetycznych może wzrastać osadzanie naładowanych elektrycznie zanieczyszczeń w płucach, sugerowano, iż zjawisko to może tłumaczyć związek między występowaniem białaczki u dzieci a ich zamieszkiwaniem w pobliżu wysokonapięciowych linii elektroenergetycznych (Fews i in., 1999).

Draper i in. (2005) stwierdzili zwiększone ryzyko białaczki u mieszkańców wraz ze zmniejszaniem się odległości od energetycznych linii przesyłowych w Wielkiej Brytanii. Omawiając swoje wyniki, rozważali hipotezę Henshawa, lecz nie znaleźli dowodów na poparcie zaproponowanego przez niego mechanizmu. Także kolejne badania naukowe nie potwierdziły wyników badań Henshawa. Według oceny autorytatywnych ciał (grup) zajmujących się tym zagadnieniem nie istnieją przekonujące dowody, które wskazywałyby, że długotrwałe przebywanie w sąsiedztwie linii energetycznych wysokiego napięcia zwiększa ryzyko indukcji wszelkiego rodzaju nowotworów poprzez zwiększenie w ich pobliżu stężenia radonu i jego produktów rozpadu.

### 7.3. Czynniki warunkujące poziom zagrożenia zdrowia

Problematyka biologicznego znaczenia zjawisk zachodzących przy liniach wysokiego napięcia nie jest jednoznacznie rozstrzygnięta. Rozważenia wymagają następujące czynniki:

- zwiększone stężenie aerojonów lekkich
- zwiększony poziom stężenia ozonu
- elektryzacja dyfuzyjna i polowa fazy rozproszonej aerozolu
- duże, o dużym gradiencie, natężenie pola elektrycznego zmiennego przy przewodach linii
- zaburzenia w rozkładzie naturalnego ziemskiego pola elektrostatycznego.

Odpowiedź na część tych pytań jest możliwa w odniesieniu do pracowników przebywających na ziemi, w otoczeniu linii, natomiast na większość z nich nie można dać jednoznacznej odpowiedzi w przypadku pracowników znajdujących się na masztach i na przewodach. Wynika to głównie z braku odpowiednich pomiarów na wysokości przewodów.

W świetle dostępnych wyników badań i metaanaliz (por. Charry i Kavet, 1987) potencjalnego wpływu aerojonów lekkich na organizm człowieka oraz na jego samopoczucie i sprawność psychofizyczną, panuje pogląd, że takiego wpływu nie ma lub jest on niespecyficzny i nieistotny. Obserwuje się wyraźne zanikanie zainteresowania tą problematyką wśród badaczy. Wielkości stężeń jonów lekkich mierzone przy liniach, przy powierzchni ziemi mieszczą się w zakresie zmienności stężenia w warunkach naturalnych ( $0 \div \text{ok. } 5\ 000/\text{cm}^3$ ). W warunkach pracy na przewodach linii stężenie jonów w powietrzu jest prawdopodobnie istotnie większe, jednak w obecności silnego pola elektrycznego (natężenie do kilkuset kilowoltów na metr) prędkość dryfu jonów jest rzędu kilkudziesięciu metrów na sekundę, dlatego praktycznie nie jest możliwe wprowadzanie ich do dróg oddechowych wraz z wdechem. Natomiast jony te mogą intensywnie osiadać na skórze pracownika, podlegając natychmiastowej neutralizacji i nie wnikając do wnętrza ciała.

Ozon, jako silny utleniacz, działa drażniąco i uszkadzająco na błony śluzowe oczu, gardła i dróg oddechowych. Jego stężenie wg polskiego prawa podlega ograniczeniu. Najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) na stanowiskach pracy w Polsce wynosi  $0,2\ \text{mg}/\text{m}^3$ . Przeprowadzone w rozdziale 7.1.2 oszacowanie możliwego stężenia ozonu przy przewodach linii WN wykazało, że przekroczenie tej wartości w otwartej przestrzeni jest mało prawdopodobne. Natomiast w budynkach, w których mogą znajdować się przewody WN (np. rozdzielnie), takie przekroczenie jest prawdopodobne i powinno być zbadane.

Zwiększone stężenie jonów lekkich i występowanie silnego pola elektrycznego przy przewodach linii powoduje dodatkowe ładowanie elektryczne cząstek aerozolu. Naelektryzowany aerol jest skuteczniej strącany przez pole elektrostatyczne. Również jego depozycja na obiektach przewodzących, na skutek zjawiska lustrzanego odbicia ładunku, jest istotnie większa (Grabarczyk, 2006a,b). W warunkach pracy przy liniach WN naturalne ziemskie pole elektrostatyczne ulega zaburzeniu z dwóch powodów. Linia działa jak ekran elektrostatyczny i bezpośrednio pod nią natężenie pola jest znacznie mniejsze niż natężenie pola naturalnego. Zwiększonej depozycji aerozolu w odkształconym ziemskim polu elektrostatycznym można się spodziewać na elementach metalowych (słupach i przewodach linii), aczkolwiek poziom tego wzrostu jest prawdopodobnie niewielki, do kilku razy w stosunku do naturalnego strącania na powierzchnię ziemi, poza linią. Prawdopodobnie mechanizm typu dielektroforezy może powodować istotny wzrost osadzania się fazy dyspersyjnej, w tym izotopów promieniotwórczych, na przewodach linii oraz wzrost ich stężenia w bezpośrednim sąsiedztwie przewodów. Niestety brakuje danych pomiarowych na ten temat.

Zwiększonej depozycji aerozolu można się spodziewać przy powierzchni ziemi po stronie zawietrznej, jednak przy zmiennych kierunkach wiatru ilość strąconych cząstek aerozolu może być zwiększona po obu stronach linii. Fews i in. (1999b), stwierdzili ok. 2,4-krotny wzrost ilości produktów rozpadu radonu oraz 1,2-krotny wzrost ilości zanieczyszczeń chemicznych pod linią. Produkty rozpadu radonu nie są trwałe (czas połowicznego rozpadu od 3,82 dnia dla radonu do zaledwie 0,16 ms dla polonu-214), zatem nie można oczekiwać narastania poziomu promieniowania w czasie. W przypadku linii działającej (pod napięciem) trudno jest stwierdzić, który z mechanizmów depozycji dominuje. Można by to sprawdzić przez porównanie depozycji pod dwoma takimi samymi liniami, znajdującymi się w tym samym regionie geologicznym – jedną czynną, a drugą wyłączoną.

### **Hipoteza o zwiększonej depozycji aerozolu w drogach oddechowych**

Sugerowane mechanizmy oddziaływania linii elektroenergetycznej na zanieczyszczenia występujące w powietrzu zostały opisane w kilku publikacjach (Fews i in., 1999a,b; Fews i in. 2002; Henshaw i in., 1996a,b). Obszar układu oddechowego, w którym deponowane są cząstki (zanieczyszczenia), zależy od czynników fizycznych, takich jak wielkość, kształt i gęstość zanieczyszczenia, a także od wielkości i rodzaju ładunku. Stopień wpływu elektryzacji aerozolu na skutek ulotu na zdrowie ludzi zależy m.in. od wzrostu ilości deponowanego zanieczyszczenia, stopnia, w jakim to zanieczyszczenie jest przyczyną chorób, oraz liczby osób poddanych takiemu narażeniu (ekspozycji) i ich właściwości osobniczych.

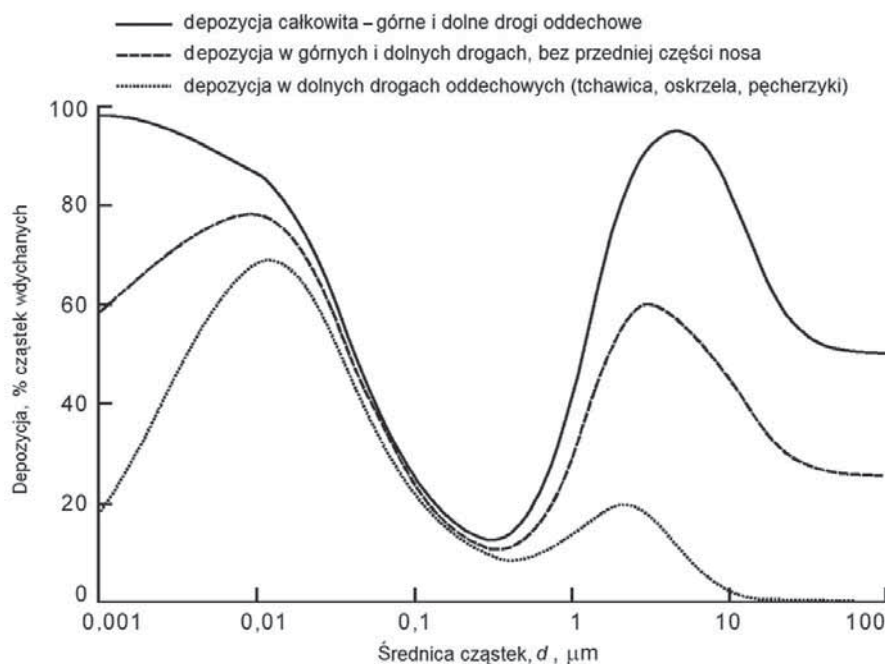
W pobliżu linii elektroenergetycznej ludzie mogą być narażeni na dodatnio naładowane cząstki zanieczyszczeń, których ładunek elektrostatyczny może zwiększyć możliwości osadzania w układzie oddechowym człowieka. Szacuje się, iż znaczący efekt występuje w wypadku zanieczyszczeń (cząstek) o średnicy ok.  $0,1 \div 1 \mu\text{m}$ , podczas gdy normalnie w tym przypadku depozycja w płucach jest bardzo mała i wynosi ok. 10%. Teoretycznie depozycja w płucach przez naładowanie cząstek zanieczyszczeń może być zwiększona  $3 \div 10$  razy, w zależności od wielkości cząstek. Naładowanie cząstek najmniejszych (o średnicy mniejszej niż  $0,1 \mu\text{m}$ ) może także zmniejszyć prawdopodobieństwo ich osadzania w płucach, ponieważ w większym procencie zostaną one zdeponowane w górnych drogach oddechowych. Według Henshawa i Fewsa ludzie przebywający po stronie zewnętrznej linii elektroenergetycznej, w związku z wyładowaniami koronowymi, będą mieć o  $20 \div 60\%$  mniej zdeponowanych zanieczyszczeń w płucach niż osoby znajdujące się po wewnętrznej stronie linii.

### Analiza hipotezy

Zwiększony ładunek elektryczny cząstek aerozolu może wpływać na zwiększoną ich depozycję w drogach oddechowych. Liczne badania na ten temat przeprowadzili Cohen i in. (1987, 1990, 1995, 1998) oraz Yu i Chandra (1978). Badania te, zwłaszcza na modelach i odlewach różnych fragmentów dróg oddechowych, potwierdziły istotność efektu odbić zwierciadlanych i istotny wzrost depozycji w przypadku cząstek naelektryzowanych. Największy wzrost dotyczy cząstek małych, o średnicach rzędu kilkudziesięciu nanometrów; Cohen osiągnęła ok. 5-krotnie większą depozycję cząstek naelektryzowanych w stosunku do obojętnych. Taki wzrost w warunkach środowiskowych, zwłaszcza na terenach przemysłowych, mógłby istotnie zwiększyć zapadalność na choroby sercowo-naczyniowe i nowotworowe. Jednak mechanizmów depozycji aerozolu w drogach oddechowych jest kilka. Są to: dyfuzja, sedymentacja, zahaczanie o ścianki dróg oddechowych, bezwładność. Udział poszczególnych mechanizmów decyduje o wielkości depozycji w poszczególnych odcinkach dróg oddechowych, zwłaszcza cząstek o średnicach w zakresie do 10 nm i powyżej 1000 nm. Zależność depozycji w drogach oddechowych od rozmiaru cząstek pokazano na rysunku 7-7.

Dlatego potencjalne znaczenie dodatkowego czynnika, jakim byłaby depozycja wymuszona siłami elektrostatycznymi, mogłoby wystąpić głównie w zakresie rozmiarów cząstek od 100 nm do 1 000 nm, gdyż normalnie w tym zakresie depozycja w dolnych drogach oddechowych (w tym w płucach) jest stosunkowo mała i wynosi ok. 10%. Jednak dodatkowo jest to zakres średnic, w którym ruchliwość naelektryzowanych (aż do poziomu nasycenia) cząstek aerozolu wyka-

**Rys. 7-7.** Depozycja w drogach oddechowych kulistych cząstek aerozolu o jednostkowej gęstości, wdychanych całą dobę przez osobę dorosłą; obliczone dla modelu HRTM (na podstawie *Particle Deposition ...*, 2004)



zuje minimum. Nawet skuteczność elektrofiltrów, o poziomie naelektryzowania bliskim nasyceniu, w zakresie rozmiarów od ok. 200 nm do 1000 nm jest kilkukrotnie mniejsza niż w wypadku cząstek mniejszych lub większych. Badania teoretyczne i eksperymentalne prowadzone przez Grabarczyka (2006a, 2008) nad potencjalnym wzrostem depozycji świeżych, silnie naelektryzowanych (na skutek procesów technologicznych) pyłów przemysłowych (ładunek od kilkudziesięciu do ok. 100 e/cząstkę), wykazały, że możliwy jest wzrost depozycji o 5% w zakresie rozmiarów  $0,3 \div 0,4 \mu\text{m}$ , o 9% w zakresie  $0,5 \div 0,6 \mu\text{m}$  i o 30% w zakresie  $0,8 \div 1 \mu\text{m}$ . Stanowi to odpowiednio 20%, 32% i 50% skuteczności depozycji bez udziału cząstek naelektryzowanych. Jednak największy wzrost depozycji dotyczy górnych dróg oddechowych, w których nie dochodzi do wchłaniania wdychanych cząstek aerozolu. W przypadku linii elektroenergetycznych należy wziąć poprawkę na prawdopodobnie znacznie mniejsze naelektryzowanie aerozolu oraz na małe jego stężenie w otwartej przestrzeni. Większość cząstek aerozolu jest nieszkodliwa i usuwana przez aparat śluzowo-rzęskowy układu oddechowego. Znaczenie dla zdrowia mogłyby mieć cząstki azbestu i niebezpiecznych zanieczyszczeń chemicznych. Ocena istotności niewielkiego (w stosunku do innych mechanizmów) wzrostu depozycji na skutek elektryzacji cząstek jest złożona i brak jeszcze wielu danych. Jednak według raportu NRPB (*Particle deposition...*, 2004) taki wpływ, jeżeli istnieje, jest bardzo mały.

