

RAPORT O ODDZIAŁYWANIU NA ŚRODOWISKO
PRZEDSIĘWZIĘCIA PN.:
INFRASTRUKTURA PRZYŁĄCZENIOWA
MORSKICH FARM WIATROWYCH
MFW BAŁTYK II I MFW BAŁTYK III

ZAŁĄCZNIK 5 – OBLICZENIA EMISJI PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Autor opracowania: dr inż. Marek Szuba – Biuro konsultingowo-inżynierskie
EKO-MARK

Wrzesień, 2022

Spis treści

1. ROZWIĄZANIA TECHNICZNE I IMPLIKACJE ŚRODOWISKOWE WYPROWADZENIA MOCY Z MORSKICH FARM WIATROWYCH BAŁTYK II I III DO STACJI ELEKTROENERGETYCZNEJ NALEŻĄCEJ DO PSE S.A. – UWAGI OGÓLNE	3
2. POLE ELEKTROMAGNETYCZNE TOWARZYSZĄCE PRACY PRZESYŁOWYCH UKŁADÓW NAPOWIETRZNYCH I KABLOWYCH	4
2.1. ODDZIAŁYWANIE NA ŚRODOWISKO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO.....	4
2.2. WYZNACZANIE ROZKŁADU NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO METODAMI ANALITYCZNYMI - PODSTAWY TEORETYCZNE METOD OBLICZENIOWYCH	6
2.3. PRZESYŁ MOCY TORAMI ZASILAJĄCYMI PRĄDU PRZEMIENNEGO (AC).....	7
2.4. OBLICZENIA ROZKŁADU NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO W SĄSIEDZTWIE LINII NAPOWIETRZNEJ.....	8
2.4.1. Dane do obliczeń	8
2.4.2. Wyniki obliczeń rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu dwutorowej linii napowietrznej.....	11
2.5. OBLICZENIA ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO W OTOCZENIU PROJEKTOWANYCH TORÓW KABLOWYCH.....	15
2.5.1. Dane do obliczeń	15
2.5.2. Wyniki obliczeń rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu projektowanych torów kablowych	17
2.5.3. Komentarz do wyników obliczeń.....	24
LITERATURA.....	25

1. ROZWIĄZANIA TECHNICZNE I IMPLIKACJE ŚRODOWISKOWE WYPROWADZENIA MOCY Z MORSKICH FARM WIATROWYCH BAŁTYK II I III DO STACJI ELEKTROENERGETYCZNEJ NALEŻĄCEJ DO PSE S.A. – UWAGI OGÓLNE

Przedmiotem niniejszego opracowania jest identyfikacja poszczególnych składowych pola elektromagnetycznego związanego z realizacją połączenia lądowego pomiędzy wyjściem kablowym (z morza) zlokalizowanym w strefie przybrzeżnej, do której docierać będzie energia wytworzona w Morskich Farmach Wiatrowych Bałtyk II i Bałtyk III, a stacją końcową stanowiącą element Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) Słupsk Wierzbicino, której właścicielem jest krajowy operator systemu przesyłowego, tj. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

Możliwe implikacje środowiskowe, a w szczególności ich zasięg są zależne od technologii przesyłu prądu elektrycznego pomiędzy wyjściem kablowym a stacją końcową, które w zarysie zaprezentowano w dalszej części opracowania.

Zgodnie z koncepcją projektową przesył energii elektrycznej pomiędzy dwoma stacjami elektroenergetycznymi (LSE), a stacją elektroenergetyczną należącą do PSE S.A., zakłada wybudowanie:

- czterech ciągów zasilających (torów kablowych) o długości ok. 8 km każdy, łączących MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III z projektowanymi lądowymi stacjami elektroenergetycznymi, składających się z podziemnych torów kablowych, z których każdy wykonany zostanie z 3 jednożyłowych kabli elektroenergetycznych zasilanych prądem przemiennym (AC) o napięciu znamionowym 220 kV,
oraz
- dwóch ciągów zasilających (torów kablowych) o długości ok. 6 km każdy, łączących projektowane lądowe stacje elektroenergetyczne (LSE) ze stacją elektroenergetyczną PSE S.A. wchodzącą w skład krajowego systemu elektroenergetycznego, składających się z podziemnych torów kablowych, z których każdy wykonany zostanie z 3 jednożyłowych kabli elektroenergetycznych zasilanych prądem przemiennym (AC) o napięciu znamionowym 400 kV (wariant 1),
alternatywnie

- jednej dwutorowej linii napowietrznej wysokiego napięcia (400 kV), łączącej projektowane lądowe stacje elektroenergetyczne (LSE) ze stacją elektroenergetyczną PSE S.A. wchodzącą w skład krajowego systemu elektroenergetycznego (wariant 2).

2. POLE ELEKTROMAGNETYCZNE TOWARZYSZĄCE PRACY PRZESYŁOWYCH UKŁADÓW NAPOWIETRZNYCH I KABLOWYCH

2.1. Oddziaływanie na środowisko pola elektromagnetycznego

Dowolny przewód z prądem, zarówno przewód linii napowietrznej, jak i kabel elektroenergetyczny, jest źródłem pola elektromagnetycznego, które w pewnych sytuacjach, przy znacznych wartościach natężeń poszczególnych składowych pola, może w sposób niekorzystny oddziaływać na środowisko i zdrowie ludzi.

Elementy torów prądowych większości urządzeń elektroenergetycznych wytwarzają pole elektromagnetyczne, które z uwagi na niską częstotliwość (50 Hz - tzw. pole quasi stacjonarne) można identyfikować na podstawie oddzielnie mierzonych dwóch jego składowych: elektrycznej (E – natężenie pola elektrycznego) i magnetycznej (H – natężenie pola magnetycznego).

Pola elektryczne o znacznych wartościach natężeń generowane są głównie przez elementy układów wysokonapięciowych, natomiast składowa magnetyczna osiąga relatywnie duże wartości w sąsiedztwie torów wieloprądowych.

Kable elektroenergetyczne wysokiego napięcia (220 i 400 kV) ze względu na obecność powłok ekranujących żyłę roboczą kabla, nie są źródłem pola elektrycznego, gdyż jego składowa normalna (promieniowa) zanika całkowicie na skutek obecności półprzewodzącego ekranu otaczającego żyłę roboczą, miedzianą lub aluminiową oraz przewodzącego ekranu otaczającego powłokę elektroizolacyjną. W konsekwencji szacowanie poziomów składowej elektrycznej na zewnątrz kabla nie ma jakiegokolwiek uzasadnienia.

