

Analiza obciążeń napowietrznych linii najwyższych napięć w aspekcie wytwarzania pola magnetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę szacowania natężenia pola magnetycznego, wytwarzanego przez napowietrzne linie najwyższych napięć w oparciu o analizę ich obciążeń. Analizę oparto na podstawie danych z rocznych obciążeń czterech reprezentatywnych linii napowietrznych eksploatowanych na terenie kraju. Na podstawie średnich rocznych oraz dobowych obciążeń przedstawiono uśrednione wartości natężenia pola magnetycznego występującego w otoczeniu analizowanych linii napowietrznych.

Abstract. This paper presents a method of estimating of the magnetic field generated by high voltage overhead lines, based on the analysis of their loads. The analysis was based on data from four representative annual loads of operating in the country overhead lines. On the basis of the average annual and daily load, there have been shown average values of occurring around overhead lines magnetic field. (**Analysis of loads of the overhead high voltage lines in the aspect of magnetic field generating**).

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, linie elektroenergetyczne

Keywords: magnetic field, power lines

Wstęp

Oddziaływanie na środowisko pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez linie napowietrzne najwyższych napięć jest zagadnieniem będącym w centrum zainteresowania badaczy od ponad 30 lat. Przeprowadzone dotychczas badania ujawniły istnienie wielu efektów biologicznych, które mogą wystąpić w organizmach żywych poddanych działaniu pól elektromagnetycznych o wartościach zbliżonych do tych, jakie występują w sąsiedztwie linii napowietrznych wysokiego napięcia. W związku z tym szereg krajów wprowadziło normy, przepisy lub zalecenia ograniczające poziomy pola elektrycznego i magnetycznego w środowisku. Celem tych ograniczeń jest ochrona zdrowia ludzi przed skutkami długotrwałego oddziaływania, przede wszystkim składowej magnetycznej pola. W większości krajów wartości dopuszczalne składowej magnetycznej pola są zbliżone do 80 A/m tj. poziomu rekomendowanego przez Unię Europejską [2], jednak jak wskazują ostatnie analizy [4], w niektórych krajach (Holandia, Szwajcaria, Włochy) czy też na części ich terytoriów (np. prowincje włoskie: Toscana, Emilia Romana, Veneto) zaleca się stosowanie znacznie niższych wartości na poziomie od 0,8 do 0,25 A/m. Można przypuszczać, że sygnałem do przyjęcia zaostrożnych (niższych) wartości dopuszczalnych były właśnie doniesienia o możliwym karcinogennym wpływie długotrwałej ekspozycji w polu magnetycznym, wytwarzanym przez linie napowietrzne wysokiego napięcia. Doniesienia te oparte były o wyniki jednego z dużych badań epidemiologicznych przeprowadzonych pod kierownictwem G. Drapera [3], a także sprawozdania z tzw. projektu SAGE (Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs) [8] oraz raportu znanego pod nazwą Biolnitiative Report [1].

Należy zwrócić uwagę, że niższe od 80 A/m (poziom dopuszczalny rekomendowany przez Radę Europy) wartości natężenia pola magnetycznego przyjęte do stosowania w kilku krajach Unii Europejskiej odnoszą się przede wszystkim do miejsc długotrwałego przebywania dzieci (mieszkania, szkoły) i określone są uśrednionymi przez okres jednego roku wartościami natężenia pola magnetycznego. Do tej pory brak jest w literaturze wyników badań określających uśrednione wartości natężenia pola magnetycznego występujące w otoczeniu linii napowietrznych wysokiego napięcia. W niniejszym artykule podjęto próbę wyjaśnienia tej kwestii.

Określenie poziomów pola magnetycznego w sąsiedztwie linii napowietrznych najwyższych napięć

W celu ustalenia wartości natężenia pola magnetycznego, jakie występuje w sąsiedztwie obiektów elektroenergetycznych, w tym linii napowietrznych, obowiązujące w Polsce przepisy nakazują (pkt 6 w załączniku nr 2 do rozporządzenia [7]) stosowanie poprawek pomiarowych, umożliwiających uwzględnienie parametrów pracy instalacji (linii napowietrznej) najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko. W przypadku analiz teoretycznych (obliczeniowych), wykonywanych na potrzeby sporządzania, przede wszystkim raportów oddziaływania na środowisko, uwzględnienie parametrów pracy linii, które determinują warunki najbardziej niekorzystne z punktu widzenia ochrony środowiska, sprowadza się do przeprowadzenia obliczeń rozkładu natężenia pola magnetycznego dla sytuacji, w której:

- odległość przewodów od ziemi jest najmniejsza,
- natężenie prądu płynącego przez linię jest równe dopuszczalnej długotrwałej obciążalności jej przewodów w warunkach zimowych.

Obciążalność ta jest różna w zależności od dopuszczalnej temperatury przewodów. Dla starszych linii przyjmuje się ją na poziomie +40°C, natomiast dla linii nowszych konstrukcji przyjmuje ona wartości +60°C, a nawet +80°C. Warto wspomnieć, że aktualnie projektowane są linie, w których przewiduje się zastosowanie jako przewodów roboczych, tzw. przewodów wysokotemperaturowych (niskozwisowych), których dopuszczalna temperatura pracy może sięgać 180°C.