Większość opisanych tu badań dotyczyła naziemnego otoczenia linii lub co najwyżej budynków w jej otoczeniu. Nie ma jednak, z oczywistych powodów technicznych, wyników badań prowadzonych przy samych przewodach, które mogłyby



być przydatne do oceny zagrożenia pracowników wykonujących prace na masztach i przewodach. Problem wymaga dalszych badań.

Depozycja cząstek aerozolu na skórze ludzi przebywających przy liniach, według wspomnianego raportu NRPB, jest pomijalna w stosunku do depozycji spowodowanej wiatrem i może być pominięta.

W przypadku radonu istnieje duże prawdopodobieństwo, że produkty jego rozpadu, będące ciałami stałymi naelektryzowanymi dodatkowo, mogą tworzyć naelektryzowane dodatkowo aerozole i być strącane lub skupiane w ograniczonej przestrzeni, głównie przez pole elektrostatyczne przy powierzchni obiektów przewodzących. Jonizacja powietrza w linii może dodatkowo zwiększać ładunek elektryczny cząstek aerozolu, w tym cząstek zawierających izotopy promieniotwórcze, i zwiększać ich stężenie na powierzchni ziemi i obiektach sąsiadujących z linią. Zawartość radioizotopów w aerozolu nie wpływa na ich osadzanie się na skutek dielektroforezy, jednak wszelkie strącanie aerozolu powoduje zagęszczanie się jego składników, w tym wzrost stężenia izotopów i wzrost natężenia promieniowania. Mechanizmy te w zasadzie są potwierdzone w badaniach polowych, w otoczeniu linii WN; Fews i in. (1999b) stwierdzili ok. 2,4-krotny wzrost ilości produktów rozpadu radonu oraz 1,2-krotny wzrost ilości zanieczyszczeń chemicznych pod linią.

## 7.4. Podsumowanie

Obecny stan wiedzy nie pozwala na jednoznaczne rozstrzygnięcie, czy praca polegająca na bezpośredniej obsłudze sieci elektroenergetycznych, zwłaszcza w otoczeniu linii wysokiego napięcia lub na liniach, może powodować istotne skutki zdrowotne, wynikające z elektrycznej jonizacji powietrza. Dotychczas nie udowodniono wpływu jonów klastrowych generowanych w powietrzu przez wyładowania elektryczne i promieniowanie jonizujące na stan zdrowia i wydolność psychofizyczną człowieka. Oszacowane w tym rozdziale stężenie ozonu generowanego na skutek ciągłych wyładowań ulotowych przy powierzchni przewodów pod napięciem, w otwartej przestrzeni, jest znacznie mniejsze od wartości NDS (najwyższe dopuszczalne stężenie), która w Polsce wynosi  $0,15 \text{ mg/m}^3$ . Elektryzowanie cząstek aerozolu powietrznego na skutek jonizacji powietrza przy powierzchni przewodów pod napięciem może powodować nieznaczny (do kilku procent) wzrost depozycji aerozolu w drogach oddechowych pracowników, prawdopodobnie biologicznie nieistotny, z wyjątkiem sytuacji, gdy w powietrzu są znaczne ilości pyłu azbestowego lub linia

znajduje się na obszarze o bardzo wysokim poziomie wydzielania radonu z ziemi (tereny górskie). Otwarty pozostaje problem związków depozycji zanieczyszczeń radioaktywnych, w tym produktów rozpadu radonu, z występowaniem silnego zmiennego pola elektrycznego, jak również skupiania linii sił naturalnego pola elektrycznego przy powierzchni instalacji elektroenergetycznych.

## Bibliografia

- Abdel-Salm M., Mufti A. (1998) *Analysis of corona losses on monopolar DC transmission lines*. Electric Power Systems Research, t. 44, 145-154.
- Agrasińska H. (1996) *Modernizacja i przebudowa linii 220 kV w aspekcie wpływów na środowisko*. [W:] III Konferencja Naukowo-Techniczna „Pola Elektromagnetyczne a Energetyka i Środowisko”. Bielsko-Biała 29-30 października 1996.
- Bracken T.D., Senior R.S., Bailey W.H. (2005) *DC electric fields from corona-generated space charge near AC transmission lines*. IEEE Trans Power Delivery, 20(2): 1692-1702.
- Brandvold D.K., Martinez P., Hipsh R. (1996) *Field measurements of O<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O produced from corona discharge*. Atmospheric Environment, t. 30, nr 6, 973-976.
- Burgess P., Clark M. (1994) *Cosmic radiation and powerlines*. Radiol. Prot. Bull., 151: 17-19.
- Cherry J.M., Kavet R.I. (1987) *Air Ions: Physical and biological aspects*. Boca Raton, CRC Press, Inc.
- Chen J. (2002) *Direct current corona-enhanced chemical reactions*. A thesis submitted to the Faculty of The Graduate School of The University of Minnesota.
- Cohen B.S. (1987) *Deposition of ultrafine particles in the human tracheobronchial tree: A determination of those from radon daughters*. [W:] Radon and its decay products: Occurrence, Properties and Health Effects. Red. P. Hopke. Washington, DC 20036, American Chemical Society, 475-486.
- Cohen B.S., Asgharian B. (1990) *Deposition of inhaled charged ultrafine particles in the upper airways: An empirical analysis*. J. Aerosol Sci., t. 21, 789-797.
- Cohen B.S. i in. (1995) *Deposition of inhaled charged ultrafine particles in a simple tracheal model*. J. Aerosol Sci., t. 26, 1149-1160.
- Cohen B.S. i in. (1998) *Deposition of charged particles on lung airways*. Health Phys., t. 74, 554-560.
- CRC Handbook of Chemistry and Physics* (1987). Red. R.C. Weast i in. Wyd. 68. Boca Raton, CRC Press. Bristol. Adam Hilger.
- Cross J.A. (1987) *Electrostatics: Principles, Problems and Applications*. Bristol, Adam Hilger.
- Darby S. i in. (2005) *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. BMJ 330(7485), s. 223.

- Draper G. i in. (2005) *Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study*. Brit. Med. J., 330, 1290-1293.
- Eichmeier J., Herden P. (1968) *Beweglichkeitsspektren künstlich erzeugter atmosphärischer Ionen im Klein- und Mittelionenbereich*. Zeitschrift für angewandte Physik, t. 24, 360-364.
- Fews A.P. i in. (1999a) *Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols*. Int. J. Radiat. Biol., t. 75, 1523-1531.
- Fews A.P. i in. (1999b) *Increased exposure to pollutant aerosols under high voltage power lines*. Int. J. Radiat. Biol., t. 75, 1505-1521.
- Fews A.P. i in. (2002) *Modification of atmospheric DC fields by space charge from high-voltage power lines*. Atmosph. Res., 63: 271-289.
- Grabarczyk Z.J. (2000) *Jonizacja powietrza w środowisku życia i pracy*. Warszawa, CIOP.
- Grabarczyk Z.J. (2006a) *Depozycja naelektryzowanych cząsteczek aerozolu w drogach oddechowych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 12, 72-75.
- Grabarczyk Z.J. (2006b) *Discussion on the influence of the electric charge of aerosol particles on their deposition in human respiratory system*. [W:] 4th International Workshop „Biological Effects of EMFs”, 16-20 October, Crete, Greece. University of Ioannina, Institute of Informatics and Telecommunications NCSR “Demokritos”.
- Grabarczyk Z.J. (2008) *The method of the measurement of mean value of the electric charge of aerosol particles 0.3 – 10 μm*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 12, 167-169.
- Grabarczyk Z., Berliński J. (2005) *Charging of atmosphere aerosols by AC HV power lines*. J. Electrostat., t. 63, 755-759.
- Henshaw D.L. i in. (1996a) *Author's reply to letter to the editor*. Int. J. Radiat. Biol., 69(5): 653-657.
- Henshaw D.L. i in. (1996b) *Enhanced deposition of radon daughter nuclei in the vicinity of power frequency electromagnetic fields*. Int. J. Radiat. Biol., 69(1): 25-38.
- Hopwood A. (1992) *Natural radiation focused by power lines: new evidence*. Electronics World & Wireless World, (November): 92, 912-915.
- Hõrrak U. (2001) *Air ion mobility spectrum at rural area*. Rozprawa doktorska. University of Tartu.
- Huertas M., Fontan N. (1983) *On the nature of tropospheric negative ions, and on the influence of various polluting gases on the nature of tropospheric positive and negative ions*. [W:] Proceedings in atmospheric electricity. Hampton, Virginia, A, Deepak Publishing.
- Informator. Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka* (2008). Red. M. Szuba. Wyd. 5. Warszawa, PSE-Operator S.A.
- Jayaratne E.R., J-Fatokum F.O., Morawska L. (2008) *Air ion concentrations under overhead high-voltage transmission lines*. Atmospheric Environment, t. 42, 1846-1856.
- J-Fatokum F.O. i in. (2008) *Characterization of the atmospheric electrical environment near a corona ion-emitting source*. Atmospheric Environment, t. 42, 1607-1616.

- Kogelschatz U., Eliasson B. (1995) *Ozone generation and applications*. [W:] Handbook of electrostatic Processes. Red. J.-S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley. New York, Marcel Dekker, Inc.
- Ling X., Jyaratne R., Morawska L. (2010) *Air ion concentration in various urban environments*. Atmospheric Environment, t. 44, 2186-2193.
- Martinson T., Wozniak P., Norman J. (1996) *Power lines and ionizing radiation*. Health Physics, t. 71, nr 6, 944-946.
- Matthews J.C., Buckley A.J., Wright M.D., Henshaw D.L. (2012) *Comparison of ground level measurements of ion concentration and potential gradient upwind and downwind of HV power lines in corona*. J. Electrostat., t. 70, 407-417.
- Matthews J.C., Ward J.P., Keitch P.A., Henshaw D.L. (2010) *Corona ion induced atmospheric potential gradient perturbations near high voltage power lines*. Atmospheric Environment, t. 44, 5093-5100
- McLaughlin J. P., Gath G. (1999) *Radon progeny activities in the vicinity of high voltage power lines*. Radiation Prot. Dosimetry, 82(4): 257-266.
- Miles J.C.H., Algar R.A. (1997) *Measurements of radon decay product concentrations under power lines*. Radiation Prot. Dosimetry, 74(3): 193-194.
- Muravada P.S. (2000) *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*. High-Voltage Power Transmission Series. Baldock, Research Studies Press LTD.
- Pachocki K. (1995) *Radon w środowisku*. Monografia. Warszawa, Fundacja „Ekologia i Zdrowie”.
- Particle Deposition in the Vicinity of Power Lines and Possible Effects on Health* (2004) Report of an independent Advisory Group on Non-ionising Radiation and its Ad Hoc Group on Corona Ions. Documents of the NRPB, Vol. 15, No. 1.
- Peek F.W. Jr (1929) *Dielectric phenomena in high-voltage engineering*. Wyd. 3. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Reineking A., Porstendörfer J. (1986) *High-volume screen diffusion batteries and  $\alpha$ -spectroscopy for measurement of radon daughter activity size distributions in the environment*. Journal of Aerosol Science, Vol. 17, No. 5, 873-879.
- Skedsmo A., Vistnes A.I. (2000) *Deflection of cosmic radiation near power lines – a theoretical approach*. Health Phys. 78(6): 679-686.
- Skubacz K. (2006) *Produkty rozpadu radonu*. [W:] Radon w środowisku życia, pracy i nauki mieszkańców Dolnego Śląska. Wrocław, Polski Klub Ekologiczny, Okręg Dolnośląski, 13-16.
- Swanson J., Jeffers D. (1999) *Possible mechanisms by which electric fields from power lines might affect airborne particles harmful to health*. J. Radiol. Prot., 19(3): 213-229.
- Vistnes A. I., Strand T., Thommesen G. (1997) *Focusing of cosmic radiation by power lines?* J. Radiol. Prot. 17(3): 185-193.
- Yu C.P., Chandra K. (1978) *Deposition of charged particles from laminar flows in rectangular and cylindrical channels by image force*. J. Aerosol Sci., nr 9, 175-180.

# 8. Hałas i drgania mechaniczne na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Witold Mikulski, Piotr Kowalski

<b>8.1. Hałas na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN – Witold Mikulski (213)</b>	<b>8.1.5.2. Metody pomiaru hałasu na stanowiskach pracy (228)</b>
<b>8.1.1. Wprowadzenie (213)</b>	<b>8.1.5.3. Aparatura do pomiarów hałasu (229)</b>
<b>8.1.2. Hałas – wiadomości podstawowe (214)</b>	<b>8.1.5.4. Przykładowe profile narażenia przy obsłudze stacji elektroenergetycznych (229)</b>
<b>8.1.3. Źródła hałasu na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN (216)</b>	<b>8.2. Drgania na stanowiskach pracy – Piotr Kowalski (232)</b>
<b>8.1.3.1. Sieć elektroenergetyczna – podział (216)</b>	<b>8.2.1. Drgania mechaniczne – podstawowe definicje (232)</b>
<b>8.1.3.2. Źródła hałasu na stanowiskach obsługi sieci przesyłowych (217)</b>	<b>8.2.2. Oddziaływanie drgań mechanicznych na organizm człowieka (232)</b>
<b>8.1.3.3. Źródła hałasu na stanowiskach obsługi stacji elektroenergetycznych (223)</b>	<b>8.2.3. Charakterystyka narażenia na drgania mechaniczne zatrudnionych przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN (235)</b>
<b>8.1.4. Charakterystyka stanowisk pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN (224)</b>	<b>8.2.4. Źródła drgań mechanicznych na stanowiskach obsługi sieci elektroenergetycznych WN (236)</b>
<b>8.1.4.1. Klasyfikacja stanowisk pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN ze względu na ochronę słuchu lub możliwość realizacji podstawowych zadań (224)</b>	<b>8.2.4.1. Źródła drgań działających w sposób ogólny (236)</b>
<b>8.1.4.2. Stanowiska pracy przy obsłudze linii przesyłowych (225)</b>	<b>8.2.4.2. Źródła drgań działających przez kończyny górne (236)</b>
<b>8.1.4.3. Stanowiska pracy przy obsłudze stacji elektroenergetycznych – czynności, podczas których powstaje hałas (227)</b>	<b>8.2.5. Charakterystyka prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN w Polsce w aspekcie narażenia na drgania mechaniczne (237)</b>
<b>8.1.5. Metody pomiaru i oceny hałasu na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN (227)</b>	<b>8.2.6. Przykładowe profile narażenia na drgania mechaniczne przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN w Polsce (239)</b>
<b>8.1.5.1. Wymagania dotyczące oceny hałasu na stanowiskach pracy (227)</b>	<b>Bibliografia (241)</b>

## 8.1. Hałas na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN

### 8.1.1. Wprowadzenie

Na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia hałas jest czynnikiem szkodliwym i uciążliwym. Niniejszy rozdział dotyczy przede wszystkim stanowisk pracy przy obsłudze stacji i linii NN – najwyższych napięć (220 kV i 400 kV), WN – wysokich napięć (110 kV), SN – średnich



napięcie (15 kV) i nN – najniższych napięć (0,4 kV). Ponieważ dane literaturowe oraz kontrolne badania własne (np. rys. 8-1 i 8-2) nie wykazały występowania źródeł hałasu infra- i ultradźwiękowego istotnych z punktu widzenia zagrożenia zdrowia, więc w tym rozdziale skupiono się na hałasie z zakresu słyszalnego (tj. o częstotliwości  $20 \div 20\,000$  Hz).