Płynący przez żyłę roboczą kabla prąd elektryczny jest natomiast źródłem pola magnetycznego o stosunkowo dużych wartościach. Na wartość tego pola, wyznaczanego zazwyczaj nad linią kablową do wysokości 2,0 m n.p.t. (zgodnie z wymaganiami rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 17 lutego 2020 r. w sprawie sposobów

sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku [2]), decydujący wpływ ma głębokość ułożenia linii kablowej pod ziemią oraz odległości między poszczególnymi żyłami (fazami) tworzącymi wspólny obwód elektryczny (ciąg kablowy).

Doniesienia o niekorzystnym wpływie na organizmy żywe składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego pojawiają się w literaturze naukowej od dość dawna i pomimo, że mechanizm oddziaływania pól elektromagnetycznych na struktury biologiczne nie jest dokładnie poznany, to w wielu krajach, również w Polsce, wprowadzono przepisy ograniczające ekspozycję na tego rodzaju pola.

Aktem prawnym dotyczącym ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych w ekspozycji środowiskowej jest rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w *sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku* [1].

Zgodnie z zapisami zawartymi w tym rozporządzeniu (załącznik do wspomnianego rozporządzenia), dopuszczalny w środowisku poziom pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz nie powinien przekraczać w miejscach dostępnych dla ludności, następujących wartości granicznych:

- natężenia pola elektrycznego (E) - 10 kV/m,
- natężenia pola magnetycznego (H) - **60 A/m**.

Uznaje się zatem, podobnie jak stanowią to ustalenia przepisów obowiązujących w innych krajach, że pola o podanych wyżej poziomach (a także o poziomach niższych) nie oddziałują niekorzystnie na żaden z elementów środowiska (rośliny, zwierzęta, wodę i powietrze) w tym na ludzi, nie wykazując przy tym żadnego działania kumulacyjnego i synergicznego.

Przywoływany akt prawny zawiera jednak dwa istotne ograniczenia dotyczące wyżej wymienionych wartości dopuszczalnych. Jedno z nich odnosi się bezpośrednio do pola elektrycznego (składowej elektrycznej E pola elektromagnetycznego) o częstotliwości 50 Hz. Stanowi ono, że na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową składowa elektryczna (E) pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz nie może przekraczać wartości 1 kV/m. Ograniczenie to, istotne w przypadku linii napowietrznych wysokiego napięcia, nie ma żadnego znaczenia w przypadku linii kablowych, w tym linii kablowych wysokiego napięcia, gdyż, jak już wspomniano, ka-

ble elektroenergetyczne wyposażone w powłoki ekranujące nie są źródłem pola elektrycznego przenikającego do środowiska (do gruntu i powietrza).

2.2. Wyznaczanie rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego metodami analitycznymi - Podstawy teoretyczne metod obliczeniowych

W przypadku projektowanych linii napowietrznych czy kablowych rozkład natężenia pola elektrycznego¹ i magnetycznego, w tym maksymalną wartość każdej ze składowych pola, wyznacza się metodami obliczeniowymi. W ten sam sposób określa się szerokość obszaru w otoczeniu linii napowietrznej, w którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć wartość dopuszczalną dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową² (1 kV/m).

Istnieje wiele programów komputerowych służących do odrębnego obliczania rozkładu każdej ze składowych pola elektromagnetycznego: elektrycznej (E) i magnetycznej (H). Wykorzystują one najczęściej tzw. metodę odbicia lustrzanego oraz superpozycji, chociaż znane są także algorytmy obliczeniowe oparte na tzw. metodzie elementów skończonych (FEM).

Zgodnie z zasadą superpozycji, pole elektryczne (lub magnetyczne) w dowolnym punkcie przestrzeni otaczającej przewody linii napowietrznej lub tor kablowy, jest sumą pól pochodzących od wszystkich przewodów linii lub kabli.

W przypadku linii napowietrznych, chcąc wyznaczyć pole elektryczne wytworzone przez ciała naładowane, które znajdują się w środowisku niejednorodnym, np. w pobliżu ziemi, stosuje się metodę odbicia lustrzanego. W metodzie tej środowisko niejednorodne o różnych przenikalnościach elektrycznych, w których umieszczone są ciała naładowane, można zastąpić środowiskiem jednorodnym, wprowadzając odpowiednie ładunki fikcyjne. Przy wprowadzaniu ładunków fikcyjnych musi być spełniony warunek równości składowych stycznych wektora natężenia pola elektrycznego i składowych normalnych wektora indukcji elektrycznej na granicy dwóch środowisk.

W większości programów komputerowych opartych na metodzie superpozycji i odbicia lustrzanego korzysta się również z założenia upraszczającego, zgodnie z

¹ W przypadku linii kablowych trudno jest mówić o wyznaczaniu rozkładu natężenia pola elektrycznego na zewnątrz powłoki kablowej. Pole to identyfikowane poza zewnętrzną powłoką kabla jest pomijalnie małe ze względu na ekranujące właściwości osłon ekranujących kabla.

² A także terenów (działek), na których już znajdują się budynki mieszkalne.

którym każdy przewód linii rozpięty pomiędzy słupami lub każdą linię kablową modeluje się prostoliniowym, nieskończenie długim przewodem, o średnicy charakterystycznej dla określonego typu przewodu rzeczywistego lub kabla.

Algorytmy obliczeniowe służące do analizy rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego wytwarzanego przez linie napowietrzne i kablowe³ są bardzo złożone i prezentowanie ich w ramach niniejszego opracowania jego autorzy uznali za niecelowe.

Należy podkreślić, że do obliczeń rozkładu E lub H, które najczęściej prowadzi się w przekroju prostopadłym do osi linii lub toru kablowego (tylko składowa magnetyczna), przyjmuje się zawsze projektowane, najmniejsze odległości przewodów lub kabli od punktu obliczeniowego. Oznacza to, że w przypadku linii napowietrznych obliczenia rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego (w tym wartości maksymalnych poszczególnych składowych) przeprowadza się dla najmniejszej odległości od ziemi przewodów fazowych. W przypadku torów kablowych obliczenia rozkładu pola magnetycznego nad linią kablową (w tym wartości maksymalnej tej składowej) przeprowadza się dla najmniejszej⁴, projektowanej głębokości pograżenia kabla.