Podobnie postępuje się w przypadku przeliczeń (uwzględniania poprawek) wyników pomiarów, które dla obiektów eksploatowanych wykonywane są przy opracowywaniu:

- przeglądów ekologicznych,
- analiz porealizacyjnych,
- ekspertyz środowiskowych.

W takich sytuacjach wyniki pomiarów przeprowadzonych w aktualnych warunkach pracy linii (przy aktualnym w czasie pomiarów obciążeniu linii) przeliczane są zazwyczaj z uwzględnieniem dopuszczalnej długotrwałej obciążalności przewodów w warunkach zimowych, przy czym przeliczenia takiego można dokonać jedynie dla linii jednotorowych. W konsekwencji takiego postępowania do określania największych spodziewanych wartości natężenia

pola magnetycznego w sąsiedztwie linii napowietrznych najwyższych napięć (220 i 400 kV), przyjmuje się dopuszczalne obciążenia linii, które dla 3 typowych rodzajów linii zestawiono w tabeli 1.

W przygotowywanych dokumentach związanych z procedurą lokalizacyjną inwestycji elektroenergetycznych, a także w materiałach opracowywanych na potrzeby oceny środowiskowej obiektów istniejących, obliczeń rozkładów natężenia pola magnetycznego dokonuje się przyjmując maksymalne dopuszczalne obciążenie linii. Wyniki tych obliczeń zaprezentowane w pracach [5,6] wskazują, że jakkolwiek w żadnym z przypadków dopuszczalna wartość natężenia pola magnetycznego (60 A/m) ustalona w przepisach [7] nie jest przekroczona ani pod linią, ani w jej sąsiedztwie, to na dużych obszarach pod liniami o napięciu 220 lub 400 kV występuje pole magnetyczne, którego poziomy wielokrotnie przekraczają wartości uznawane przez niektóre środowiska naukowe za szkodliwe dla zdrowia człowieka w przypadku ekspozycji długotrwałej (ok. 0,25 A/m). Są też one znacznie większe niż poziomy graniczne przyjęte do stosowania w niektórych krajach (Szwajcaria, Słowenia, Holandia oraz niektóre prowincje włoskie), które jednak ustalone zostały przy założeniu przeciętnego (uśrednionego) obciążenia linii. Dokonanie zatem stosownych porównań wymaga znajomości rozkładów natężenia pola magnetycznego w sąsiedztwie linii napowietrznych wyznaczonych nie w oparciu o maksymalną ich obciążalność (tabela 1), która najczęściej występuje krótkotrwale, lub nie występuje nigdy, lecz na podstawie średnich (przeciętnych) obciążeń linii. Brak w literaturze przedmiotu danych dotyczących długotrwałych obciążeń linii najwyższych napięć uniemożliwił do tej pory wyznaczenie średnich wartości natężenia pola magnetycznego pod takimi obiektami. Uzyskane¹ przez autorów artykułu dane obciążeń czterech linii o napięciu 220 i 400 kV umożliwiły oszacowanie uśrednionych wartości natężenia pola magnetycznego występującego w ich otoczeniu.

Tabela 1. Dopuszczalna obciążalność długotrwała linii napowietrznych 220 i 400 kV przy przyjęciu maksymalnej temperatury przewodów +60°C

Napięcie linii	Seria słupów	Typ przewodów i rodzaj wiązki	Dopuszczalna obciążalność długotrwała linii w warunkach zimowych przy temp. przewodów +60°C
220 kV	H52 M52	1xAFL-8 525 mm ²	1250 A
400 kV	Y52 Z52	2xAFL-8 525 mm ²	2500 A
400 kV	Z33 E33	3xAFL-8 350 mm ²	2850 A

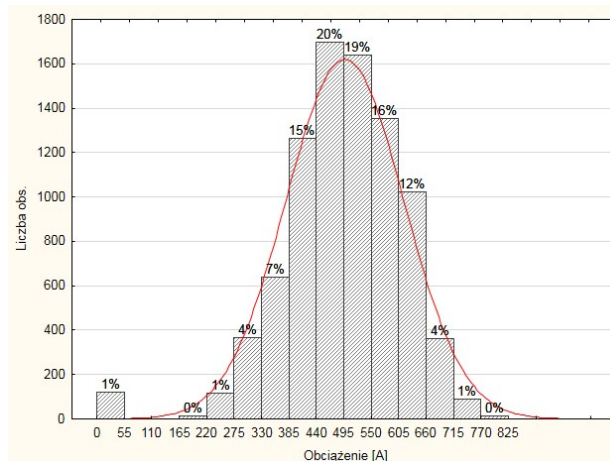
Analiza obciążeń linii napowietrznych najwyższych napięć

Do analizy wytypowano cztery linie najwyższych napięć, które wg operatora systemu przesyłowego PSE SA uznane zostały jako reprezentatywne i najbardziej obciążone w krajowym systemie elektroenergetycznym:

- Linia A jednorodowa o napięciu 220 kV wykonana na słupach serii Hc₄₀₂ z przewodami stalowo-aluminiowymi typu AFL 8-402 mm² o obciążalności prądowej I_d = 830 A, wynikającej z nastaw systemu zabezpieczeń tej linii,