Określono źródła hałasu i stanowiska pracy (w tym podano zakres czynności pracy na tych stanowiskach pod kątem zagrożenia hałasem). Omówiono również metody pomiaru hałasu, które można zastosować na rozpatrywanych stanowiskach pracy.

### 8.1.2. Hałas – wiadomości podstawowe

Dalej podano definicje i zależności wprowadzające w zagadnienia dotyczące hałasu jako czynnika środowiska pracy.

*Hałas* – każdy niepożądany dźwięk, który może być uciążliwy albo szkodliwy dla zdrowia lub zwiększać ryzyko wypadku przy pracy.

*Hałas w zakresie słyszalnym* – hałas w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz.

*Hałas infradźwiękowy* – hałas, w którego widmie występują składowe o częstotliwościach infradźwiękowych od 1 Hz do 20 Hz.

*Hałas ultradźwiękowy* – hałas, w którego widmie występują składowe o wysokich częstotliwościach słyszalnych i niskich ultradźwiękowych (od 10 kHz do 40 kHz).

*Hałas niskoczęstotliwościowy* – hałas zawierający składowe z zakresu częstotliwości od ok. 10 Hz do 250 Hz.

*Częstotliwość  $f$*  – liczba okresów drgań w jednostce czasu, w hercach, Hz.

*Oktawa* – zakres częstotliwości mieszczących się pomiędzy częstotliwością dolną,  $f_d$ , a częstotliwością górną,  $f_g$ , które spełniają następującą zależność:

$$f_g = 2 \cdot f_d, \text{ Hz} \quad (8-1)$$

*Tercja* – zakres częstotliwości mieszczących się pomiędzy częstotliwością dolną,  $f_d$ , a częstotliwością górną,  $f_g$ , które spełniają następującą zależność:

$$f_g = \sqrt[3]{2} f_d, \text{ Hz} \quad (8-2)$$

*Ciśnienie akustyczne,  $p$*  – różnica między chwilową wartością ciśnienia ośrodka a ciśnieniem statycznym (atmosferycznym) w tym samym punkcie, gdy w ośrodku rozprzestrzeniają się drgania akustyczne. Jednostką ciśnienia akustycznego jest pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ).

Najniższe ciśnienie akustyczne wykrywane przez ucho ludzkie dla tonu prostego o częstotliwości 1 000 Hz wynosi ok.  $20 \mu\text{Pa}$  (tj.  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ). Ucho ludzkie potra-

fi też odbierać dźwięki o ciśnieniu akustycznym ponad milion razy większym. Taki duży zakres ciśnień akustycznych, na które ucho ludzkie reaguje w postaci wrażeń dźwiękowych, oraz fakt, że organ słuchu reaguje na względną zmianę bodźca akustycznego (prawo Webera-Fechnera), były przyczyną wprowadzenia logarytmicznej skali ciśnienia akustycznego.

Ciśnienie akustyczne,  $p$ , w skali logarytmicznej to *poziom ciśnienia akustycznego*,  $L_p$ :

$$L_p = 10 \log(p^2/p_0^2), \text{ dB} \quad (8-3)$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie akustyczne, Pa

$p_0$  – ciśnienie odniesienia,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

*Moc akustyczna*,  $P$ , jest to ilość energii akustycznej wypromieniowanej przez źródło dźwięku w jednostce czasu. Jednostką mocy akustycznej jest wat, W. Zakres wartości mocy akustycznych otaczających nas źródeł dźwięku jest bardzo duży – sięga ok.  $10^{14}$  W. Dlatego, analogicznie do poziomu ciśnienia akustycznego, wprowadzono pojęcie *poziomu mocy akustycznej*,  $L_p$  (w niektórych publikacjach poziom mocy akustycznej oznacza się  $L_w$ ):

$$L_p = 10 \log(P^2/P_0^2), \text{ dB} \quad (8-4)$$

gdzie:

$P$  – moc akustyczna, W

$P_0$  – moc akustyczna odniesienia,  $P_0 = 10^{-12}$  W.

*Hałas impulsowy* – to hałas, w którym występuje jedno lub kilka zdarzeń dźwiękowych o czasie trwania krótszym niż 1 s.

*Poziom dźwięku A* – poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A.

*Maksymalny poziom dźwięku A* – maksymalna wartość skuteczna poziomu dźwięku A, występująca w czasie obserwacji.

*Szczytowy poziom dźwięku C* – maksymalna wartość chwilowa poziomu dźwięku C, występująca w czasie obserwacji.

*Narażenie indywidualne* – rzeczywisty poziom narażenia pracownika na hałas po uwzględnieniu tłumienia uzyskanego w wyniku stosowania środków ochrony indywidualnej (ochronników słuchu).

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy,  $L_{EX,8h}$ , jest określony wzorem:

$$L_{EX,8h} = L_{Aeq,Te} + 10 \cdot \log \frac{T_e}{T_0}, \text{ dB} \quad (8-5)$$

gdzie:

$L_{Aeq,Te}$  – równoważny poziom dźwięku A dla czasu  $T_e$ , dB

$T_e$  – czas ekspozycji na hałas w ciągu dnia roboczego, s

$T_0$  – czas odniesienia 28 800 s = 480 min = 8 godzin.

Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do tygodnia pracy,  $L_{EX,w}$ , jest określony wzorem:

$$L_{EX,w} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{EX,8h})_i} \right], \text{dB} \quad (8-6)$$

gdzie:

$i$  – kolejny dzień roboczy w rozważanym tygodniu

$n$  – liczba dni roboczych w rozważanym tygodniu (może być różna od 5)

$(L_{EX,8h})_i$  – poziom ekspozycji na hałas  $L_{EX,8h}$  w  $i$ -tym dniu, dB.

Równoważny poziom dźwięku A,  $L_{Aeq,Te}$ , dla hałasu nieustalonego, w którym występują wyraźnie rozróżnialne ustalone poziomy dźwięku A, jest określony wzorem:

$$L_{Aeq,Te} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T_e} \cdot \sum_{i=1}^n (T_i \cdot 10^{0,1L_{Aeq,T_i}}) \right], \text{dB} \quad (8-7)$$

gdzie:

$L_{Aeq,T_i}$  – równoważny poziom dźwięku A, dB, uśredniony w przedziale czasu  $T_i$

$n$  – całkowita liczba wyraźnie rozróżnialnych poziomów (np. czynności)

$T_e = \sum_{i=1}^n T_i$  – całkowity czas ekspozycji na hałas, s.

### 8.1.3. Źródła hałasu na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN

#### 8.1.3.1. Sieć elektroenergetyczna – podział

Szczegółowy opis sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia (WN) podano w rozdziale 2 i 3.

Ze względu na zagrożenie hałasem pracowników na stanowiskach pracy, sieci elektroenergetyczne można podzielić na:

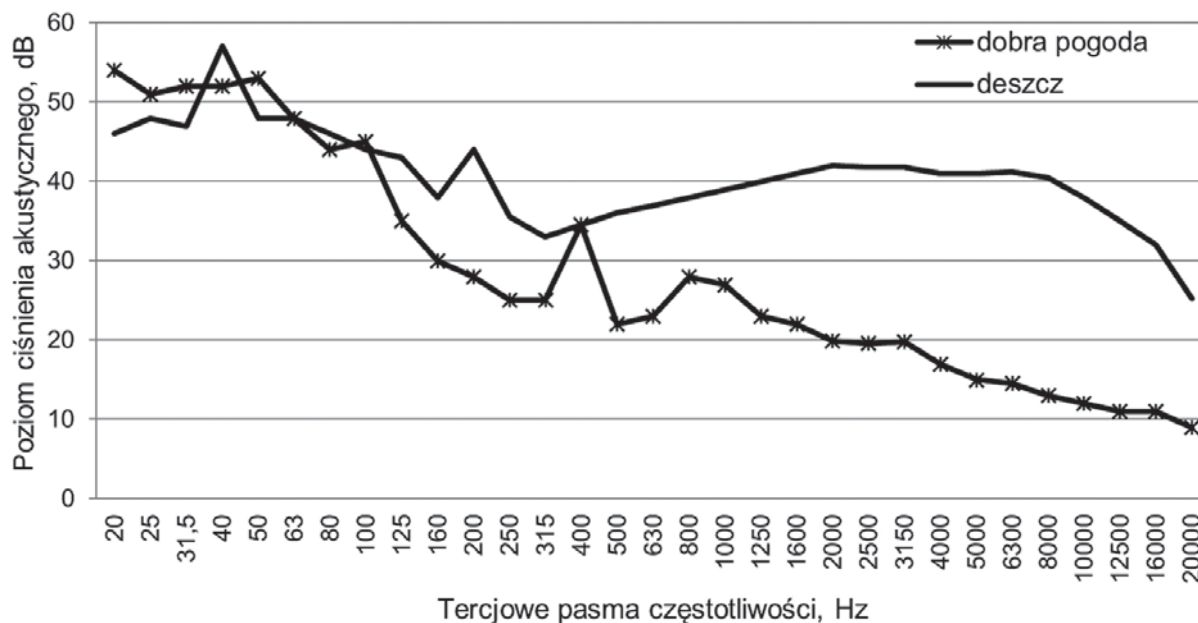
- sieci przesyłowe (linie najwyższych napięć, linie wysokich napięć, linie średnich napięć oraz linie niskich napięć); mogą być napowietrzne lub kablowe
- stacje elektroenergetyczne (systemowe najwyższych napięć, rozdzielcze średniego napięcia, rozdzielcze transformatorowe); mogą być napowietrzne w przestrzeni otwartej, napowietrzne w pomieszczeniach lub w tzw. technologii gazowej.

Dalej, przy omawianiu źródeł hałasu oraz stanowisk pracy, będzie stosowany ten podział.

### 8.1.3.2. Źródła hałasu na stanowiskach obsługi sieci przesyłowych

#### Linia przesyłowa

Na pracowników podczas pracy przy obsłudze sieci (linii) energetycznych oddziałuje bardzo wiele różnych źródeł hałasu, jednakże ze względu na specyfikę ich pracy szczególnego potraktowania wymaga hałas najbardziej utożsamiany z obsługą linii przesyłowej, emitowany przez przewody podczas tzw. zjawiska ulotu (rys. 8-1).



**Rys. 8-1.** Widmo hałasu ulotu elektrycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznej podczas złej i dobrej pogody [na podstawie danych wg pracy (Kucharski, 2011)]

Rozpatrywany obszar działania pracowników obejmuje strefę od linii przesyłowej (w minimalnej odległości od przewodów pod napięciem) do obszaru oddalonego o kilkadziesiąt metrów (np. podczas obsługi wyciągarki, podnośnika koszowego, koparki).

W tabeli 8-1 podano prognozowane wartości poziomu dźwięku A w otoczeniu linii 400 kV w okolicy Warszawy (Kucharski, 2011). Wynika z nich, że w odległości 15 m od linii poziom dźwięku A w warunkach dobrej pogody wynosi ok. 32-39 dB, a w warunkach złej pogody (deszcz) ok. 45-53 dB (odległości są określone w poziomie).

Według innych źródeł (Engel i Wszolek, 1994; Wszolek, 2010) przepływ prądu zmiennego o częstotliwości 50-60 Hz i o wysokim napięciu przez przewód w warunkach dużej wilgotności powietrza (w tym podczas opadu deszczu lub śniegu) powoduje tzw. zjawisko ulotu, któremu towarzyszy emisja hałasu (rys. 8-1). Wartość

poziomu dźwięku A od linii przesyłowej w odległości kilkunastu do kilkudziesięciu metrów wynosi wówczas ok. 44-52 dB (tab. 8-2).

**Tabela 8-1.** Wartości poziomu dźwięku A w otoczeniu linii 400 kV w warunkach dobrej i złej pogody wg pracy (Kucharski, 2011)

Wielkość mierzona	Dobra pogoda			Zła pogoda					
	odległość od osi linii			wszystkie warunki			ciągły deszcz		
				odległość od osi linii:					
	15 m	30 m	60 m	15 m	30 m	60 m	15 m	30 m	60 m
<b>Wiązka przewodów 2 × 525 mm<sup>2</sup>, linia dwutorowa (słupy serii Z52)</b>									
Odchylenie standardowe	4,0	3,7	3,6	4,1	4,1	4,2	2,0	1,8	1,7
$L_{Aeq, min}$	31,7	29,8	27,7	44,3	42,8	39,5	49,5	48,5	46,5
$L_{Aeq, max}$	44,1	42,6	38,9	55,8	53,9	50,8	55,8	53,9	50,8
$L_{Aeq, średnie}$	<b>38,8</b>	<b>36,0</b>	<b>33,2</b>	<b>51,1</b>	<b>49,2</b>	<b>46,7</b>	<b>52,9</b>	<b>51,1</b>	<b>48,6</b>
<b>Wiązka przewodów 2 × 525 mm<sup>2</sup>, linia jednotorowa (słupy serii Y52)</b>									
Odchylenie standardowe	3,4	3,1	2,8	3,8	3,9	3,8	1,9	2,3	2,7
$L_{Aeq, min}$	32,1	29,8	27,7	42,7	39,8	37,2	47,7	43,6	39,5
$L_{Aeq, max}$	41,4	38,0	34,8	53,1	51,1	48,4	53,1	51,1	48,4
$L_{Aeq, średnie}$	<b>37,2</b>	<b>34,2</b>	<b>31,7</b>	<b>49,4</b>	<b>46,5</b>	<b>43,7</b>	<b>51,4</b>	<b>48,6</b>	<b>45,7</b>
<b>Wiązka przewodów 3 × 350 mm<sup>2</sup>, linia dwutorowa (słupy serii Z33)</b>									
Odchylenie standardowe	3,0	2,1	2,3	3,1	2,9	2,8	1,2	1,4	1,2
$L_{Aeq, min}$	28,4	27,4	25,5	36,4	35,0	32,2	42,8	39,9	37,3
$L_{Aeq, max}$	38,8	36,1	32,2	47,2	44,5	41,2	47,2	44,5	41,2
$L_{Aeq, średnie}$	<b>32,0</b>	<b>31,1</b>	<b>27,3</b>	<b>43,6</b>	<b>41,4</b>	<b>38,9</b>	<b>45,3</b>	<b>42,4</b>	<b>39,7</b>

Podaje się także, że w razie uszkodzenia powierzchniowego przewodów, nawet przy niedużej wilgotności powietrza może się pojawić ulot.