2.3. Przesył mocy torami zasilającymi prądu przemiennego (AC)

Biorąc pod uwagę, że przewidywane do realizacji tory kablowe lub napowietrzne powinny zapewnić docelowo przesył mocy o wartości 1500-2000 MW, to maksymalne obciążenie każdego z torów oszacować można na ok. 1000 A przy pracy 4 torów na napięciu 220 kV i ok. 1300 A przy pracy 2 torów na napięciu 400 kV.

Chociaż ustalenie ilości torów kablowych prądu przemiennego czy ilości linii napowietrznych zapewniających przesłanie założonej mocy powinno zostać poprzedzone stosownymi analizami niezawodnościowymi, to – jak już wspomniano - na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto, że wybudowane zostaną 4 (na napięciu 220 kV) lub 2 (na napięciu 400 kV) kablowe ciągi zasilające (tory kablowe), w których wykorzystane zostaną jednożyłowe kable przyłączone do faz: L1, L2 i L3 lub – wariantowo – jedna dwutorowa linia napowietrzna 400 kV. Każde z zastosowanych rozwią-

³ Algorytmy obliczeniowe dla linii kablowych służą do wyznaczania jedynie składowej magnetycznej pola.

⁴ Należy pamiętać, że na całej długości linii kablowej głębokość pograżenia kabli w gruncie może być różna, a obliczenia rozkładu natężenia pola magnetycznego wykonuje się dla najmniejszej z tych odległości.

zań spowoduje powstanie nieco innych implikacji środowiskowych, co scharakteryzowane zostanie w dalszej części opracowania.

Z technicznego punktu widzenia zastosowanie do przesyłu energii elektrycznej kilku torów kablowych powoduje, że w zależności od ich ilości, konieczne będzie zastosowanie kabli o różnych przekrojach żyły, przy czym mogą to być zarówno kable z żyłą aluminiową, jak i miedzianą. Ze względu na różną rezystywność właściwą wspomnianych materiałów, inne będą przekroje planowanych do zastosowania kabli, a także ich dopuszczalna obciążalność prądowa. Przy założonych w projekcie koncepcyjnym maksymalnych obciążalnościach poszczególnych torów kablowych, tj. 1000 A dla torów pracujących na napięciu 220 kV i 1250 A dla torów pracujących na napięciu 400 kV, wybór konkretnego typu kabla (z żyłą aluminiową lub miedzianą) ma pomijalny wpływ na rozkład pola magnetycznego w otoczeniu torów kablowych. Należy jednak pamiętać, że dobór przekroju żyły kabla, determinujący możliwość jego długotrwałego obciążenia, może mieć istotne znaczenie dla implikacji przyrodniczych, szczególnie dla flory i fauny znajdującej się w bezpośrednim sąsiedztwie każdego z kabli.

W przypadku przyjęcia alternatywnego rozwiązania przesyłu energii elektrycznej do stacji PSE S.A., tj. wykorzystania 2. torowej linii napowietrznej 400 kV, przyjęcie wspomnianych wyżej obciążalności prądowych każdego z torów determinuje konieczność zastosowania przewodów stalowo-aluminiowych typu 468/24-A1F/UHST-261mm², w postaci wiązki trójprzewodowej w każdej fazie.

2.4. Obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w sąsiedztwie linii napowietrznej

2.4.1. Dane do obliczeń

Analiza zależności teoretycznych determinujących algorytm obliczeniowy wskazuje, że na wartość maksymalną oraz rozkład natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H) w otoczeniu linii napowietrznej wpływają głównie następujące jej parametry:

- napięcie fazowe poszczególnych torów linii (wpływa wyłącznie na rozkład natężenia pola elektrycznego) – 400 kV

- prąd obciążenia linii (wpływa wyłącznie na rozkład natężenia pola magnetycznego) – I_{\max} (dla każdego toru) = 1250 A,
- odległość od ziemi przewodów fazowych – $h_{\min} = 10$ m,
- odstępy między przewodami fazowymi (zgodnie z konfiguracją przewodów na słupie),
- układ przewodów fazowych (konfiguracja faz) w liniach wielotorowych (dwutorowych).

Inne elementy konstrukcyjne linii mają mniejszy wpływ na rozkład natężenia pola elektrycznego. Ponadto, na rozkład natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii wpływają elementy otoczenia położone w jej bezpośrednim sąsiedztwie - takie jak drzewa (las), zabudowania itp., a określenie wpływu tych elementów na rozkład pola jest na ogół możliwe jedynie na podstawie pomiarów.

W zależności od układu faz w poszczególnych torach linii napowietrznej zmiana ulega zarówno rozkład pola elektrycznego, jak i magnetycznego. Do obliczeń rozkładów obu składowych pola przyjęto zatem zaproponowany w dokumentacji technicznej układ faz w poszczególnych torach (układ jednoimienny).

Przy określonej konstrukcji linii (seria i typ słupów) oraz założonej konfiguracji faz, a także przy ustalonej wartości napięcia fazowego, natężenie pola elektrycznego w jej otoczeniu zależy przede wszystkim od odległości przewodów fazowych od ziemi. Natężenie pola rośnie wraz ze zmniejszaniem się tej odległości, a największą wartość uzyskuje w przekroju linii, w którym odległość przewodów fazowych od ziemi jest najmniejsza - zazwyczaj w środku przęsła.

Obliczenia rozkładu pola elektrycznego (podobnie jak pola magnetycznego) zostały przeprowadzone dla 3 reprezentatywnych przęseł dwutorowej⁵ linii napowietrznej przewidywanej do wykonania na typowych słupach kratowych serii E33, przy czym przykładową zwymiarowaną sylwetkę wraz z układem torów i faz prezentuje rysunek 1. Analizowane przęsła, to odcinki linii złożone z następujących par słupów:

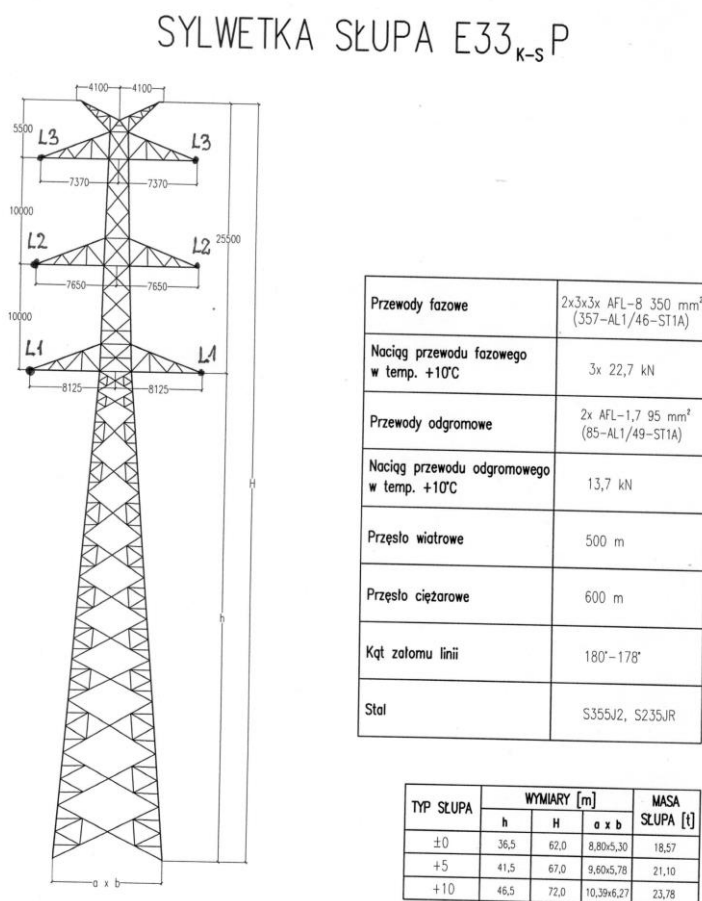
- E33P – E33P (P – słup przelotowy),
- E33P – E33M3 (M3 – słup mocny),
- E33P – E33M6 (M6 słup mocny).

Przęsła te są o tyle reprezentatywne, że ilustrują przypadki (miejsca w otoczeniu linii), w którym natężenie pola elektrycznego (i magnetycznego) może osiągnąć

⁵ Każdy z torów linii przyłączony jest do odpowiedniej stacji elektroenergetycznej (LSE).

wartości maksymalne w otoczeniu całej linii. W rezultacie natężenia obu składowych pola w dowolnym innym przęśle linii nie będą z pewnością większe od wyznaczonych w przęśłach reprezentatywnych.

Należy w tym miejscu stwierdzić, że zadaniem autorów opracowania jest sprawdzenie, czy przy założeniach technicznych przyjętych w dokumentacji, mogą zostać przekroczone standardy jakości środowiska, także przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (najmniejsza projektowana odległość przewodów fazowych od ziemi i maksymalne napięcie fazowe oraz obciążenie linii). W takiej sytuacji przeprowadzanie szczegółowych obliczeń rozkładu obu składowych pola we wszystkich przęśłach linii, nie jest ani celowe, ani tym bardziej konieczne, jeśli wykazano, że w przęśle, w którym odległość ta jest najmniejsza (zgodnie z założeniami projektowymi: $h_{\min} = 10$ m) poziomy dopuszczalne poszczególnych składowych pola (standardy jakości środowiska) nie zostaną przekroczone.



Rys. 1. Zwymiarowana sylwetka kratowego słupa linii dwutorowej 400 kV, która stanowić ma alternatywny w stosunku do ciągów kablowych, sposób przesyłu energii elektrycznej ze stacji elektroenergetycznych (LSE) do stacji elektroenergetycznej PSE S.A.

Jak już wspomniano, z względu na fakt, że maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego E_{\max} i magnetycznego H_{\max} pod linią należy spodziewać się w sytuacji, w której odległość od ziemi najniższej zawieszonego przewodu jest najmniejsza ($h = h_{\min}$), obliczenia przeprowadzono dla najmniejszej⁶ projektowanej odległości przewodów fazy-ziemia wynoszącej $h_{\min} = 10$ m. Wyniki obliczeń rozkładów natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H), które przeprowadzono dla scharakteryzowanych wyżej przekrojów prostopadłych do osi linii, zaprezentowano na rysunkach 2 – 7.

2.4.2. Wyniki obliczeń rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu dwutorowej linii napowietrznej

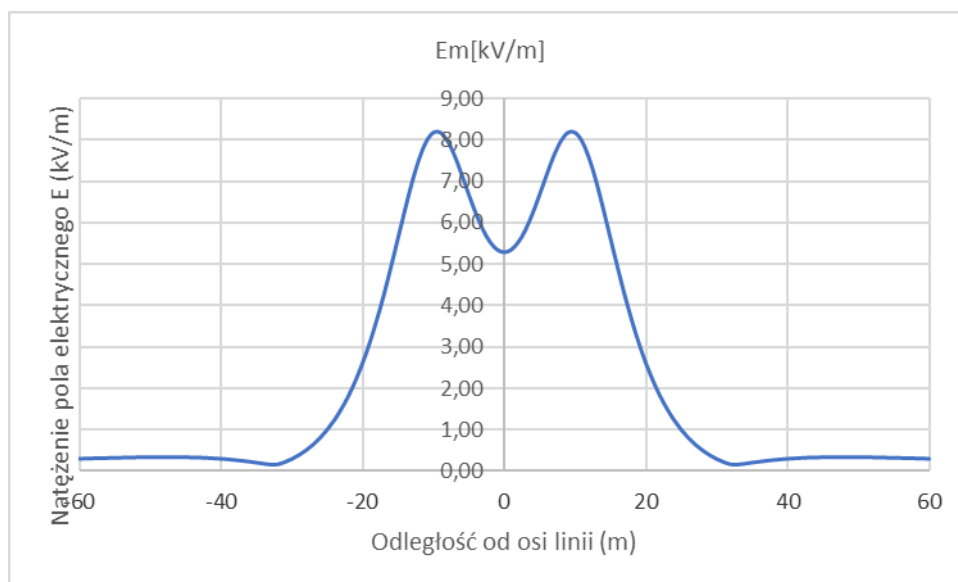
Wyniki obliczeń spodziewanych maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H) wyznaczonych na wysokości 2,0 m n.p.t., przy przyjęciu najbardziej niekorzystnych ze środowiskowego punktu widzenia warunków pracy linii, tj. napięcie znamionowe $U = 400$ kV i przy dopuszczalnej obciążalności każdego toru prądem $I_{\max} = 1250$ A zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki obliczeń spodziewanych maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H) oraz szerokości obszaru, w którym zabudowa mieszkaniowa jest niedopuszczalna ($E > 1$ kV/m) w otoczeniu dwutorowej linii napowietrznej 400 kV, przy obciążeniu każdego toru prądem $I_{\max} = 1250$ A. Obliczenia wykonano na wysokości 2,0 m n.p.t.