- Linia B dwutorowa o napięciu 220 kV wykonana na słupach serii PN z przewodami w torze 1 typu ACCC/TW 460 mm² (niskożwisowe) o obciążalności prądowej I_d = 1300 A, a w torze 2 typu AFL 8-402 mm² o obciążalności prądowej I_d = 990 A, wynikającej z nastaw systemu zabezpieczeń tej linii,
- Linia C jednorodowa o napięciu 400 kV wykonana na słupach serii F z przewodami stalowo-aluminiowymi typu 2xAFL 8-402 mm² o obciążalności prądowej I_d = 1660 A, wynikającej z nastaw systemu zabezpieczeń tej linii,
- Linia D dwutorowa o napięciu 400 kV wykonana na słupach serii Z52 z przewodami stalowo-aluminiowymi typu 2xAFL 8-525mm² o obciążalności prądowej I_d = 1960 A, wynikającej z nastaw systemu zabezpieczeń tej linii.

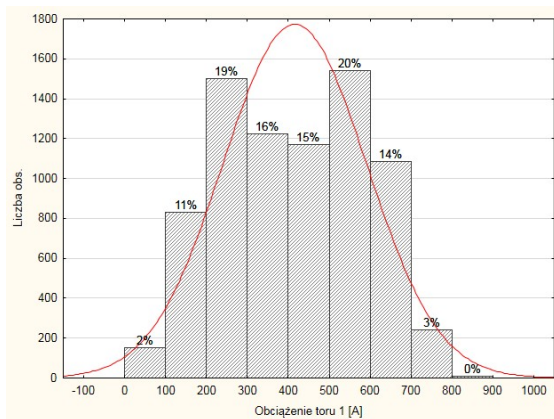
Dla linii A uzyskano wyniki obciążeń w okresie od lipca 2009 r do czerwca 2010 r. rejestrowane co godzinę. Linia ta była w ciągu analizowanego okresu wyłączana dwukrotnie (raz na 4 godziny, a raz na 5 dni). W celu określenia zróżnicowania oraz symetrii rozkładu obciążeń linii A w okresie 12 miesięcy poddano obróbce statystycznej 8695 wyników pomiarów prądu linii. Obciążenie linii A zmieniło się w zakresie od 0 do 825 A. Przez 50% analizowanego okresu czasu linia ta była obciążona prądami z przedziału od 428 A do 575 A. Niewielka różnica między wartością średnią a medianą potwierdza równowagę między ilością godzin w ciągu roku z obciążeniami mniejszymi oraz większymi od wartości średniej czy mediany. Histogram obciążenia linii A (rys.1) także świadczy o znacznej symetrii rozkładu danych empirycznych. Z jego przebiegu wynika, że linia ta najczęściej była obciążona prądami z przedziału 440-495 A (20% wszystkich wyników pomiarów) oraz prądami z przedziału 495-550 A (19% wszystkich wyników pomiarów). Obciążenia tej linii z zakresu od 0 do 55 A (1% wszystkich wyników pomiarów) spowodowane były głównie wyłączeniami linii w analizowanym okresie czasu, natomiast największe obciążenia z przedziału od 770 do 825 A miały miejsce tylko 10 razy i to przez krótki okres czasu. Przeciętne roczne obciążenie linii A było równe średniej arytmetycznej i wynosiło 495 A. Największą wartość obciążenia w ciągu roku obserwacji (I_{max} = 825 A) zanotowano w dniu 14.12.2009 r o godz. 16. Dla tego dnia sporządzono dobowy przebieg zmian obciążenia rozpatrywanej linii 220 kV, na którego podstawie obliczono średnie dobowe obciążenie linii, które wynosi I_{db} = 627 A. Linia A była najbardziej obciążona w miesiącach zimowych (grudzień, styczeń i luty), a najmniejsze średnie miesięczne obciążenia zanotowano w lipcu 2009 i kwietniu 2010 roku.



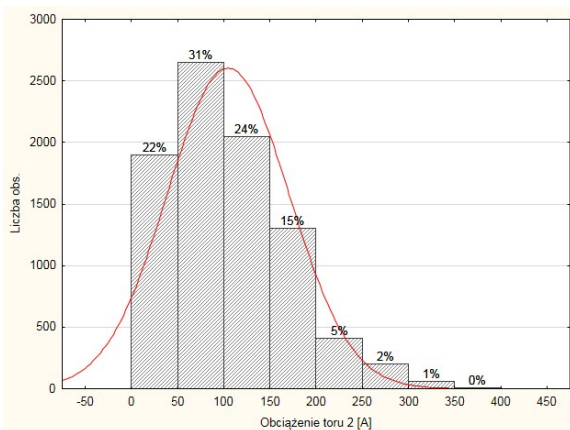
Rys.1. Histogram zmienności obciążeń jednorodowej linii A o napięciu 220 kV

¹ Dane te uzyskano podczas realizacji projektu nr 016/IEPWr/SM/2009/RB/MJ, którego zleceniodawcą był PSE-Operator S.A..