W obu przytoczonych źródłach literaturowych podaje się, że w odległości 15 m od linii wartość poziomu dźwięku A podczas deszczu może dochodzić do 53 dB. Wydawałoby się, że taki poziom nie powinien powodować zagrożenia hałasem na stanowisku pracy (dopuszczalna wartość poziomu ekspozycji na hałas wynosi 85 dB; patrz rozdz. 8.1.5). Przeważnie, gdy pracownik nie zbliża się do linii, tak właśnie jest (np. podczas optycznej lub termowizyjnej kontroli przewodów). Jednakże, gdy wykonuje czynności bliższej linii pod napięciem (np. naprawa przewodów), wówczas poziom dźwięku A może być o 15-30 dB większy i będzie wpływał na ekspozycję pracownika na hałas.



**Tabela 8-2.** Wyniki pomiarów hałasu ulotu w otoczeniu linii 400 kV w warunkach dobrej i złej pogody (równoważny poziom dźwięku A, dB) wg pracy (Engel i Wszolek, 1994)

Typ linii	Wielkość mierzona	Warunki pogodowe	Odległość od skrajnego toru linii, m		
			15	30	60
Z52/2×525 400 kV	$L_{Aeq, ZP}$	mżawka	43	42	39
	$L_{Aeq, LT}$	–	41	38	35
Z52/2×525	$L_{Aeq, ZP}$	deszcz	52	50	48
	$L_{Aeq, LT}$	–	41	39	37
Y25/2×525	$L_{Aeq, ZP}$	mżawka	45	41	38
	$L_{Aeq, LT}$	–	41	37	35
Z33/3×350	$L_{Aeq, ZP}$	mżawka	41	39	37
	$L_{Aeq, LT}$	–	37	35	33

ZP – złe warunki pogodowe, LP – dobre warunki pogodowe.

Poziom dźwięku A od ulotu w odległości  $x$  (w metrach) od linii można określić ze wzoru wg Electric Power Research Institute dla napięć 230 ÷ 1 500 kV (najwyższe napięcia), liczby przewodów w wiązce  $N = 1 \div 16$  i średnicy przewodów wiązki  $d = 2 \div 6$  cm, opisanej w pracy (Tarko, 2007):

$$L_A = 54,3 + C_5 - \frac{665}{E_{\max}} + 20 \log(N) + 44 \log(d) + k_n - 10 \log(x) - 0,02x, \text{ dB} \quad (8-8)$$

gdzie:

$E_{\max}$  – największa skuteczna wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu, kV/cm

$N$  – liczba przewodów w wiązce

$d$  – średnica przewodów wiązki, cm

$D$  – średnica wiązki, cm

$C_5$  – określone wzorem, dB:

$$C_5 = \begin{cases} 20,9 & \text{dla } N = 1 \\ 20,9 & \text{dla } N = 2 \\ 13,6 & \text{dla } N \geq 3 \end{cases} \quad (8-9)$$

$k_n$  – określone wzorem, dB:

$$k_n = \begin{cases} 7,5 & \text{dla } N = 1 \\ 2,6 & \text{dla } N = 2 \\ 22,9(n-1) \frac{d}{D} & \text{dla } N \geq 3 \end{cases} \quad (8-10)$$

$x$  – odległość od linii, m

lub wg polskiej normy PN-N-01339:2000 dla linii 400 kV i jednej fazy:

$$L_A = 10 \log \left\{ E_{\max}^{8,5} \left[ 1 - e^{-k \rho \frac{E_{\max} (E_{\max} - E_0)^{1,33}}{E_0}} \right] \right\} + 45 \log d + 18 \log N - 11,4 \log x - L_0, \text{ dB} \quad (8-11)$$

gdzie:

$E_{\max}$  – maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu, kV/cm

$E_0$  – wartość początkowa natężenia pola elektrycznego, kV/cm (dla linii 400 kV doświadczalnie wyznaczono  $E_0 = 12$  kV/cm w środku przęsła, a 10 kV/cm w osi słupa odporowo-narożnego; niektóre źródła podają 15-17 kV/cm)

$k$  – współczynnik uwzględniający stan powierzchni przewodu (dla linii 400 kV doświadczalnie wyznaczono  $k = 0,17$  w środku przęsła, a 0,13 w osi słupa odporowo-narożnego)

$\rho$  – intensywność opadów deszczu, mm/h (np. lekki deszcz, mżawka – 0,5 mm/h, średni deszcz – 1,2 mm/h)

$N$  – liczba przewodów w wiązce

$d$  – średnica przewodu składowego wiązki, cm

$x$  – odległość od wiązki przewodów, m

$L_0$  – poziom odniesienia, dB (dla linii 400 kV w Polsce wynosi 64 dB).

W normie podaje się także, że maksymalne natężenie pola elektrycznego na powierzchni przewodu WN 400 kV wynosi 15-17 kV/cm. Natężenie krytyczne, przy którym powstaje ulot, wynosi:

- podczas dobrej pogody 19-20 kV/cm
- podczas złej pogody 10-12 kV/cm.

A zatem ulot powstaje głównie w warunkach złej pogody (z wywiadu z pracownikami obsługi linii przesyłowych wynika, że w zimie, nawet gdy nie ma opadów, pojawia się ulot, co jest prawdopodobnie skutkiem oszronienia przewodów).

Widmo hałasu ulotu zawiera podwójną częstotliwość sieciową oraz wyższe harmoniczne, a także składową szerokopasmową (szumową), (rys. 8-1).

Hałas emitowany w warunkach dobrej pogody charakteryzuje się dużym rozrzutem poziomów, gdyż zjawisko ulotu powstaje w miejscach uszkodzenia przewodów, natomiast w warunkach złej pogody występuje mały rozrzut poziomów emitowanego hałasu.

Poziom dźwięku A od kilku przewodów w linii (w tym faz) określa się ze wzoru:

$$L_{A \text{ wypadkowy}} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Ai}}{10}}, \text{ dB} \quad (8-12)$$

gdzie:

$L_{A,i}$  – poziom dźwięku A od przewodu (lub fazy), dB

$n$  – liczba przewodów lub faz.

Z wykorzystaniem podanych wzorów można wprawdzie szacować hałas w pobliżu linii, jednakże należy wziąć pod uwagę, że zostały one opracowane przy założeniu, iż będą stosowane dla odległości kilkunastu i więcej metrów od przewodów. Dlatego ich zastosowanie do obliczenia poziomu dźwięku A w mniejszej odległości może spowodować trudny do oszacowania błąd.

Innym sposobem estymacji poziomu dźwięku A w sąsiedztwie przewodów jest obliczenie poziomu mocy źródła dla odcinka linii, a następnie wypadkowego poziomu dźwięku A jako sumy energii z poszczególnych odcinków. Podejście takie zastosowano w pracy (Wszolek, 2010), według której poziom mocy akustycznej jednostkowego odcinka linii wynosi:

– warunki deszczowe:

$$L_{w(r)} = 10 \log \left\{ E^{8,5} \left[ 1 - e^{-k_r \rho (E_x - E_0)^{4/3}} \right]^{\alpha_1} \right\} + 8 - L_r, \text{ dB} \quad (8-13)$$

– warunki bezdeszczowe:

$$L_{w(nr)} = 10 \log \left\{ E^{8,5} \left[ 1 - e^{-k_{nr} \tau (E_x - E_0)^{4/3}} \right]^{\alpha_2} \right\} + 8 - L_{nr} \quad (8-14)$$

gdzie:

$E$  – wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu, kV/cm

$E_0$  – wartość początkowa natężenia pola elektrycznego, kV/cm (dla linii 400 kV doświadczalnie wyznaczono  $E_0 = 12$  kV/cm w środku przęsła, a 10 kV/cm w osi słupa odporowo-narożnego; niektóre źródła podają 15-17 kV/cm)

$k_r, k_{nr}$  – współczynniki odpowiednio skalujące opady deszczu

$L_r$  i  $L_{nr}$  – poziomy referencyjne.

Pozostałe oznaczenia jak wyżej.

Powszechnie przyjmuje się (w odniesieniu do odległości kilkunastu metrów od linii), że linia jest tzw. liniowym źródłem dźwięku, tak jak na przykład we wzorach (8-8) i (8-11) oraz w pracy (Engel i Wszolek, 1996), tzn. że na podstawie zmierzonego poziomu hałasu (poziomu dźwięku A,  $L_{r0}$ ) w odległości  $r_0$  od linii można określić hałas na stanowisku obsługi sieci w odległości  $r$  ze wzoru:

$$L_r = L_{r0} + 10 \log \left( \frac{r_0}{r} \right) \quad (8-15)$$

W źródłach literaturowych nie ma danych umożliwiających prognozowanie hałasu w najbliższym sąsiedztwie przewodu. Ponadto wiele elementów wskazanych wzorów określono empirycznie w tak specyficznych warunkach, że nie można ich w sposób w pełni wiarygodny zastosować w konkretnie rozpatrywanym przypadku (np. brakuje danych o stanie linii, m.in. o jej uszkodzeniach). Dlatego nadal jedynym wiarygodnym sposobem uzyskania danych o hałasie na rozpatrywanych stanowiskach pracy jest pomiar.

Reasumując, można stwierdzić, że linia przesyłowa będąca pod napięciem jest źródłem hałasu, szczególnie w warunkach dużej wilgotności powietrza, opadów, oszronienia (częste warunki w zimie). Metodami obliczeniowymi trudno jest uzyskać wiarygodne wyniki charakteryzujące hałas pochodzący od linii na stanowiskach pracy znajdujących się w jej sąsiedztwie, dlatego konieczny jest pomiar hałasu. Jeśli pomiar w pobliżu linii nie jest możliwy, np. ze względu na ograniczenia możliwości pomiarów miernikami w warunkach dużych natężeń pola elektrycznego lub magnetycznego, należy go przeprowadzić w większej odległości, a wynik skorygować wg wzoru (8-15), zakładając, że linia przesyłowa jest liniowym źródłem dźwięku.

### Inne źródła hałasu

Powszechnie przyjmuje się, że na pracowników obsługujących linię oddziałuje tylko zjawiska ulotu. Jest to jednak nieuzasadnione uproszczenie. Pracownicy ci wykonują bardzo zróżnicowane prace: od robót ziemnych, przez fundamentowanie, stawianie lub naprawianie słupów nośnych, naprawę przewodów, uziemień, izolatorów, do przeglądów. Większość z tych operacji, np. kopanie czy fundamentowanie, wykonują pracownicy o określonej specjalizacji, np. kierowcy koparki, betoniarza, elektromontera. Dlatego, z punktu widzenia ekspozycji na hałas, prace, podczas których może powstawać hałas, podzielono na grupy:

- prace ziemne wykonywane przez: maszyny do zdejmowania humusu, koparki, urządzenia przeładunkowe (w tym wywrotki) i dźwignice
- ubijanie ziemi ubijarkami do gruntu
- fundamentowanie słupów nośnych (rurowych i z płaskowników) – maszynami i urządzeniami, takimi jak: betoniarki, wywrotki, wibratory, piły do drewna
- stawianie lub naprawa słupów nośnych – dźwigami samochodowymi, żurawiami, wyciągarkami, hydraulicznymi ściskarkami do słupów rurowych, narzędziami ręcznymi (w tym kluczami elektrycznymi oraz hydraulicznymi)

- zawieszanie przewodów – wciągarkami, maszynami do hamowania (hamownikami) lub układania ich w kanałach w ziemi
- konserwacja przewodów – z użyciem helikopterów lub samochodów do kontroli optycznej lub termowizyjnej, dźwigów i podnośników koszowych, „rowerów” (koszy przemieszczających się po liniach przesyłowych), hydraulicznych urządzeń do zaciskania przewodów, spawarek, wiertarek, szlifierek kątowych
- konserwacja terenu (przycinanie gałęzi drzew) spalinowymi pilarkami łańcuchowymi
- transport samochodami
- zasilanie urządzeń generatorami prądu lub urządzeniami wytwarzającymi ciśnienie.

### 8.1.3.3. Źródła hałasu na stanowiskach obsługi stacji elektroenergetycznych

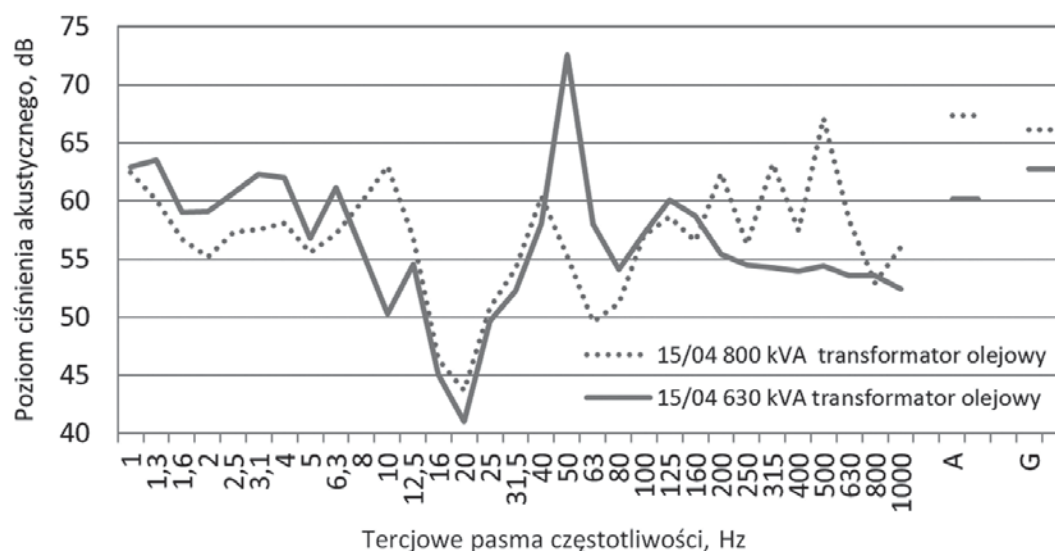
Pracownicy obsługujący stacje elektroenergetyczne, podobnie jak i obsługujący linie przesyłowe, wykonują różne czynności. Tutaj również prowadzone są prace ziemne, betonowanie fundamentów oraz prace na liniach i słupach w obrębie stacji. Źródła hałasu są wówczas podobne do wymienionych w poprzednim rozdziale. Jednakże większość prac na stanowiskach obsługi stacji elektroenergetycznych dotyczy konserwacji urządzeń stacji.