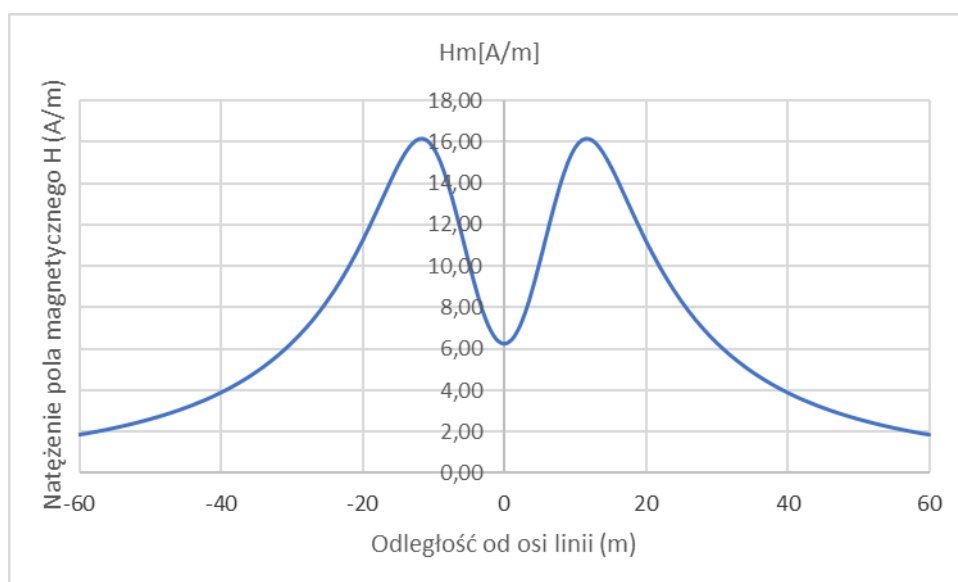
Rodzaj przęsła	Maksymalna spodziewana wartość natężenia pola elektrycznego E (kV/m)	Maksymalna spodziewana wartość natężenia pola magnetycznego H (A/m)	Szerokość obszaru pod linią, w którym realizacja zabudowy mieszkaniowej jest niedopuszczalna - teren, na którym $E > 1$ kV/m)
P – P	8,2	16,1	-25 m ÷ +25 m
P – M3	8,5	16,5	-24 m ÷ +24 m
P – M6	8,2	16,1	-25 m ÷ +25 m

⁶ Najmniejsza odległość przewodów od ziemi, jaka wystąpi w określonym przęśle linii zależy od wielu czynników, z których najistotniejsze to: wysokość słupów, rozpiętość przęsła, naprężenie przewodów, ukształtowanie terenu oraz obecność obiektów pod linią (skrzyżowania i zbliżenia).

Wyniki obliczeń rozkładów spodziewanych wartości maksymalnych obu składowych pola w otoczeniu dwutorowej linii 400 kV stanowiącej alternatywne rozwiązanie połączenia stacji elektroenergetycznych (LSE) ze stacją PSE S.A. stanowiącą element Krajowego Systemu Elektroenergetycznego zaprezentowano na rysunkach 2 – 7.

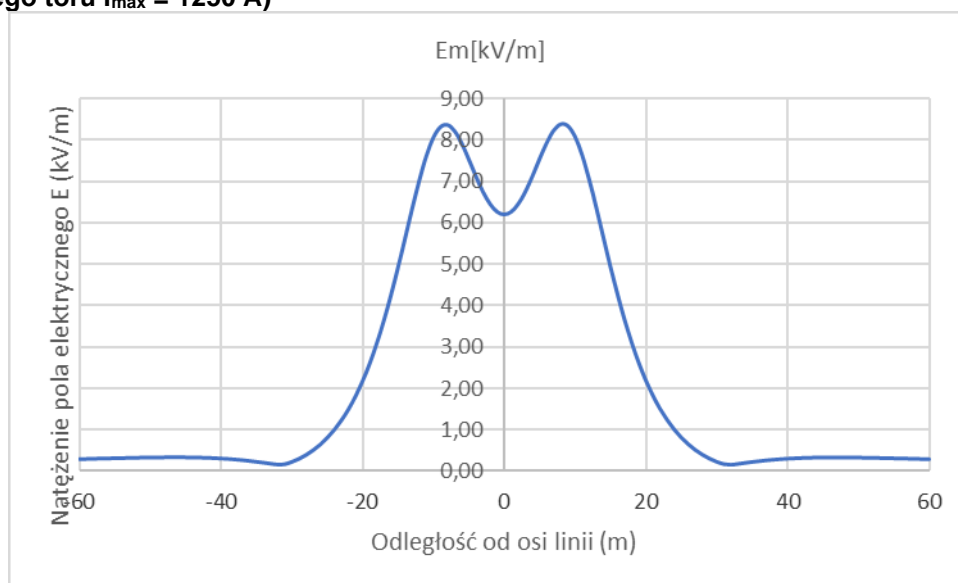


Rys.2. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego E w przęśle złożonym ze słupów serii E33 typu P – P (słupy przelotowe), w otoczeniu projektowanej linii – wyprowadzenie mocy z LSE (wariant alternatywny). Obliczenia przeprowadzono w przekroju, w którym odległość od ziemi najniższych zawieszonych przewodów wynosi $h_{\min} = 10,0$ m, przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maksymalny zwis przewodów, $U_{rdop} = 420$ kV)