Dla linii B uzyskano wyniki obciążeń obu jej torów w okresie od sierpnia 2007 do lipca 2008, rejestrowane co 1 godzinę. Tor 1 linii B był w ciągu analizowanego okresu wyłączany 4 razy (na czas od 2 dni do 30 dni), tor 2 linii B wyłączany był kilka razy w ciągu 12 miesięcy na kilka godzin, a dłuższa przerwa w pracy tego toru trwała przez 7 dni. W celu określenia zróżnicowania oraz symetrii rozkładu obciążeń obu torów linii B o napięciu 220 kV w analizowanym okresie poddano obróbce statystycznej 8580 wyników pomiarów prądu obu torów linii. Obciążenie toru 1 zmieniało się w zakresie od 0 do 837 A. Przez 50% czasu (godzin) w analizowanym okresie ten tor linii 220 kV był obciążony prądami z przedziału od 263 A do 562 A. Niewielka różnica między wartością średnią a medianą potwierdza równowagę między ilością godzin w ciągu roku z obciążeniami mniejszymi oraz większymi od wartości średniej czy mediany. Histogram obciążenia toru 1 linii B (rys.2) również świadczy o znacznej symetrii rozkładu danych empirycznych. Z jego przebiegu wynika, że tor ten najczęściej był obciążony prądami z przedziału 200-300 A (19% wszystkich wyników pomiarów) oraz prądami z przedziału 500-600 A (20% wszystkich wyników pomiarów). Przeciętne roczne obciążenie toru 1 linii B było równe średniej arytmetycznej, czyli wynosiło 413 A.



Rys.2. Histogram zmienności obciążeń toru 1 linii B o napięciu 220 kV



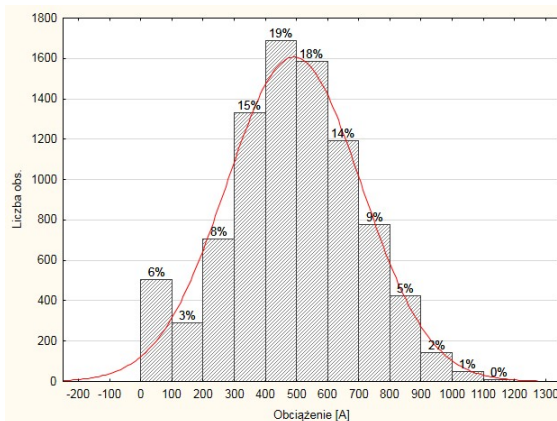
Rys.3. Histogram zmienności obciążeń toru 2 linii B o napięciu 220 kV

Obciążenie toru 2 linii B zmieniało się w zakresie od 0 do 392 A. Przez 50% czasu (godzin) w tym okresie ten tor linii był obciążony prądami z przedziału od 55 A do 145 A. Wartość średnia równa 104 A jest większa od mediany równej 95 A co potwierdza niewielką dodatnią asymetrię rozkładu empirycznego obciążeń. Świadczy o tym również

zaprezentowany na rysunku 3 histogram obciążenia toru 2 linii B. Z jego przebiegu wynika, że tor ten najczęściej był obciążony prądami z przedziału 50-100 A (31% wszystkich wyników pomiarów) oraz prądami z przedziału 100-150 A (24% wszystkich wyników pomiarów). Bardzo małe obciążenie tego toru linii (z przedziału od 0 do 50 A) występowało również dość często (22% wszystkich wyników pomiarów).

Największą wartość obciążenia w ciągu roku obserwacji ($I_{\max} = 837$ A) zanotowano w torze 1 linii B w dniu 14.11.2007 r. Na podstawie wyników pomiarów prądów z tego dnia obliczono średnie dobowe obciążenia obu torów linii, które wynoszą: dla toru 1 $I_{dbtor1} = 596$ A, a dla toru 2 $I_{dbtor2} = 180$ A. Oba tory linii B były najbardziej obciążone w październiku 2007 i czerwcu 2008 r., a najmniejsze średnie miesięczne obciążenia zanotowano w kwietniu i maju 2008.