Ponieważ zasadniczo stacje 110 kV/15 kV (występujące najczęściej) można podzielić na napowietrzne (w przestrzeni otwartej lub w pomieszczeniu) oraz na wykonane w technologii gazowej (hermetycznie zabudowane), więc są one odmiennymi źródłami hałasu (np. pierwsze, jak linie przesyłowe, powodują także hałas ulotu, natomiast drugie – nie).

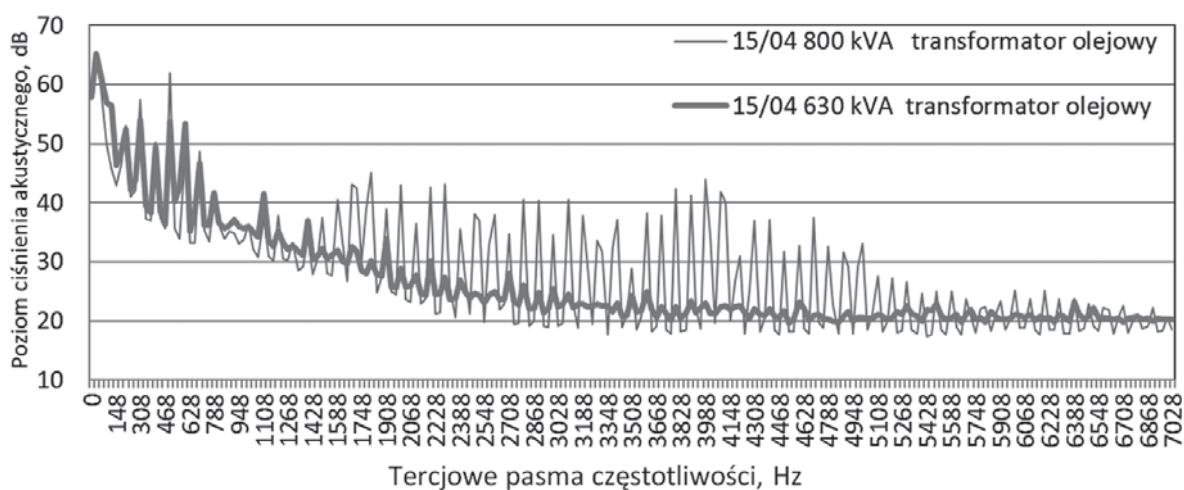
W stacjach podstawowym źródłem hałasu są transformatory (rys. 8-2 i 8-3). Sam transformator jest źródłem hałasu niskoczęstotliwościowego, w którego widmie można wyróżnić składowe tonalne oraz szumowe. Natomiast wentylator stosowany do jego chłodzenia jest źródłem hałasu szerokopasmowego. W ostatnim okresie stosuje się układy, które ciepło wytwarzane przez transformatory w pomieszczeniach wykorzystują do ogrzewania np. parkingów, ale również pomieszczeń wymagających ciszy (np. dyspozytorni). Układy te, jak też klimatyzacja, mogą być źródłem hałasu w dyspozytorniach.

Źródłem hałasu (w tym impulsowego) w stacjach są przełączniki (np. rozdzielnie 110 kV i 15 kV). W szczególności chodzi o wyłączniki powietrzne i sprężarki powietrzne do wyłączników oraz wentylatory. Jednakże w ostatnim okresie stacje te buduje się w systemach zdalnie sterowanych z dyspozytorni i wówczas hałas oddziałuje tylko na pracowników, którzy obsługują stacje w czasie awarii.





Rys. 8-2. Poziom ciśnienia akustycznego w tercjowych pasmach częstotliwości oraz poziomy dźwięku A i G wewnątrz transformatorowni



Rys. 8-3. Wąskopasmowe widmo hałasu wewnątrz transformatorowni

## 8.1.4. Charakterystyka stanowisk pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN

### 8.1.4.1. Klasyfikacja stanowisk pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN ze względu na ochronę słuchu lub możliwość realizacji podstawowych zadań

Innym aspektem (poza wyznaczeniem wielkości występującego hałasu na stanowiskach pracy), który musi być uwzględniony przy określaniu zagrożenia pracowników hałasem, jest charakter wykonywanej pracy. Determinuje on dopusz-

czalne wartości wielkości charakteryzujących hałas. Ocenę hałasu wykonuje się na wszystkich stanowiskach pracy (wśród tzw. ogółu pracowników): A – ze względu na ochronę słuchu (PN- EN ISO 9612:2011), B – w szczególnych przypadkach, na stanowiskach pracy wymagających szczególnej koncentracji uwagi (możliwość realizacji podstawowych zadań), ze względu na możliwość realizacji podstawowych funkcji pracy (określonych w PN-N-01307:1994). Specyfika pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN powoduje, że potrzebna jest grupa pracowników nadzorujących lub kontrolujących. Zależnie od stanowiska pracy, czyli przynależności do określonej grupy pracowników, wykonuje się ocenę hałasu określoną w punkcie A lub B:

- 1) poleceniodawcy (pracownicy administracyjni) – ocena B
- 2) koordynujący (dyspozytorzy, pracownicy administracyjni) – ocena B
- 3) dopuszczający (przygotowujący miejsca pracy, pracownicy administracyjni oraz – podczas czynności poprzedzających pracę pracowników z pozycji 6 i 7 – pracownicy fizyczni; przełączenia w sieci, uziemienia, ogradzanie terenu) – ocena A i/lub B
- 4) kierownicy robót (pracownicy administracyjni) – ocena B
- 5) nadzorujący (pracownicy administracyjni) – ocena B
- 6) kierujący zespołem – brygadziści (nadzorujący podczas pracy, w tym bhp, pracownicy fizyczni) – ocena A
- 7) pracownicy wykwalifikowani – elektromonterzy lub w niektórych przypadkach pracownicy niewykwalifikowani (pracownicy fizyczni) – ocena A.

Stanowiska pracy z pozycji od 1) do 5) to – z punktu widzenia narażenia na hałas – według klasyfikacji podanej w PN-N-01307:1994, stanowiska pracowników administracyjno-biurowych i nie występuje na nich zagrożenie hałasem ze względu na uszkodzenie słuchu lub zdrowia. Na tych stanowiskach powinny być zapewnione warunki do pracy umysłowej, tj. dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A podczas pracy nie powinien być większy niż 55 dB.

Pracownicy na stanowiskach 6) i 7) wykonują pracę fizyczną, a więc dopuszczalne poziomy hałasu są wówczas określone normatywami higienicznymi, czyli najwyższym dopuszczalnym natężeniem (NDN) hałasu (podane w rozdz. 8.1.5.1).

#### **8.1.4.2. Stanowiska pracy przy obsłudze linii przesyłowych**

Obsługa linii przesyłowych (WN) jest związana z następującymi stanowiskami lub czynnościami pracy:

- elektromonter (zakres prac – pomiary i konserwacja linii)
- kierowca koparki

- obsługa urządzeń przeładunkowych (w tym wywrotki) i dźwignic (w tym żurawi)
- obsługa ubijarki do gruntu, walca
- pracownicy do prac przy fundamentowaniu słupów nośnych (betoniarka, wibrator do betonu, piła do drewna)
- kierowca wywrotki
- kierowca dźwigu samochodowego, żurawia
- obsługa podnośnika koszowego
- obsługa wyciągarki i hamownika przewodów (likwidacja zwisów przewodów)
- obsługa wyciągarki, elementów słupów (linie napowietrzne)
- pilot helikoptera (linie napowietrzne)
- obsługa przycinarek gałęzi (linie napowietrzne)
- obsługa młota pneumatycznego i przecinarki do asfaltu (linie kablowe)
- kierowca samochodów do transportu.

Najbardziej charakterystyczne dla obsługi linii przesyłowej jest stanowisko elektromontera. Hałas na tym stanowisku występuje podczas:

- transportu samochodem lub helikopterem i kontroli linii (kontrola optyczna i termowizyjna elementów linii oraz słupów nośnych)
- napraw słupów nośnych (obsługa dźwigu i podnośnika koszowego, uzupełnianie lub wymiana płaskowników lub innych elementów oraz czyszczenie za pomocą narzędzi ręcznych, w tym kluczy elektrycznych, obsługa wiertarek i szlifierek kątowych; wymiana dużych fragmentów słupów – obsługa wyciągarki, praca w sąsiedztwie dźwigów samojezdnych HDS, żurawi, kotwienie słupów odciągowych)
- napraw lin – przewodów roboczych (m.in. zakładanie oplotu naprawczego na przewody), uzemień, mostków, izolatorów, przewodów odgromowych itp. (obsługa podnośnika koszowego lub wózka do jeżdżenia po przewodach, obsługa wciągu łańcuchowego, wyciągarki do lin i hamownika, obsługa wyciągarki do wciągania izolatorów, wykonanie złącza zaprasowanego – prasa hydrauliczna)
- spawania
- prac w pobliżu pracujących koparek, dźwigów
- zdejmowania osłon kanałów kablowych (w tym praca przecinarką do asfaltu, młotem pneumatycznym)
- układania przewodów w kanałach
- obsługi generatorów prądu i urządzeń wytwarzających ciśnienie hydrauliczne.

### **8.1.4.3. Stanowiska pracy przy obsłudze stacji elektroenergetycznych – czynności, podczas których powstaje hałas**

Z zagrożeniem hałasem mogą być związane następujące prace elektromontera zatrudnionego przy pomiarach i konserwacji stacji WN:

- wymiana izolatora
- montaż oszynowania stacji przewodami linkowymi:
  - montaż konstrukcji wysokich
  - zawieszenie oszynowania
  - uziemienie
  - zakotwiczenie poprzeczników
  - montaż wieszaków śrubowo-kabłąkowych
- wymiana urządzeń pierwotnych na stacji:
  - betonowanie fundamentów (betoniarka)
  - ustawianie konstrukcji, obsługa żurawi samochodowych, hydraulicznych dźwigów samochodowych HDS, spawanie, skręcanie, stawianie słupów metodą wysokościową lub obrotową
  - roboty ziemne, betonowanie, ustawianie prefabrykatów, montaż i ustawianie konstrukcji (dotyczy konstrukcji wysokich)
  - układanie kabli w kanałach i tunelach kablowych na terenie rozdzielni, roboty ziemne przy zdejmowaniu osłon
- obsługa kosiarek
- pomiary kontrolne.

### **8.1.5. Metody pomiaru i oceny hałasu na stanowiskach pracy przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN**

#### **8.1.5.1. Wymagania dotyczące oceny hałasu na stanowiskach pracy**

Podstawowymi krajowymi dokumentami, w których określono wartości dopuszczalne hałasu w środowisku pracy oraz metody oceny hałasu, są:

- *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*
- *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych kobietom*
- *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24 sierpnia 2004 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym*

- PN-EN ISO 9612:2011 *Akustyka. Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna*
- PN-N-01307:1994 *Hałas. Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów*
- PN-N-18002:2011 *Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.*

### 8.1.5.2. Metody pomiaru hałasu na stanowiskach pracy

Metody pomiaru wielkości charakteryzujących hałas w środowisku pracy są określone w normach: PN-N-01307:1994, PN-ISO 1999:2000 i PN-EN ISO 9612:2011. Ze względu na szczegółowe wymagania dotyczące sposobu postępowania w trakcie pomiarów oraz wyznaczania budżetu niepewności zaleca się, aby pomiary hałasu w środowisku pracy wykonywać zgodnie z metodyką zawartą w PN-EN ISO 9612:2011, omówioną dalej.

#### Metoda pomiaru

Według PN-EN ISO 9612:2011 wyróżnia się trzy metody pomiarowe:

- pomiary z podziałem na czynności – najbardziej efektywne, gdy praca wykonywana na badanym stanowisku pracy może być podzielona na wyraźne przedziały czasowe, w których warunki akustyczne nie zmieniają się znacząco w czasie; wymaga ona dokładnej analizy warunków pracy
- pomiary stanowiskowe – najbardziej efektywna, gdy typowe warunki pracy są trudne do określenia, a dokładna analiza warunków, ze względów praktycznych, nie jest możliwa; znaczne obniżenie pracochłonności pomiarów można uzyskać przez pogrupowanie stanowisk pracy, dla których przewiduje się zbliżony poziom ekspozycji na hałas (tzw. grupy jednorodne)
- pomiary całodzienne (dozymetryczne) – najbardziej efektywne, gdy typowe warunki pracy (w tym np. miejsca pracy) są trudne do określenia; pomiary wykonuje się przez cały czas trwania dnia pracy.

Ze względu na przypadkowy charakter ekspozycji na hałas na stanowiskach pracy obsługi sieci energetycznych najlepszą metodą jest najczęściej pomiar całodzienny (dozymetryczny pięciodniowy). Ten wariant jest również najwłaściwszy, ponieważ osoby wykonujące pomiar hałasu (ekipa pomiarowa) nie znajdują się w strefach niebezpiecznych (a więc nie muszą przechodzić odpowiedniego przeszkolenia).



### 8.1.5.3. Aparatura do pomiarów hałasu

Do pomiarów należy stosować miernik, analizator lub dozymetr hałasu, które muszą się charakteryzować pewnymi właściwościami określonymi w normach polskich:

- PN-EN 61252:2000 *Elektroakustyka. Wymagania dotyczące indywidualnych mierników ekspozycji na dźwięk*
- PN-EN 60942:2005 *Elektroakustyka. Kalibratory akustyczne*
- PN-EN 61672-1:2005 *Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania*
- PN-EN 61672-2:2005 *Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku – Część 2: Badania typu*
- PN-EN 61672-3:2007 *Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 3: Badania okresowe.*

Zastosowana aparatura musi umożliwiać jednoczesny pomiar poziomu ekspozycji na hałas bądź ekspozycji na hałas (lub równoważnego poziomu dźwięku A), maksymalnego poziomu dźwięku A i szczytowego poziomu dźwięku C.