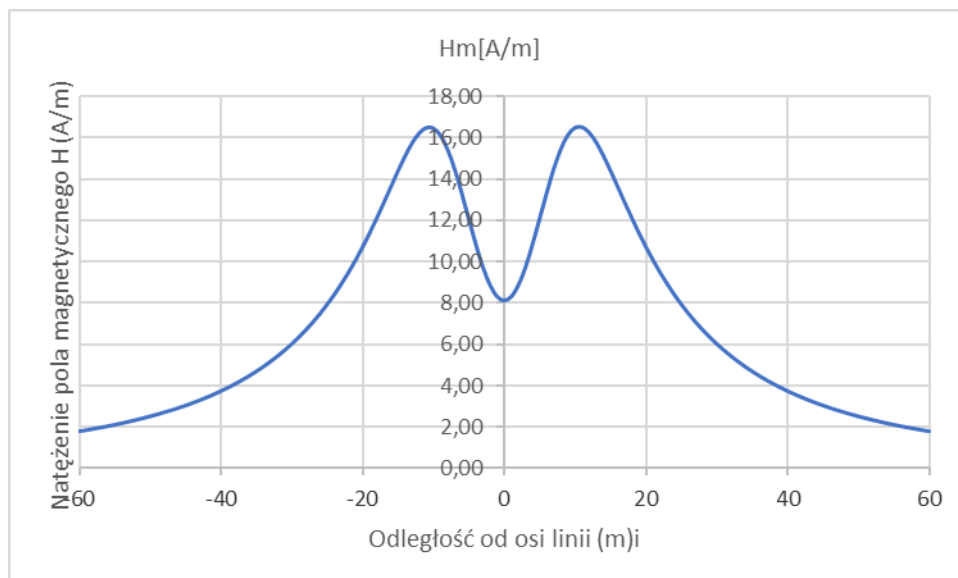


Rys.3. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola magnetycznego H w przęśle złożonym ze słupów serii E33 typu P – P (słupy przelotowe), w otoczeniu projektowanej linii – wyprowadzenie mocy z LSE (wariant alternatywny). Obliczenia przeprowadzono w przekroju, w którym odległość od ziemi najniższych zawieszonych przewodów wynosi $h_{\min} = 10,0$ m, przy najbardziej nieko-

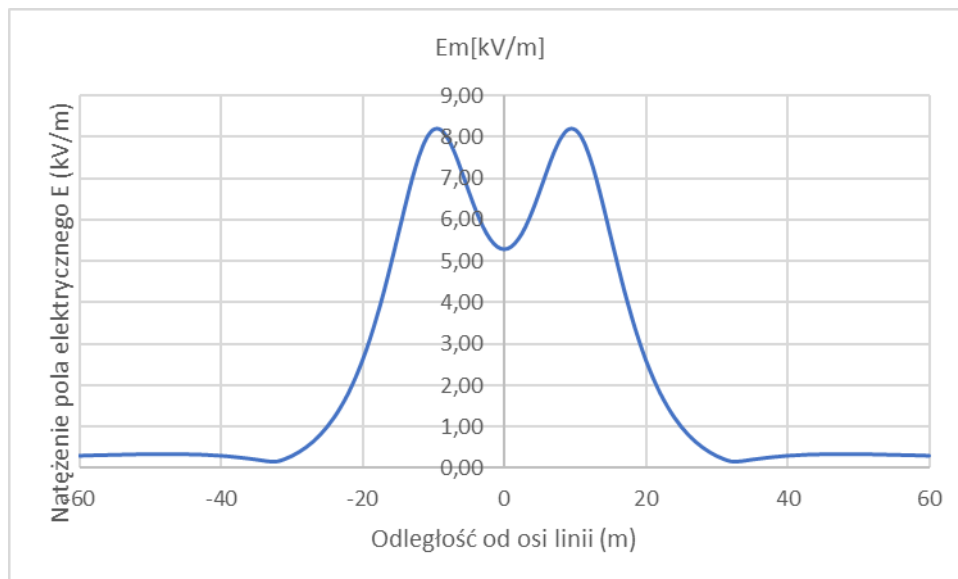
rzystnych warunkach pracy linii (maksymalny zwis przewodów, $U_{rdop} = 420$ kV i max. Obciążenie każdego toru $I_{max} = 1250$ A)



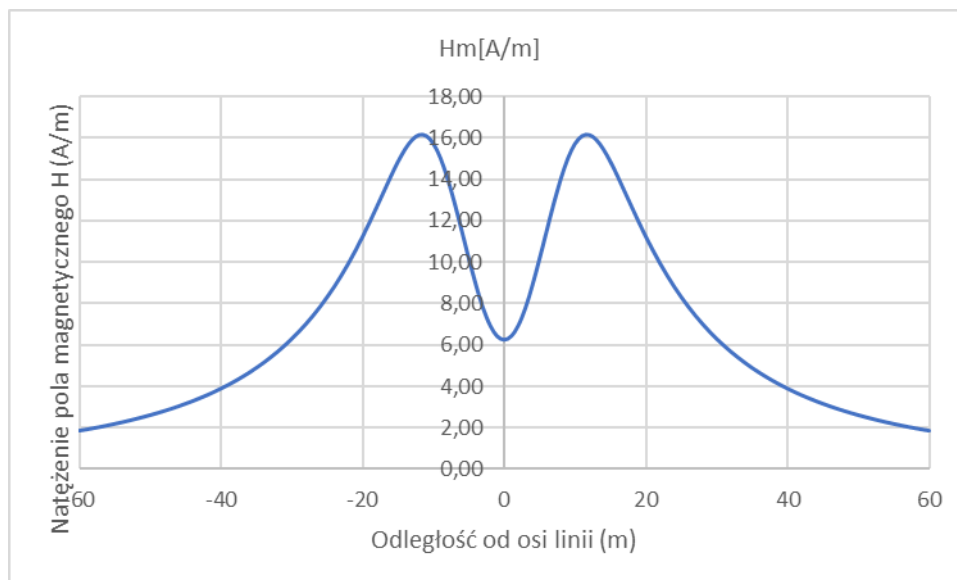
Rys.4. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego E w przęcie złożonym ze słupów serii E33 typu P – M3 (słup przelotowy słup mocny M3), w otoczeniu projektowanej linii – wyprowadzenie mocy z LSE (wariant alternatywny). Obliczenia przeprowadzono w przekroju, w którym odległość od ziemi najniżej zawieszonych przewodów wynosi $h_{min} = 10,0$ m, przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maksymalny zwis przewodów, $U_{rdop} = 420$ kV)



Rys.5. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola magnetycznego H w przęcie złożonym ze słupów serii E33 typu P – M3 (słup przelotowy słup mocny M3), w otoczeniu projektowanej linii – wyprowadzenie mocy z LSE (wariant alternatywny). Obliczenia przeprowadzono w przekroju, w którym odległość od ziemi najniżej zawieszonych przewodów wynosi $h_{min} = 10,0$ m, przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maksymalny zwis przewodów, $U_{rdop} = 420$ kV, Obciążenie każdego toru $I_{max} = 1250$ A)



Rys.6. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego E w przęśle złożonym ze słupów serii E33 typu P – M6 (słup przelotowy słup mocny M6), w otoczeniu projektowanej linii – wyprowadzenie mocy z LSE (wariant alternatywny). Obliczenia przeprowadzono w przekroju, w którym odległość od ziemi najniżej zawieszonych przewodów wynosi $h_{\min} = 10,0$ m, przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maksymalny zwis przewodów, $U_{rdop} = 420$ kV)