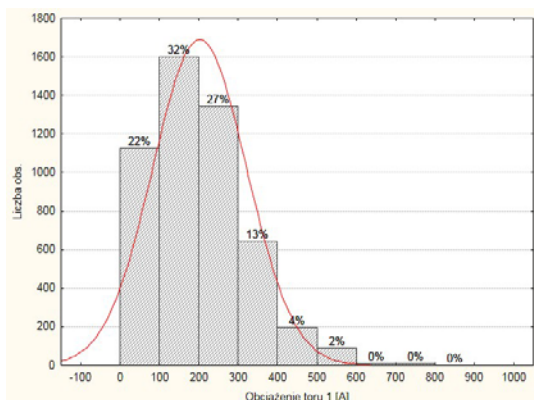
Dla jednotorowej linii C o napięciu 400 kV uzyskano wyniki obciążeń w okresie od października 2009 r do września 2010 r. rejestrowane co godzinę. Linia ta była w ciągu analizowanego okresu wyłączana sześciokrotnie (na czas od paru godzin do maksymalnie 5 dni). W celu określenia zróżnicowania oraz symetrii rozkładu obciążeń linii C w okresie 12 miesięcy poddano obróbce statystycznej 8695 wyników pomiarów prądu linii. Obciążenie linii C zmieniało się w zakresie od 0 do 1152 A. Przez 50% analizowanego okresu czasu linia ta była obciążona prądami z przedziału od 359 A do 633 A. Praktycznie jednakowa wartość średniej arytmetycznej i mediany świadczy o symetrii i równowadze między ilością godzin w ciągu roku z obciążeniami mniejszymi oraz większymi od wartości średniej czy mediany. Histogram obciążenia linii C (rys.4) także świadczy o znacznej symetrii rozkładu danych empirycznych. Z jego przebiegu wynika, że linia ta najczęściej była obciążona prądami z przedziału 400-500 A (19% wszystkich wyników pomiarów) oraz prądami z przedziału 500-600 A (18% wszystkich wyników pomiarów). Obciążenia tej linii z zakresu od 0 do 100 A (6% wszystkich wyników pomiarów) spowodowane były głównie wyłączeniami linii w analizowanym okresie czasu, natomiast największe obciążenia powyżej 1000 A miały miejsce tylko 51 razy. Przeciętne roczne obciążenie linii C było równe średniej arytmetycznej i wynosiło 488 A. Największą wartość obciążenia w ciągu roku obserwacji ($I_{\max} = 1152$ A) zanotowano w dniu 22.12.2009 r o godz. 17. Dla tego dnia sporządzono dobowy przebieg zmian obciążenia rozpatrywanej linii 400 kV, na podstawie którego obliczono średnie dobowe obciążenie linii, które wynosi $I_{db} = 875$ A. Linia C była najbardziej obciążona w lipcu i kwietniu 2010 oraz grudniu 2009 r., a najmniejsze średnie miesięczne obciążenia zanotowano w maju i czerwcu 2010 r.



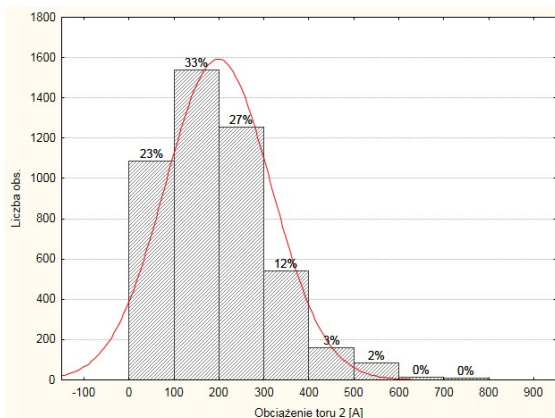
Rys.4. Histogram zmienności obciążeń jednotorowej linii C o napięciu 400 kV

Dla obu torów linii D o napięciu 400 kV uzyskano wyniki obciążeń w okresie od listopada 2007 r. do października 2008 r. W okresie od lutego do czerwca 2008 r obciążenia linii rejestrowane były co 4 godziny, w pozostałych miesiącach co godzinę. Tor 1 linii D był w ciągu analizowanego okresu wyłączany kilka razy (na czas od kilku godzin do 5 dni), natomiast tor 2 linii D wyłączany był również kilka razy na kilka godzin, a najdłuższa przerwa w pracy tego toru trwała przez 10 dni. W celu określenia zróżnicowania oraz symetrii rozkładu obciążeń obu torów linii D w okresie 12 miesięcy poddano obróbce statystycznej 5020 wartości prądu obciążenia toru 1 oraz 4688 wartości prądu obciążenia toru 2. Obciążenie toru 1 zmieniało się w zakresie od 0 do 855 A. Przez 50% analizowanego okresu czasu tor ten był obciążony prądami z przedziału od 107 A. do 270 A. Wartość średnia obciążenia toru 1 równa 200 A jest większa od mediany równej 187 A, co potwierdza niewielką dodatnią asymetrię rozkładu empirycznego obciążeń. Świadczy o tym również zaprezentowany na rysunku 5 histogram obciążenia toru 1. Z jego układu wynika, że tor 1 był najczęściej obciążony prądami z przedziału 100-200 A (32% wszystkich wyników pomiarów) oraz prądami z przedziału 200-300 A (27% wszystkich wyników pomiarów). Największe obciążenia z przedziału od 600 do 900 A miały miejsce tylko 20 razy.

Obciążenie toru 2 linii D zmieniało się w zakresie od 0 do 761 A. Przez 50% analizowanego okresu czasu tor ten był obciążony prądami z przedziału od 105 A do 264 A. Z histogramu obciążenia toru 2 (rys. 6) wynika, że był on najczęściej obciążony prądami z przedziału 100-200 A (33% wszystkich wyników pomiarów) oraz prądami z przedziału 200-300 A (27% wszystkich wyników pomiarów). Największe obciążenia z przedziału od 600 do 800 A miały miejsce tylko 21 razy.