Przyrządy muszą mieć aktualne świadectwo legalizacji oraz powinny być kalibrowane przed wykonaniem pomiarów. Po pomiarach należy sprawdzić kalibrowanie.

### 8.1.5.4. Przykładowe profile narażenia przy obsłudze stacji elektroenergetycznych

Ocena narażenia na hałas polega na porównaniu zmierzonych wielkości określających hałas z ich wartościami dopuszczalnymi.

Dalej przedstawiono na dwóch przykładach profile narażenia wraz z oceną hałasu. Podane warunki pracy są typowe. Jednakże, ze względu na ogromną różnorodność warunków pracy i emisji hałasu źródeł, konieczne jest przeprowadzenie indywidualnej oceny hałasu na konkretnych stanowiskach pracy.

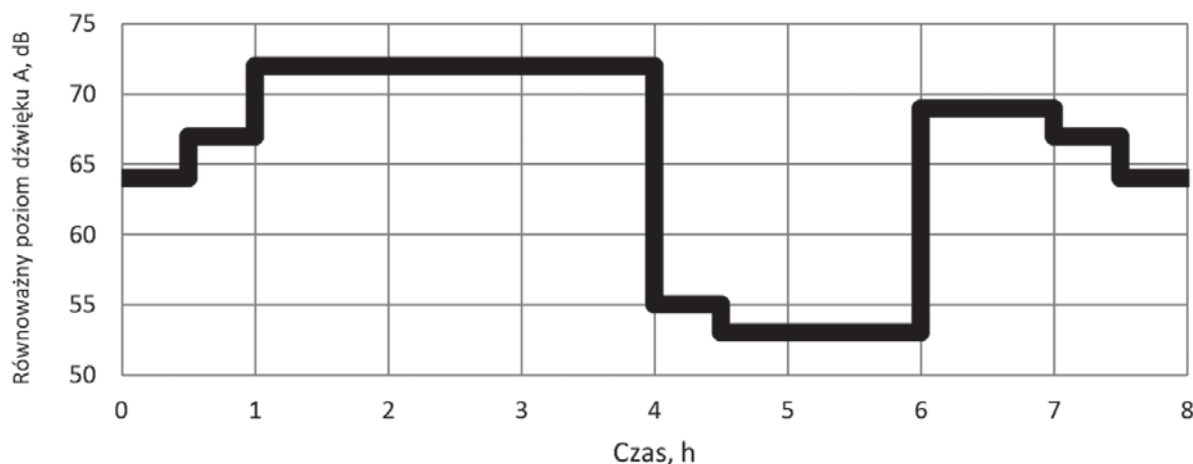
#### Stanowisko elektromontera pracującego przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN na linii WN

Typowy profil pracy pracownika obsługującego linie WN obejmuje (z punktu widzenia ekspozycji na hałas) następujące czynności:

- omówienie poleceń dnia pracy (30 min)
- dojazd do linii napowietrznej (30 min)
- kontrolę optyczną linii napowietrznej z pojazdów (170 min)
- przerwę śniadaniową (30 min)
- kontrolę optyczną linii napowietrznej w odległości 15 m podczas deszczu (140 min)

- naprawę elementów linii (30 min)
- powrót do bazy (30 min)
- zakończenie pracy, raport (20 min).

Na rys. 8-4 pokazano typowe wartości hałasu (równoważnego poziomu dźwięku A) w czasie realizacji wymienionych czynności.



**Rys. 8-4.** Równoważny poziom dźwięku A podczas poszczególnych typowych operacji w czasie dnia pracy pracownika obsługującego linię WN

W tabeli 8-3 przedstawiono wyniki pomiaru poziomu ekspozycji (jak podano w rozdz. 8.1.5.2, zastosowano metodę dozymetryczną). Wynika z nich, że w omawianym przypadku elektromontera (pracownik fizyczny) pracującego przy obsłudze linii WN, wykonującego wymienione czynności, nie występuje hałas, który może spowodować utratę słuchu.

**Tabela 8-3.** Zmierzone i dopuszczalne ze względu na ochronę słuchu wartości hałasu na stanowisku pracy pracownika obsługującego linię WN

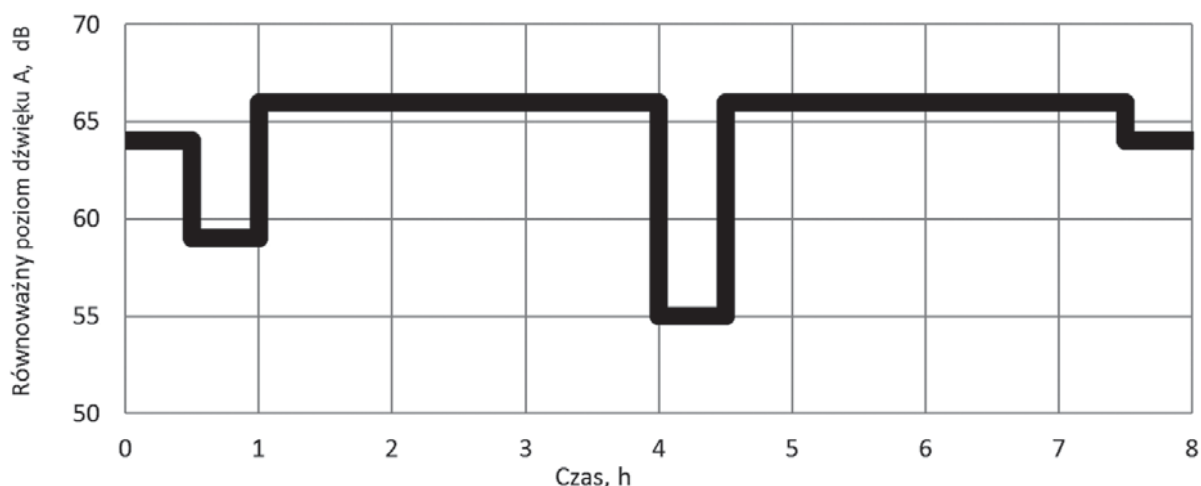
Parametry	Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, $L_{EX,8h}$ , dB	$L_{Amax}$ dB	$L_{Cpeak}$ dB
Wartości zmierzone	69,2	87,6	105,7
Wartości dopuszczalne	85,0	115,0	135,0

### Stanowisko pracownika obsługi sieci elektroenergetycznych WN w stacji elektroenergetycznej

Typowy profil pracy pracownika pracującego w stacji elektroenergetycznej obejmuje (z punktu widzenia ekspozycji na hałas) następujące czynności:

- omówienie poleceń dnia pracy (30 min)
- przygotowanie sprzętu do pracy (30 min)
- regulacje elementów przy izolatorach i uziomach (360 min)
- przerwę śniadaniową (30 min)
- zakończenie pracy, raport (30 min).

Na rys. 8-5 pokazano typowe wartości hałasu (równoważnego poziomu dźwięku A) w czasie wykonywania tych czynności.



**Rys. 8-5.** Równoważny poziom dźwięku A poszczególnych typowych operacji w czasie dnia pracy pracownika obsługującego stację elektroenergetyczną

W tabeli 8-4 przedstawiono wyniki pomiaru poziomu ekspozycji (jak podano w rozdz. 8.1.5.2, zastosowano metodę dozymetryczną). Wynika z nich, że w omawianym przypadku pracownika obsługującego stację elektroenergetyczną (pracownik fizyczny), wykonującego wymienione czynności, nie występuje hałas, który może spowodować utratę słuchu.

**Tabela 8-4.** Zmierzone i dopuszczalne ze względu na ochronę słuchu wartości hałasu na stanowisku pracownika obsługującego stację elektroenergetyczną

Parametry	Poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, $L_{EX,8h}$ , dB	$L_{Amax}$ dB	$L_{Cpeak}$ dB
Wartości zmierzone	65,3	86,5	106,2
Wartości dopuszczalne	85,0	115,0	135,0

## 8.2. Drgania na stanowiskach pracy

### 8.2.1. Drgania mechaniczne – podstawowe definicje

*Drgania mechaniczne (wibracje)* w fizyce są definiowane jako ruch cząstek ośrodka sprężystego względem ich położenia równowagi; mogą się rozprzestrzeniać zarówno w ośrodkach gazowych (m.in. dźwięki), płynnych, jak i stałych. Jednak w aspekcie ochrony i bezpieczeństwa człowieka w środowisku pracy rozpatrywane są *jedynie* drgania mechaniczne (wibracje), które docierają do pracownika przez bezpośredni kontakt części jego ciała z drgającymi ośrodkami stałymi. Rozróżniane są (Engel, 1993; Griffin, 1990; Koradecka i Lipowczan, 1999):

- drgania o działaniu ogólnym na organizm człowieka (drgania ogólne), tj. przenikające przez stopy, miednicę, plecy lub boki
- drgania działające na organizm człowieka przez kończyny górne (drgania miejscowe).

Ze względu na zróżnicowaną reakcję organizmu na drgania, w zależności od ich częstotliwości, w pomiarach przyspieszenia drgań wykorzystywane są odpowiednie częstotliwościowe charakterystyki korekcyjne. Po ich zastosowaniu uzyskuje się *skorygowane w dziedzinie częstotliwości wartości skuteczne przyspieszenia drgań*,  $a_{w,RMS}$ , w  $m/s^2$ . Stanowią one podstawę do wyznaczania wielkości służących do oceny narażenia pracownika na drgania oraz określania ryzyka zawodowego ze względu na drgania (PN-EN ISO 5349, PN-EN 14253+A1):

- dziennej ekspozycji  $A(8)$
- ekspozycji krótkotrwałej:
  - $a_{hv,max}$  dla drgań działających przez kończyny górne
  - $a_{w,max}$  dla drgań działających w sposób ogólny.

### 8.2.2. Oddziaływanie drgań mechanicznych na organizm człowieka

#### Skutki fizjologiczne

Drgania mechaniczne przenoszone do organizmu człowieka mogą negatywnie oddziaływać bezpośrednio na poszczególne tkanki i naczynia krwionośne bądź też powodować wzbudzenie drgań całego ciała lub jego części, a nawet struktur komórkowych. Długotrwałe narażenie człowieka na drgania może wywołać zaburzenia w organizmie, doprowadzając w konsekwencji do trwałych, nieodwracalnych zmian chorobowych; rodzaj tych zmian zależy od rodzaju drgań, na które jest eks-

ponowany człowiek (ogólne czy miejscowe), (Griffin, 1990; Harazin, 2000; Koradecka i Lipowczan, 1999; Koton i Harazin, 2000; Pelmeur i in., 1992).

### ***Drgania działające na organizm człowieka przez kończyny górne***

Narażenie na drgania mechaniczne przenoszone do organizmu przez kończyny górne powoduje głównie zmiany chorobowe w układach:

- krążenia krwi (naczyniowym)
- nerwowym
- kostno-stawowym.

Zespół tych zmian został nazwany *zespołem wibracyjnym* (ang. *hand-arm vibration syndrome* – HAVS), (Griffin, 1990; Harazin, 2000; Koradecka i Lipowczan, 1999; Koton i Harazin, 2000; Pelmeur i in., 1992) i jest uznawany w wielu krajach za chorobę zawodową; w Polsce zajmuje siódmą pozycję na liście tych chorób. Najczęściej rejestrowaną postacią zespołu wibracyjnego jest tzw. postać naczyniowa, charakteryzująca się napadowymi zaburzeniami krążenia krwi w palcach rąk. Występujące wówczas napadowe skurcze naczyń krwionośnych objawiają się blednięciem opuszki jednego lub kilku palców. Stąd pochodzi jedno z potocznych określeń tej postaci zespołu wibracyjnego – „choroba białych palców” (ang. *vibration white finger* – VWF). Inną postacią zespołu wibracyjnego jest postać kostno-stawowa, która może wystąpić oddzielnie lub w połączeniu z postacią naczyniową.

Zmiany w układzie nerwowym powstałe na skutek działania drgań miejscowych to głównie zaburzenia czucia: dotyku, wibracji, temperatury, a także dolegliwości w postaci drętwienia czy mrowienia palców i rąk. Jeżeli narażenie na drgania jest długotrwałe, zmiany pogłębiają się, prowadząc do ograniczenia zdolności do pracy i wykonywania innych czynności życiowych. Jednym z badań przeprowadzanych w diagnostyce zespołu wibracyjnego jest badanie palestezjometryczne (czucia wibracji).

Zmiany w układzie kostno-stawowym ręki powstają głównie na skutek działania drgań miejscowych o częstotliwościach mniejszych od 30 Hz. Obserwowane są m.in. zniekształcenia szpar stawowych, zwapnienia torebek stawowych, zmiany okostnej, zmiany w utkaniu kostnym.

Na drgania mechaniczne oddziałujące na organizm człowieka przez kończyny górne narażeni są głównie operatorzy ręcznych narzędzi wibracyjnych.

### ***Drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka***

Negatywne skutki zawodowej ekspozycji na drgania o oddziaływaniu ogólnym dotyczą zwłaszcza układu kostnego i narządów wewnętrznych. W układzie kostnym zmiany chorobowe powstają głównie w odcinku lędźwiowym kręgosłupa, ale także w odcinku szyjnym. Zmiany te są określane jako zespół bólowy kręgosłupa.



Niekorzystne zmiany w narządach wewnętrznych, pojawiające się na skutek działania drgań ogólnych, są głównie wynikiem pobudzenia poszczególnych narządów do drgań rezonansowych (częstotliwości drgań własnych większości narządów zawierają się w zakresie  $2 \div 18$  Hz). Oznacza to, że drgania ogólne o częstotliwościach z tego zakresu i przyspieszeniach przekraczających określoną wartość progową mogą wywołać drgania narządów o niebezpiecznej amplitudzie, co z kolei może doprowadzić do pojawienia się zaburzeń w ich czynnościach: krwotoków wewnętrznych, wybroczyn, a nawet – w skrajnych przypadkach – do mechanicznego rozerwania (Griffin, 1990; Harazin, 2000; Koradecka i Lipowczan, 1999). Najczęściej takie niekorzystne zmiany zachodzą w czynnościach narządów układu pokarmowego, w tym głównie żołądka i przełyku. Drgania ogólne mogą być także przyczyną zaburzeń m.in. w narządzie przedsionkowo-ślimakowym ucha, narządach układu rozrodczego kobiet, narządach klatki piersiowej oraz narządach jamy nosowo-gardłowej.