Rys.7. Wyniki obliczeń rozkładu natężenia pola magnetycznego H w przęśle złożonym ze słupów serii E33 typu P – M6 (słup przelotowy słup mocny M6), w otoczeniu projektowanej linii – wyprowadzenie mocy z LSE (wariant alternatywny). Obliczenia przeprowadzono w przekroju, w którym odległość od ziemi najniżej zawieszonych przewodów wynosi $h_{\min} = 10,0$ m, przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii (maksymalny zwis przewodów, $U_{rdop} = 420$ kV, Obciążenie każdego toru $I_{\max} = 1250$ A)

Obliczenia, które przeprowadzono dla najmniejszej odległości od ziemi przewodów fazowych ($h = h_{\min}$) wykazały, że natężenie pola elektrycznego (E) pod linią (w dowolnym miejscu na wysokości 2,0 m n.p.t.) nie przekroczy w żadnym miejscu wartości: **8,5 kV/m**, a wartość ta może wystąpić wyłącznie w przy maksymalnym zwisie przewodów, tj. w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii. Oznacza to spodziewane wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego, niezależnie od analizowanego przęsła, nie przekraczają wartości dopuszczalnej tej wielkości ($E_{\text{dop}} = 10$ kV/m) ustalonej w obowiązujących przepisach dla miejsc dostępnych dla ludzi.

W obszarze do -25 m ÷ +25 m od osi linii wartość dopuszczalna natężenia pola elektrycznego ustalona dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową (1 kV/m) może zostać przekroczona co oznacza, że w obszarze pod linią o szerokości 50 m zabudowa mieszkaniowa jest niedopuszczalna. W przypadku realizacji wariantu alternatywnego, tj. budowy dwutorowej linii napowietrznej 400 kV kwestia ta zostanie usankcjonowana poprzez ustanowienie służebności przesyłu w obszarze o szerokości 70 m (2 x 35 m).

Obliczenia, które przeprowadzono dla najmniejszej odległości od ziemi przewodów fazowych ($h = h_{\min}$) wykazały, że natężenie pola magnetycznego (H) pod linią (w dowolnym miejscu na wysokości 2,0 m n.p.t.) nie przekroczy w żadnym miejscu wartości: **16,5 A/m**, a wartość ta może wystąpić wyłącznie w przy maksymalnym zwisie przewodów i obciążeniu jej maksymalnym prądem ($I_{\max} = 1250$ A), tj. w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii. Oznacza to spodziewane wartości maksymalne natężenia pola magnetycznego, niezależnie od analizowanego przęsła, nie przekraczają wartości dopuszczalnej tej wielkości ($H_{\text{dop}} = 60$ A/m) ustalonej w obowiązujących przepisach dla miejsc dostępnych dla ludzi oraz terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową.

2.5. Obliczenia rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu projektowanych torów kablowych

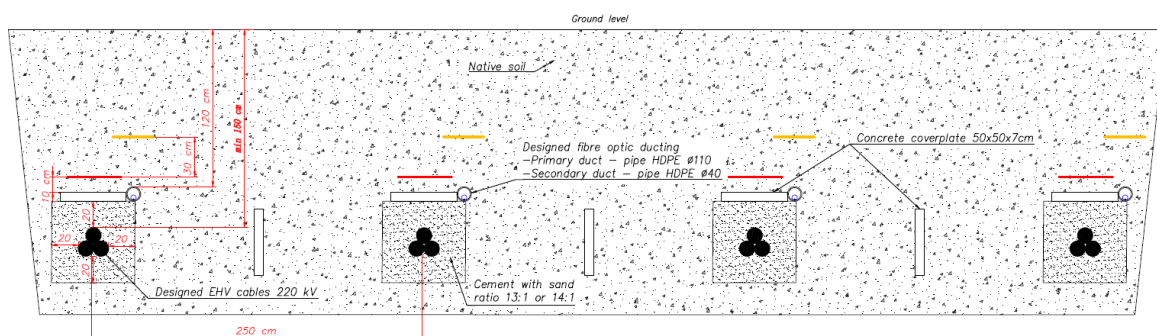
2.5.1. Dane do obliczeń

Wszystkie obliczenia rozkładu natężenia pola magnetycznego wykonano przy pomocy programu komputerowego PoLE-M, w algorytmie którego przyjęto następujące założenia:

- Tory kablowe pracujące na napięciu 220 kV
4 tory kablowe, z których każdy składa się z 3 pojedynczych, tj. łącznie 12 kabli zasilanych napięciem przemiennym o wartości $U_{n1} = 220$ kV przy dopuszczalnej obciążalności kabla prądem $I_{(220\text{ kV})} = 1000$ A,
 - ❖ odległość pomiędzy torami kablowymi (osiami torów): 250 cm,
 - ❖ głębokość pograżania kabli w gruncie: 1,3 m pod powierzchnią terenu,
 - ❖ układ kabli w torze: trójkątny (kable ułożone na styk),
 - ❖ układ faz w każdym torze kablowym: L1 L2 L3 (licząc od strony lewej – rys 8),
 - ❖ średnica zewnętrzna kabla:
 - ok. 129 mm dla kabli z żyłą miedzianą Cu (przekrój ok. 2500 mm²),
 - ok. 134 mm dla kabli z żyłą aluminiową Al (przekrój ok. 3000 mm²).
- Tory kablowe pracujące na napięciu 400 kV
2 tory kablowe, z których każdy składa się z 3 pojedynczych, tj. łącznie 6 kabli zasilanych napięciem przemiennym o wartości $U_{n1} = 400$ kV przy dopuszczalnej obciążalności kabla prądem $I_{(220\text{ kV})} = 1250$ A,
 - ❖ odległość pomiędzy torami kablowymi (osiami torów): 500 cm,
 - ❖ głębokość pograżania kabli w gruncie: 1,3 m pod powierzchnią terenu,
 - ❖ układ kabli w torze: trójkątny (kable ułożone na styk),
 - ❖ układ faz w każdym torze kablowym: L1 L2 L3 (licząc od strony lewej – rys 9),
 - ❖ średnica zewnętrzna kabla:
 - ok. 142 mm dla kabli z żyłą miedzianą Cu (przekrój ok. 2500 mm²),
 - ok. 147 mm dla kabli z żyłą aluminiową Al (przekrój ok. 3000 mm²).