Rys.5. Histogram zmienności obciążeń toru 1 linii D o napięciu 400 kV



Rys.6. Histogram zmienności obciążeń toru 2 linii D o napięciu 400 kV

Największą wartość obciążenia w ciągu roku obserwacji (855 A) zanotowano w torze 1 linii D w dniu 28.08.2008 r. (tor II był w tym okresie wyłączony). Na podstawie wyników pomiarów prądów z tego dnia obliczono średnie dobowe obciążenie toru 1 linii, który wynosi $I_{dbtor1} = 336$ A, ($I_{dbtor2} = 0$ A). Oba tory linii D były najbardziej obciążone w listopadzie i grudniu 2007 r., najmniejsze średnie miesięczne obciążenia zanotowano w czerwcu i lipcu 2008.

Wyniki analizy statystycznej (parametry rozkładu) prądów poszczególnych linii przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości średnie prądów obciążenia poszczególnych linii 220 i 400 kV oraz pozostałe parametry statystyczne rozkładu obciążeń w okresie 12 miesięcy

Linia	Licz. wyn.	Śred. arytm.	Śred. geom.	Odch. stand.	Mediana	War. min.	War. max.
A 220 kV	8695	495	436	117,8	500	0	825
B 220 kV Tor 1	8580	413	368	174,5	416	0	837
B 220 kV Tor 2	8580	104	77,3	65,7	95	0	392
C 400 kV	8695	488	321	215,8	491	0	1152
D 400 kV Tor 1	5020	200	163	118,5	187	0	855
D 400 kV Tor 2	4688	197	160	117,5	183	0	761

Zestawienie dopuszczalnych obciążeń przewodów wszystkich analizowanych torów linii 220 i 400 kV oraz średnie roczne, średnie dobowe i maksymalne obciążenia analizowanych linii wraz z ich procentowym udziałem w stosunku do obciążeń dopuszczalnych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie obciążeń (średnich rocznych, średnich dobowych oraz maksymalnych) analizowanych linii napowietrznych 220 i 400 kV jakie wystąpiły w rocznych okresach badań, uzupełnione wartościami obciążeń dopuszczalnych

Linia	Średnie roczne obciążenie przewodów linii (I_r)	Średnie dobowe obciążenie przewodów linii dla doby, w której zanotowano maksymalne obciążenie przewodów linii (I_{db})	Maksymalne obciążenie linii w analizowanym okresie (I_{max})	Dopuszczalne obciążenie przewodów linii, wynikające z nastaw systemu zabezpieczeń linii (I_d)
A 220 kV	495 (59,6%)	627 (75,5%)	825 (99,4%)	830
B 220 kV Tor 1	413 (31,7%)	596 (45,8%)	837 (64,4%)	1300
B 220 kV Tor 2	104 (10,5%)	180 (18,2%)	392 (39,6%)	990
C 400 kV	488 (29,3%)	875 (52,7%)	1152 (69,4%)	1660
D 400 kV Tor 1	200 (10,2%)	336 (17,1%)	855 (43,6%)	1960
D 400 kV Tor 2	197 (10,0%)	0	761 (38,8%)	1960

Obliczenia natężenia pola magnetycznego w otoczeniu analizowanych linii

Na podstawie danych dotyczących zmienności w ciągu jednego roku obciążeń analizowanych linii napowietrznych o napięciu 220 i 400 kV i po obliczeniu ich średnich (przeciętnych) obciążeń, wyznaczono uśrednione wartości natężenia pola magnetycznego w następujących miejscach pod liniami (na wysokości 2,0 m npt.):

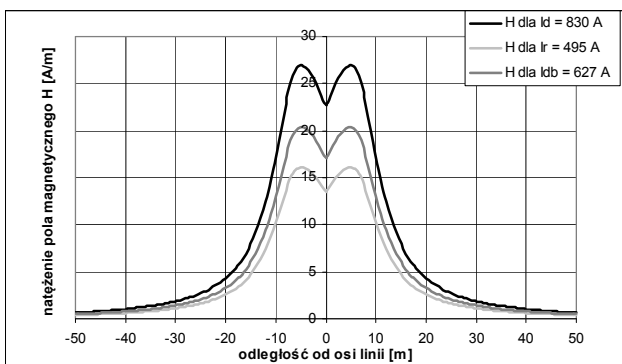
- pod osią linii,
- w miejscu, gdzie natężenie pola magnetycznego osiąga wartość maksymalną,
- na granicy „pasa technologicznego” linii,
- w odległości 50 m od osi linii,
- w odległości 100 m od osi linii.

W celu obliczenia średnich wartości natężenia pola magnetycznego występującego w otoczeniu rozpatrywanych linii napowietrznych o napięciu 220 i 400 kV wykonano symulacje komputerowe rozkładów pola magnetycznego dla dwóch przypadków:

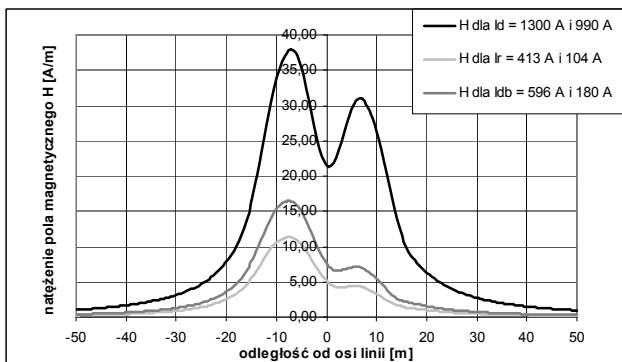
- dla minimalnej odległości przewodów fazowych od ziemi h_{\min} (dla linii o napięciu 220 kV $h_{\min} = 6,7$ m, dla linii 400 kV $h_{\min} = 10$ m) oraz dla średnich rocznych obciążeń linii dla przęseł zbudowanych z pary słupów przelotowych,
- dla minimalnej odległości przewodów fazowych od ziemi h_{\min} (dla linii o napięciu 220 kV $h_{\min} = 6,7$ m, dla linii 400 kV $h_{\min} = 10$ m) oraz dla średnich dobowych obciążeń linii dla przęseł zbudowanych z pary słupów przelotowych dla doby, w której zanotowano maksymalne obciążenie linii.

Obliczenia i rozkłady pola magnetycznego wykonano przy użyciu programu komputerowego PolE-M opracowanego w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, wykorzystującego metodę odbicia lustrianego oraz superpozycji.

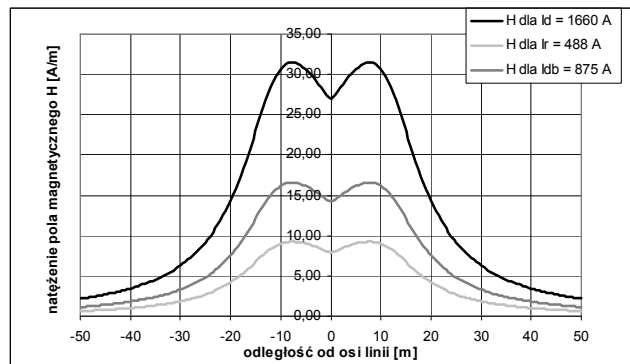
Zestawienie obliczonych średnich wartości natężenia pola magnetycznego, które występują w otoczeniu analizowanych linii napowietrznych o napięciu 220 i 400 kV przedstawiono w tabeli 4, natomiast odpowiednie rozkłady natężenia pola magnetycznego – na rysunkach 7-10



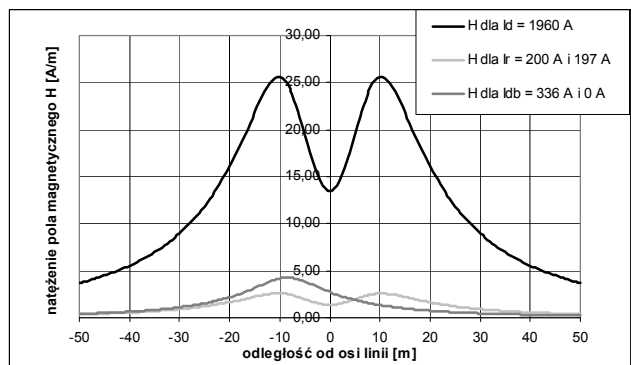
Rys.7. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w przekroju jednotorowej linii 220 kV dla przęsła zbudowanego z pary słupów przelotowych, w którym odległość od ziemi przewodów fazowych wynosi $h_{\min} = 6,7$ m. Do obliczeń przyjęto różne obciążenia przewodów linii.



Rys.8. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w przekroju dwutorowej linii 220 kV dla przęsła zbudowanego z pary słupów przelotowych, w którym odległość od ziemi przewodów fazowych wynosi $h_{\min} = 6,7$ m. Do obliczeń przyjęto różne obciążenia przewodów linii.



Rys.9. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w przekroju jednotorowej linii 400 kV dla przęsła zbudowanego z pary słupów przelotowych, w którym odległość od ziemi przewodów fazowych wynosi $h_{\min} = 10$ m. Do obliczeń przyjęto różne obciążenia przewodów linii



Rys.10. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w przekroju dwutorowej linii 400 kV dla przęsła zbudowanego z pary słupów przelotowych, w którym odległość od ziemi przewodów fazowych wynosi $h_{\min} = 10$ m. Do obliczeń przyjęto różne obciążenia przewodów linii.

Podsumowanie

1. Przeprowadzone analizy wskazują, że wszystkie rozpatrywane linie napowietrzne były w ciągu 12 miesięcznych okresów badań obciążone prądami znacznie mniejszymi od wartości wynikających z dopuszczalnych obciążalności ich przewodów roboczych. Maksymalne obciążenie analizowanych linii występowało bardzo rzadko (zazwyczaj tylko przez godzinę w roku) i dla 3 linii było znacząco mniejsze (od 39% do 70%) od dopuszczalnej obciążalności przewodów. Tylko w przypadku jednotorowej linii o napięciu 220 kV jej maksymalne obciążenie, które wystąpiło raz w ciągu roku było zbliżone do dopuszczalnego obciążenia przewodów (99,4%).
2. Średnie roczne obciążenia poszczególnych torów analizowanych linii 220 i 400 kV stanowią od 10% (3 torów analizowanych linii) do prawie 60% (linia jednotorowa 220 kV) dopuszczalnego obciążenia przewodów. Średnie dobowe obciążenia wyznaczone dla dnia, w którym wystąpiły maksymalne obciążenia, stanowią od 17% do 75% dopuszczalnego obciążenia przewodów.
3. Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego pod każdą z analizowanych linii 220 i 400 kV, obliczona przy założeniu uśrednionego (rocznego, dobowego) obciążenia, jest znacząco mniejsza niż obliczona przy przyjęciu obciążenia linii, wynikającego z dopuszczalnej obciążalności jej przewodów roboczych.
4. Przeprowadzone oszacowania pozwoliły na ustalenie uśrednionych poziomów natężenia pola magnetycznego w charakterystycznych miejscach w otoczeniu wybranych linii napowietrznych 220 i 400 kV, uwzględniających czasową,