Drgania o działaniu ogólnym, oprócz uszkodzeń narządów wewnętrznych, mogą wywoływać zaburzenia narządu równowagi, zaburzenia czynności mięśni i ścięgien, uszkodzenia stawów, pogarszanie się ostrości wzroku, zaburzenia w układzie krwionośnym.

Na drgania mechaniczne o działaniu ogólnym są narażeni przede wszystkim kierowcy, operatorzy maszyn budowlanych i drogowych. U tych pracowników drgania są przenoszone do organizmu z siedzisk pojazdów przez miednicę, plecy i boki. Zawodowa ekspozycja na drgania ogólne często jest też związana z obsługą przez pracowników maszyn i urządzeń stacjonarnych. W takich przypadkach drgania z obsługiwanych maszyn są transmitowane z podłoża do organizmu człowieka przez miednicę, plecy i boki, gdy pracuje w pozycji siedzącej, lub przez stopy, gdy pracuje na stojąco.

### **Skutki funkcjonalne**

Biologicznym skutkiem oddziaływania drgań miejscowych i ogólnych na organizm człowieka towarzyszą zazwyczaj tzw. skutki funkcjonalne (Griffin, 1990; Harazin, 2000; Koradecka i Lipowczan, 1999). Zalicza się do nich m.in.:

- wydłużenie czasu reakcji ruchowej
- wydłużenie czasu reakcji wzrokowej
- zakłócenia w koordynacji ruchów
- nadmierne zmęczenie
- bezsenność
- rozdrażnienie
- osłabienie pamięci.

Niekorzystne zmiany funkcjonalne prowadzą do obniżenia efektywności i jakości wykonywanej pracy, a czasami w ogóle ją uniemożliwiają. Są także przyczyną wzrostu prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku.

### 8.2.3. Charakterystyka narażenia na drgania mechaniczne zatrudnionych przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN

Podczas prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych drgania mechaniczne mogą stanowić istotne zagrożenie. Niektóre z wykonywanych operacji wiążą się z wykorzystaniem drgań mechanicznych jako czynnika technologicznego (m.in. zagęszczanie, ubijanie, wiercenie wibracyjne, szlifowanie oscylacyjne), innym zaś procesom drgania towarzyszą jako czynnik uboczny. W obu przypadkach drgania mechaniczne generowane przez różnego rodzaju źródła mogą powodować uszkodzenia konstrukcji budowlanych, a także maszyn i urządzeń; mogą zakłócać procesy technologiczne, są też przyczyną hałasu. Podczas bezpośredniego kontaktu człowieka z drgającym źródłem drgania są przekazywane do jego organizmu i zależnie m.in. od ich amplitudy oraz czasu narażenia na ich działanie mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia, a nawet życia. Zawodowe narażenie na drgania mechaniczne jest problemem badanym zarówno przez służby techniczne, jak i medyczne.

Ze względu na niepożądane zdrowotne, społeczne i ekonomiczne skutki zawodowej ekspozycji na drgania mechaniczne (obniżenie wydajności i jakości pracy, koszty związane z absencją, leczeniem i rentami inwalidzkimi) duże znaczenie mają:

- właściwa identyfikacja zagrożenia – rozpoznawanie źródeł nadmiernych drgań
- kontrolowanie stanowisk pracy przez wykonanie pomiarów drgań zgodnie z obowiązującymi procedurami
- analizowanie i ocenianie stanu zagrożenia i ryzyka zawodowego
- ograniczanie stwierdzonego zagrożenia poprzez realizowanie opracowanych programów poprawy bezpieczeństwa pracy (uwzględniających minimalizowanie drgań metodami technicznymi i organizacyjno-administracyjnymi oraz stosowanie profilaktyki medycznej)
- prowadzenie wstępnych i okresowych badań lekarskich pracowników
- dostarczanie narażonym pracownikom informacji (np. w formie szkoleń) o występującym zagrożeniu oraz wskazówek dotyczących prawidłowej, bezpiecznej obsługi maszyn, urządzeń i narzędzi.

### **8.2.4. Źródła drgań mechanicznych na stanowiskach obsługi sieci elektroenergetycznych WN**

Podczas prac prowadzonych przy obsłudze sieci elektroenergetycznych (m.in. remonty, przeglądy, oględziny, prace instalacyjne) wykorzystywane są narzędzia i urządzenia będące źródłami drgań mechanicznych.

#### **8.2.4.1. Źródła drgań działających w sposób ogólny**

Źródłami drgań o działaniu ogólnym są m.in.:

- podłogi, podesty, pomosty, na których są zlokalizowane stanowiska pracy; (rzeczywistymi źródłami drgań są w tym przypadku eksploatowane w pomieszczeniach lub poza nimi maszyny oraz urządzenia stacjonarne, przenośne lub przewoźne, wprawiające w drgania podłoże, na którym stoi operator, np. kompresory, agregaty, transformatory dużych mocy)
- platformy drgające
- siedziska i podłogi środków transportu (samochodów, ciągników, wózków, dźwigów itp.)
- siedziska i podłogi maszyn budowlanych (np. do robót ziemnych, fundamentowania, zagęszczania gruntów).

#### **8.2.4.2. Źródła drgań działających przez kończyny górne**

Źródłami drgań działających na organizm człowieka przez kończyny górne są głównie:

- ręczne narzędzia uderzeniowe o napędzie pneumatycznym, hydraulicznym, spalinowym lub elektrycznym (młotki pneumatyczne, ubijaki mas formierskich i betonu, nitowniki, wiertarki udarowe, klucze udarowe itp.)
- ręczne narzędzia obrotowe o napędzie elektrycznym, pneumatycznym, hydraulicznym lub spalinowym (wiertarki, szlifierki, pilarki łańcuchowe itp.)
- ręczne narzędzia oscylacyjne o napędzie elektrycznym lub pneumatycznym (szlifierki, piły itp.)
- dźwignie sterujące maszyn i pojazdów obsługiwane rękami
- źródła technologiczne (np. obrabiane elementy trzymane w dłoniach lub prowadzone ręką).

Niektóre narzędzia ręczne, zaliczane do typowych źródeł drgań miejscowych (np. młoty wibracyjne, ubijaki), mogą generować drgania o bardzo dużej amplitudzie. Takie drgania mogą być wtedy przenoszone przez ramiona na tułów i głowę, co w konsekwencji może doprowadzić do wzbudzenia drgań rezonansowych na-

rządów wewnętrznych. W takim przypadku narzędzia ręczne są również źródłami drgań o działaniu ogólnym.

### **8.2.5. Charakterystyka prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN w Polsce w aspekcie narażenia na drgania mechaniczne**

Przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia są wykonywane następujące rodzaje prac: oględziny, przeglądy, remonty i prace modernizacyjne, naprawy awaryjne, prace montażowe. Przy niektórych z tych prac (takich jak oględziny czy przeglądy) zagrożenie drganiami nie występuje w ogóle lub jest nieznaczące.

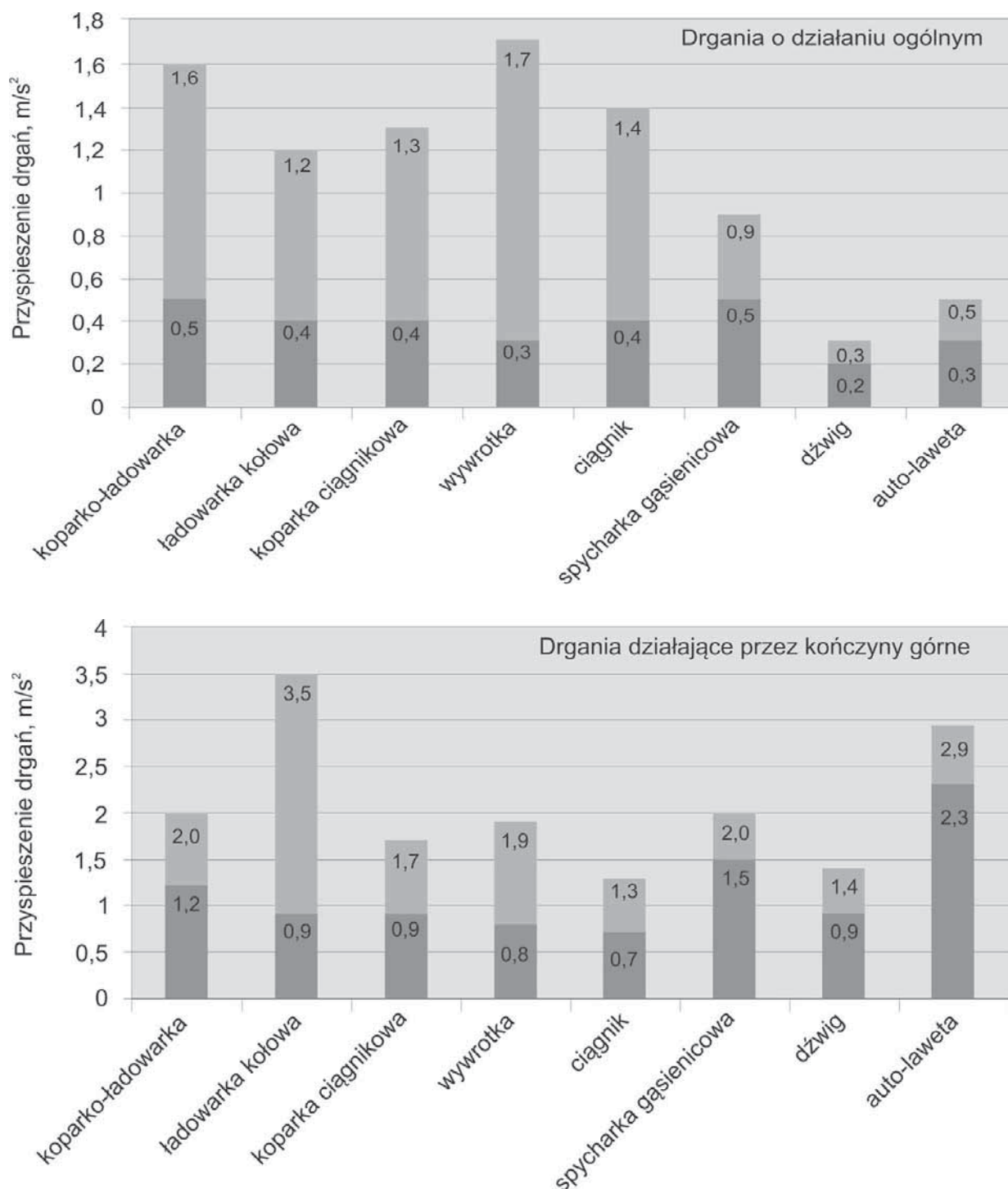
Z narażeniem na drgania najczęściej są związane operacje przeprowadzane z użyciem narzędzi lub urządzeń mechanicznych wykorzystywanych przy remontach, pracach modernizacyjnych, naprawach lub pracach montażowych. Z reguły drgania działają na organizm pracownika w wyniku bezpośredniego kontaktu z drgającym urządzeniem. Jednak przebywanie pracowników w pobliżu dużych urządzeń, zarówno mobilnych (np. młot wyburzeniowy zamontowany na ciągniku) jak i stacjonarnych (sprężarki, transformatory dużych mocy), może także powodować narażenie na drgania. W przypadku transformatorów zarówno hałas jak i drgania mechaniczne powstają głównie w wyniku zjawisk elektrostrykcji (zmiany wymiarów materiału pod wpływem pola elektrycznego) i magnetostrykcji (zmiany wymiarów pod wpływem pola magnetycznego). Częstotliwość powstających w ten sposób drgań (i dźwięku) jest dwa razy większa od częstotliwości napięcia dla sieci elektroenergetycznej w Polsce i wynosi 100 Hz. Ponieważ drgania z tego zakresu częstotliwości nie należą do najbardziej szkodliwych dla organizmu człowieka ( $0,5 \div 80$  Hz), najczęściej są traktowane jako czynnik uciążliwy i pogarszający komfort pracy. Również drgania związane z wykorzystywaniem ruchomych podestów (tzw. podnośników koszowych) najczęściej nie stanowią istotnego zagrożenia.

Ograniczaniu narażenia sprzyjają nowe rozwiązania konstrukcyjne urządzeń sterowanych z kabiny pojazdu (np. żuraw wielofunkcyjny pracujący jako dźwig, podnośnik lub świder), czy też rozwiązania urządzeń z przeniesionym układem sterowania, takie jak wiertnice do przewiertów sterowanych czy nawijarki/wciągarki przewodów.

Największe zagrożenia drganiami przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia występują podczas robót ziemnych związanych z remontami, modernizacjami, naprawami czy montażem. Wykorzystywane są wtedy maszyny,

których operatorzy narażeni są zarówno na drgania o działaniu ogólnym, jak i przez kończyny górne.

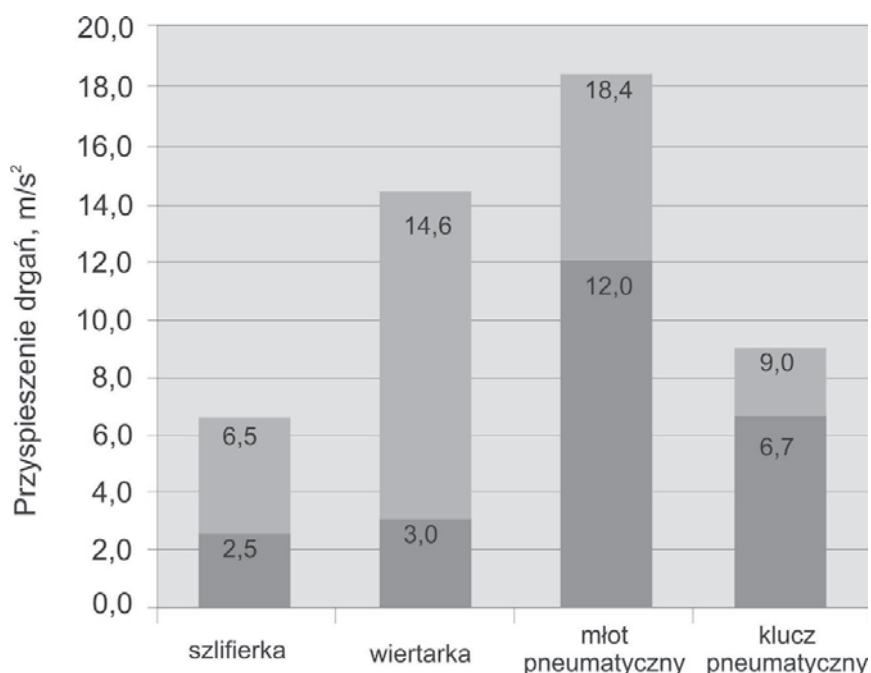
Na rysunku 8-6 przedstawiono przykładowe wartości przyspieszeń drgań ogólnych (na siedziiskach) i działających przez kończyny górne (na kierownicach i dźwigniach sterujących) dla maszyn do robót ziemnych stosowanych podczas prac przy obsłudze sieci elektroenergetycznych.