przede wszystkim całoroczną, zmienność obciążeń linii. Umożliwiło to precyzyjną ocenę ekspozycji osób zamieszkujących w bezpośrednim sąsiedztwie linii napowietrznych, która może stać się bardzo przydatna w

przewodzeniu badań epidemiologicznych, w opisie których najczęściej [3] brak jest dokładnej charakterystyki warunków polowych eksperymentu.

Tabela 4. Zestawienie obliczonych wartości natężenia pola magnetycznego (H), jakie wystąpią pod analizowanymi liniami o napięciu 220 i 400 kV w przypadku przyjęcia do obliczeń różnych (uśrednionych, maksymalnych) obciążeń linii.

Rodzaj linii	Rodzaj obciążenia linii	Odległości od osi linii (m)							
		-100	-50	-25	odl. przy której H_{max}	0	25	50	100
		Wartości natężenia pola magnetycznego (H) obliczone na podstawie różnych obciążeń linii (A/m)							
A jednotorowa 220 kV	dopuszczalne ($I_d = 830$ A)	0,16	0,65	2,71	26,93	22,64	2,71	0,65	0,16
	średnie roczne ($I_r = 495$ A)	0,09	0,39	1,61	16,06	13,51	1,61	0,39	0,09
	średnie dobowe ($I_{db} = 627$ A)	0,12	0,49	2,04	20,35	17,11	2,04	0,49	0,12
B dwutorowa 220 kV	dopuszczalne (Tor 1: $I_d = 1300$ A, Tor 2: $I_d = 990$ A)	0,25	1,04	4,69	37,97	21,47	3,98	0,95	0,24
	średnie roczne (Tor 1: $I_r = 413$ A, Tor 2: $I_r = 104$ A)	0,06	0,27	1,39	11,34	5,13	0,66	0,18	0,05
	średnie dobowe (Tor 1: $I_{db} = 596$ A, Tor 2: $I_{db} = 180$ A)	0,09	0,39	2,01	16,46	7,60	1,04	0,28	0,07
C jednotorowa 400 kV	dopuszczalne ($I_d = 1660$ A)	0,53	2,17	9,18	31,46	27,03	9,18	2,17	0,53
	średnie roczne ($I_r = 488$ A)	0,16	0,64	2,70	9,25	7,95	2,70	0,64	0,16
	średnie dobowe ($I_{db} = 875$ A)	0,28	1,14	4,84	16,58	14,25	4,84	1,14	0,28
D dwutorowa 400 kV	dopuszczalne (Tor 1: $I_d = 1960$ A, Tor 2: $I_d = 1960$ A)	0,98	3,71	11,87	25,57	13,43	11,87	3,71	0,98
	średnie roczne (Tor 1: $I_r = 200$ A, Tor 2: $I_r = 197$ A)	0,10	0,38	1,21	2,61	1,36	1,20	0,37	0,10
	średnie dobowe (Tor 1: $I_{db} = 336$ A, Tor 2: $I_{db} = 0$ A)	0,10	0,41	1,52	4,25	2,74	0,59	0,23	0,07

LITERATURA

- [1] A Rationale for a Biologically-based Public Exposure Standard for Electromagnetic Fields (ELF and RF). Report prepared for the BioInitiative Working Group. August, 2007.
- [2] Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). *Official Journal L199*, 30/07/1999, 59-70. 1999/519/EC.
- [3] Draper G., Vincent T., Kroll M.E., Swanson J.: Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study, *BMJ*, Jun 2005, Vol. 330, 1290.
- [4] EMF Exposure Standards Applicable in Europe and Elsewhere. Environment & Society Group. *Eurelectric*, March 2006, Ref: 2006-450-0006
- [5] Jaworski Marek: Rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych *INPE (Bełchatów)*. 2010, R. 16, nr 124, 77-89
- [6] Jaworski Marek, Wróblewski Zbigniew: Rozkłady pola magnetycznego w otoczeniu wielotorowych elektroenergetycznych linii napowietrznych oraz kablowych. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 11, 2008, 330-333
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. Dz. U. nr 192 poz. 1883
- [8] Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs (SAGE). Precautionary approaches to ELF EMFs. First Interim Assessment: Power Lines and Property, Wiring in Homes, and Electrical Equipment in Homes. RK Partnership Ltd. 27.04.2007.

Autorzy: dr inż. Marek Jaworski dr inż. Marek Szuba, Politechnika Wrocławska, Katedra Energoelektryki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: marek.jaworski@pwr.edu.pl, marek.szuba@pwr.edu.pl