**Rys. 8-6.** Przykładowe wartości przyspieszeń drgań ogólnych i działających przez kończyny górne, pochodzących od maszyn do robót ziemnych



Duże narażenie może pochodzić także od narzędzi ręcznych, których drgania są często przyczyną zespołu wibracyjnego. Na rysunku 8-7 przedstawiono przykładowe wartości przyspieszeń drgań działających przez kończyny górne, wytwarzanych przez narzędzia ręczne stosowane przy obsłudze sieci elektroenergetycznych.



Rys. 8-7. Przykładowe wartości przyspieszeń drgań działających przez kończyny górne, wytwarzanych przez narzędzia ręczne

### 8.2.6. Przykładowe profile narażenia na drgania mechaniczne przy obsłudze sieci elektroenergetycznych WN w Polsce

Dalej zostały przedstawione przykładowe profile narażenia na drgania mechaniczne przy obsłudze sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

#### Profil nr 1

##### Stanowisko operatora koparko-ładowarki

Wykonywane czynności: jazda w terenie, załadunek, rozładunek.

Tabela 8-5. Wyniki badania drgań mechanicznych działających przez kończyny górne

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{hwi}^2$ m/s <sup>2</sup>			Wartość sumy wektorowej przyspieszenia drgań $a_{hwi}^2$ m/s <sup>2</sup>	Dzienna ekspozycja na drgania $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z			
1,43	1,16	0,80	2,01	1,59	300

**Tabela 8-6.** Wyniki badania drgań mechanicznych o działaniu ogólnym

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{wi}$ , m/s <sup>2</sup>			Dzienna ekspozycja na drgania (największa składowa kierunkowa) $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z		
0,58	0,47	1,01	$A(8)_Z = 0,80$	300

**Profil nr 2****Stanowisko kierowcy autolawety**

Wykonywana czynność: transport wiertnicy.

**Tabela 8-7.** Wyniki badania drgań mechanicznych działających przez kończyny górne

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{hwi}$ , m/s <sup>2</sup>			Wartość sumy wektorowej przyspieszenia drgań $a_{hwi}$ , m/s <sup>2</sup>	Dzienna ekspozycja na drgania $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z			
1,45	1,16	2,16	2,85	1,88	210

**Tabela 8-8.** Wyniki badania drgań mechanicznych o działaniu ogólnym

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{wi}$ , m/s <sup>2</sup>			Dzienna ekspozycja na drgania (największa składowa kierunkowa) $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z		
0,46	0,37	0,77	$A(8)_Z = 0,51$	210

**Profil nr 3****Stanowisko operatora dźwigu**

Wykonywana czynność: stawianie słupów wysokiego napięcia.

**Tabela 8-9.** Wyniki badania drgań mechanicznych działających przez kończyny górne

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{hwi}$ , m/s <sup>2</sup>			Wartość sumy wektorowej przyspieszenia drgań $a_{hwi}$ , m/s <sup>2</sup>	Dzienna ekspozycja na drgania $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z			
0,55	0,51	1,08	1,31	0,80	180

**Tabela 8-10.** Wyniki badania drgań mechanicznych o działaniu ogólnym

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{wv}$ , m/s <sup>2</sup>			Dzienna ekspozycja na drgania (największa składowa kierunkowa) $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z		
0,11	0,10	0,24	$A(8)_Z = 0,15$	180

**Profil nr 4****Stanowisko operatora szlifierki**

Wykonywane czynności: szlifowanie i cięcie profili stalowych.

**Tabela 8-11.** Wyniki badania drgań mechanicznych działających przez kończyny górne

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{hw}$ , m/s <sup>2</sup>			Wartość sumy wektorowej przyspieszenia drgań $a_{hw}$ , m/s <sup>2</sup>	Dzienna ekspozycja na drgania $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z			
3,12	3,34	4,68	6,54	3,27	120

**Profil nr 5****Stanowisko operatora młota pneumatycznego**

Wykonywana czynność: rozbijanie podłoża ziemnego.

**Tabela 8-12.** Wyniki badania drgań mechanicznych działających przez kończyny górne

Zmierzona skorygowana skuteczna wartość przyspieszenia drgań $a_{hw}$ , m/s <sup>2</sup>			Wartość sumy wektorowej przyspieszenia drgań $a_{hw}$ , m/s <sup>2</sup>	Dzienna ekspozycja na drgania $A(8)$ , m/s <sup>2</sup>	Czas trwania czynności $t$ , min
składowa X	składowa Y	składowa Z			
8,43	7,97	11,38	16,25	4,69	40

**Bibliografia**

*Acoustic Noise Measurements* (1979). Bruel&Kjaer.

Arciszewski J. (1992) *Metodyka i zasady wyznaczania poziomu hałasu w otoczeniu linii i stacji elektroenergetycznych wysokiego napięcia*. (Projekt). Warszawa, Instytut Energetyki.

- Augustyńska D. i in. (2010) *Hałas. Hałas infradźwiękowy i ultradźwiękowy*. [W:] Nauka o pracy – bezpieczeństwo, higiena i ergonomia. T. 6. Zagrożenia czynnikami niebezpiecznymi i szkodliwymi w środowisku pracy. Red. nauk. D. Koradecka. Warszawa, CIOP-PIB.
- Augustyńska D., Kaczmarska A., Mikulski W. (2009) Rozdziały: *Hałas słyszalny, Hałas infradźwiękowy*. [W:] Ocena ryzyka zawodowego. Red. nauk. W.M. Zawieska Wwarszawa, CIOP-PIB.
- Bartodziej G., Tomaszewski M. (2010) *Problemy rozległych awarii sieci elektroenergetycznych*. Racibórz, Nowa Energia.
- Bezpieczeństwo i higiena pracy* (2008) Red. nauk. D. Koradecka. Warszawa, CIOP-PIB.
- Dobroczek A., Dudek B. (2010) *Możliwości zastosowania stacji i pól przewoźnych*. Automatyka elektroenergetyczna, nr 3, 30-33.
- Dudek B. (2010) *Prace pod napięciem w sieci dystrybucyjnej – podręcznik*. INPE, nr 32.
- Dudek B., Pilch W. (2010) *Utrzymanie ciągłości zasilania energia elektryczna odbiorców za pomocą rozwiązań tymczasowych*. Energetyka, nr 2.
- Dudek B. (2010). *Bez wyłączeniowe techniki eksploatacji sieci przesyłowej*. Elektroenergetyka, nr 2-3, 117-128.
- Dudek B., Pilch W. (2010) *Systemy gwarantowanego zasilania. Tymczasowe techniki utrzymania zasilania energią elektryczną*. Elektromfo, nr 6, 22-26.
- Dudek B. (2010) *Polska norma PN-EN 50110 Eksploatacja urządzeń elektrycznych a projektowane zmiany przepisów państwowych*. Elektromfo, nr 9, 50-56.
- Dudek B. (2010) *Prace pod napięciem – skąd i dokąd zmierzamy*. Biuletyn PSE Operator, nr 5, 34-39.
- Dudek B. (2011) *Prace przy przewodach pod napięciem na obiektach sieci przemysłowej*. [W:] Materiały z Konferencji Naukowo-Technicznej „Elektroenergetyczne linie kablowe i napowietrzne” Kabel 2011. Stowarzyszenie Elektryków Polskich.
- Engel Z. (1993) *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Warszawa, PWN.
- Engel Z., Wszolek T. (1996) *Wpływ ulotu na hałas emitowany poprzez linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, t. 2, z. 2.
- Engel Z., Wszolek T. (1994) *Problematyka uciążliwości akustycznej linii elektroenergetycznych 110 – 400 kV w ocenach oddziaływania na środowisko*. [W:] Materiały z II Konferencji Naukowo-Technicznej „Pola elektromagnetyczne a energetyka i środowisko”. Bielsko-Biała. Stowarzyszenie Elektryków Polskich.
- Engel Z., Zawieska W.M. (2010) *Drgania w procesach pracy. Źródła, ocena, zagrożenia*. Warszawa, CIOP-PIB.
- Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W.M. (2001) *Metody aktywne redukcji hałasu*. Warszawa, CIOP.

- Giza A., Dudek B., Nowikow J. (2010) *Ubiory ochronne do prac pod napięciem – wymagania normalizacyjne a praktyka*. [W:] Materiały z X Konferencji „Prace pod napięciem”. 17-18 czerwca 2010 r. Łódź, 159-178.
- Griffin M.J. (1990) *Handbook of Human Vibration*. London, Academic Press.
- Harazin B. (2000) *Zagrożenie zdrowia wywołane działaniem drgań mechanicznych*. Sosnowiec, IMPiZŚ.
- Koradecka D., Lipowczan A. (1999) *Drgania mechaniczne (wibracje)*. [W:] Bezpieczeństwo pracy i ergonomia. T.1. Red. D. Koradecka. Warszawa, CIOP, 323-372.
- Koszta R., Mikulski J., Dąbrowski J. (2003) *Zawodność przewodów odgromowych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 1 (materiały z Sympozjum EUT 2003 r.).
- Koton J., Harazin B. (2000) *Skutki zdrowotne zawodowego narażenia na drgania miejscowe*. Warszawa, CIOP.
- Kowalski P. (2006) *Pomiar i ocena drgań mechanicznych w środowisku pracy według nowych przepisów prawnych*. Bezpieczeństwo Pracy, nr 9(420), 24-26.
- Kucharski J. (2011) *Raport o na środowisko przedsięwzięcia: budowa linii elektroenergetycznej 400 KV*. Miłosna-Siedlce Ujrzanów. Warszawa, styczeń 2011 r. ELBIT Consulting. (Internet).
- Kuczowska I., Argasińska H. (2002) *Komentarz do normy PN-EN 05100-1*. Warszawa, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP.
- Lipowczan A. (1987) *Podstawy pomiarów hałasu*. Warszawa-Katowice, Główny Instytut Górnictwa – Liga Walki z Hałasem.
- Mikulski W. (2013) *Wpływ pola elektrycznego i magnetycznego 50 Hz na wartości wskazywane przez przyrządy do pomiaru hałasu*. [W:] Materiały z XVI Konferencji NOISE CONTROL'13, Ryn. [CD]. Warszawa, CIOP-PIB.
- Pelmear P.L., Taylor W., Wasserman D.E. (1992) *Hand-Arm Vibration*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- Rogmski L., Dudek B. (2010) *Wymiana pod napięciem przewodów odgromowych na OPGW w Polsce*. [W:] Materiały z Konferencji „Prace od napięciem”. Łódź 17-18 czerwca 2010 r. Stowarzyszenie Elektryków Polskich, 95-111.
- Stniżewska E. (2005) *Przewody odgromowe typu OPGW w liniach NN – doświadczenia eksploatacyjne PSE SA*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 1 (materiały z Sympozjum EIY 2005 r.).
- Szastałło J. i in. (2010) *Technika i technologie. Rozwiązania tymczasowe. Ciągłość zasilania. Energia elektryczna*. Biuletyn branżowy PTPiREE, nr 9, 13-18.
- Tarko R. (2007) *Modelowanie ulotu energetycznego dla analizy warunków eksploatacyjnych wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych*. Rozprawa doktorska. Kraków, AGH.
- Wszolek T. (2010) *Modelowanie rozkładów wskaźników hałasu ulotu w otoczeniu linii wysokiego napięcia*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 11b.



- Wszolek T. (2006a) *Prognozowanie poziomu LDWN hałasu ulotu w liniach elektroenergetycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 1, 283-286.
- Wszolek T. (2006b) *Ustalenie standardowych szerokości pasów technologicznych dla istniejących linii 220 i 400 kV*. Kraków, Energoprojekt.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy*. DzU nr 217, poz. 1833: ostanía zm. DzU 2009, nr 105, poz. 873.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z 30 lipca 2002 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych kobietom*. DzU nr 127, poz. 1092.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24 sierpnia 2004 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym*. DzU nr 200, poz. 2047 wraz ze zm.: DzU 2005, nr 136, poz. 1145.
- PN-77/E 05118 *Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Elektroenergetyczne linie i stacje wysokiego napięcia. Dopuszczalny poziom zakłóceń. Ogólne wymagania i badania terenowe*.
- PN-81/N-01306 *Hałas. Metody pomiaru. Wymagania ogólne*.
- PN-EN 14253+A1:2011 *Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia – Wytyczne praktyczne*.
- PN-EN 31010:2010 *Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka*.
- PN-EN 50341-1:2005 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne – Wspólne specyfikacje*.
- PN-EN 50341-1:2005 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne*.
- PN-EN 50341-3-22:2010 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych – Polska wersja EN 50341-3-22:2001*.
- PN-EN 60942:2005 *Elektroakustyka. Kalibratory akustyczne*.
- PN-EN 61252:2000 *Elektroakustyka. Wymagania dotyczące indywidualnych mierników ekspozycji na dźwięk*.
- PN-EN 61672-1:2005 *Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania*.
- PN-EN 61672-2:2005 *Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku – Część 2: Badania typu*.
- PN-EN 61672-3:2007 *Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku – Część 3: Badania okresowe*.
- PN-EN ISO 4871:2002 *Akustyk. Deklarowanie i weryfikowanie wartości emisji hałasu maszyn i urządzeń*.
- PN-EN ISO 5349:2004 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 1: Wymagania ogólne. Część 2: Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy*.

PN-EN ISO 9612:2011 *Akustyka. Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna.*

PN-EN ISO 9614-1,2:2010 2000 *Akustyka. Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów natężenia dźwięku.*

PN-ISO 1999:2000 *Akustyka. Wyznaczanie ekspozycji zawodowej na hałas i szacowanie uszkodzenia słuchu wywołanego hałasem.*

PN-N-01307:1994 *Hałas – Dopuszczalne wartości parametrów hałasu w środowisku pracy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.*

PN-N-01339:2000 *Metody pomiaru i oceny hałasu linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia.*

PN-N-18002:2011 *Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.*

PN-Z-01338:2010 *Akustyka. Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.*