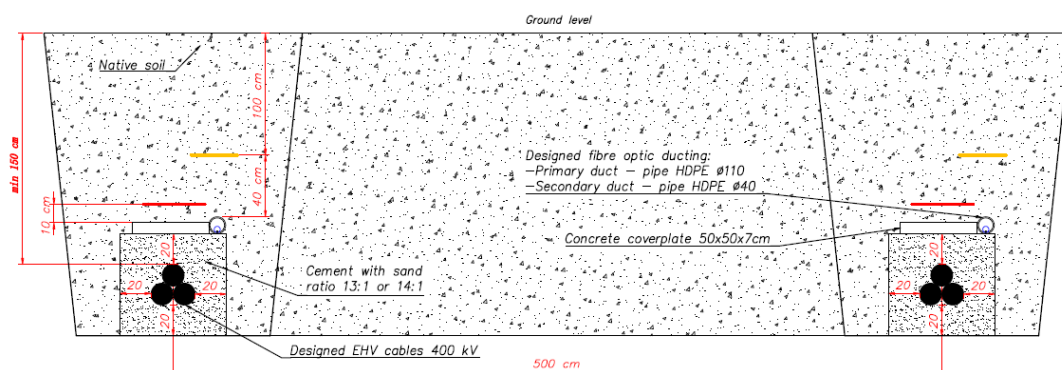
Obliczenia rozkładu pola magnetycznego dla poszczególnych rozwiązań (wariantów) wykonano identyfikując wartości wspomnianej wielkości na wysokościach: 0,2; 1,0 i 2,0 m n.p.t., zgodnie z rekomendacją wskazaną w rozporządzeniu [2].

Cross-section – EHV cable lines 220 kV – Open trench



Rys. 8. Widok kanału, w którym pograżone zostaną kable (4 tory kablowe) pracujące na napięciu 220 kV. Projektowana głębokość pograżenia kabli 1,3 m pod powierzchnią terenu. Rysunek poglądowy.

Cross-section – EHV cable lines 400 kV – Open trench



Rys. 9. Widok kanału, w którym pograżone zostaną kable (2 tory kablowe) pracujące na napięciu 400 kV. Projektowana głębokość pograżenia kabli 1,3 m pod powierzchnią terenu. Rysunek poglądowy.

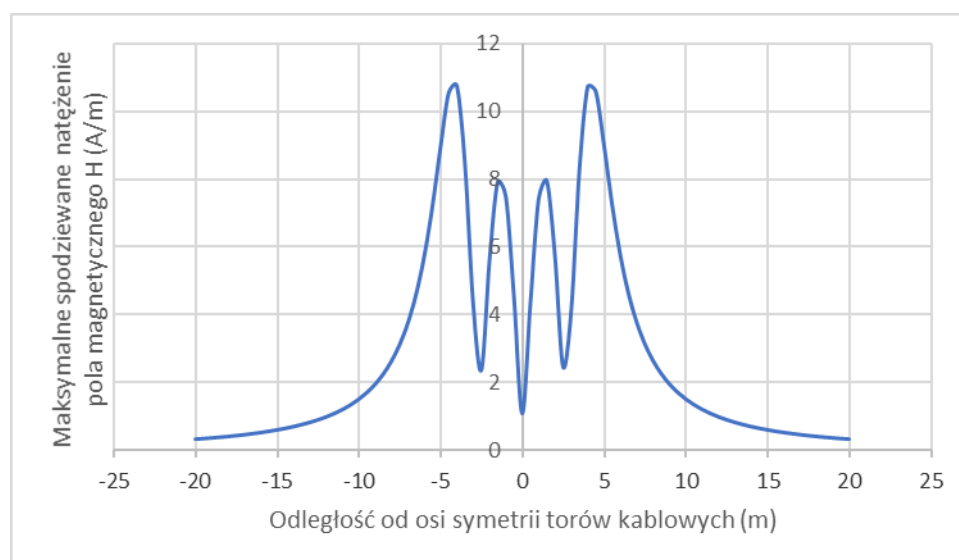
2.5.2. Wyniki obliczeń rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu projektowanych torów kablowych

Wyniki obliczeń maksymalnych wartości natężenia pola magnetycznego (H), jakich spodziewać się można nad zasilającymi ciągami kablowymi pracującymi na napięciu 220 i 400 kV zaprezentowano w tabeli 2, natomiast wykresy rozkładów natę-

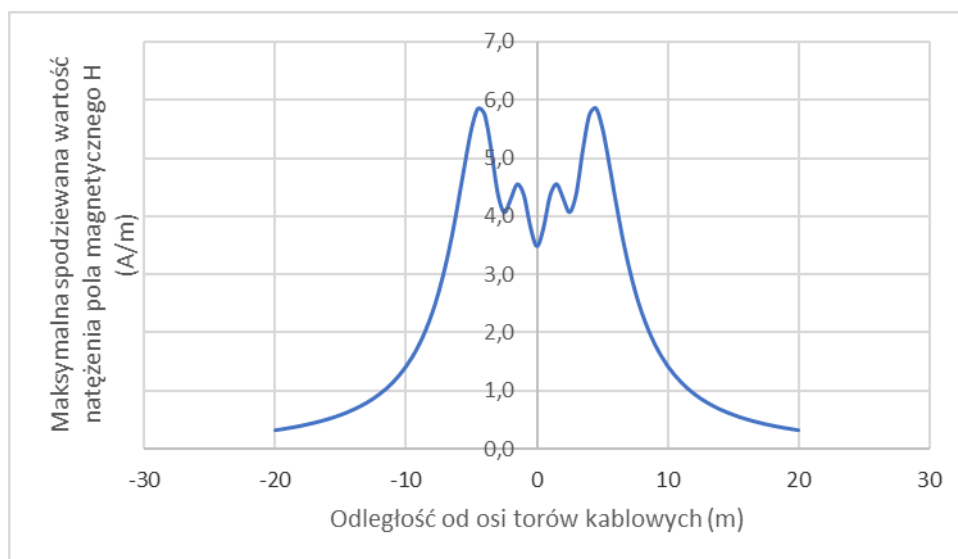
żenia pola magnetycznego (H) w przekroju poprzecznym do osi ciągu kablowego uwidoczniono na rys. 10 – 21.

Tabela 2. Wyniki obliczeń spodziewanych maksymalnych wartości natężenia pola magnetycznego (H) w otoczeniu torów kablowych pracujących na napięciu 220 kV i 400 kV, przy obciążeniu każdego toru prądem $I_{(220 \text{ kV})} = 1000 \text{ A}$ oraz $I_{(400 \text{ kV})} = 1250 \text{ A}$. Obliczenia wykonano dla scharakteryzowanych w tekście danych technicznych torów kablowych.

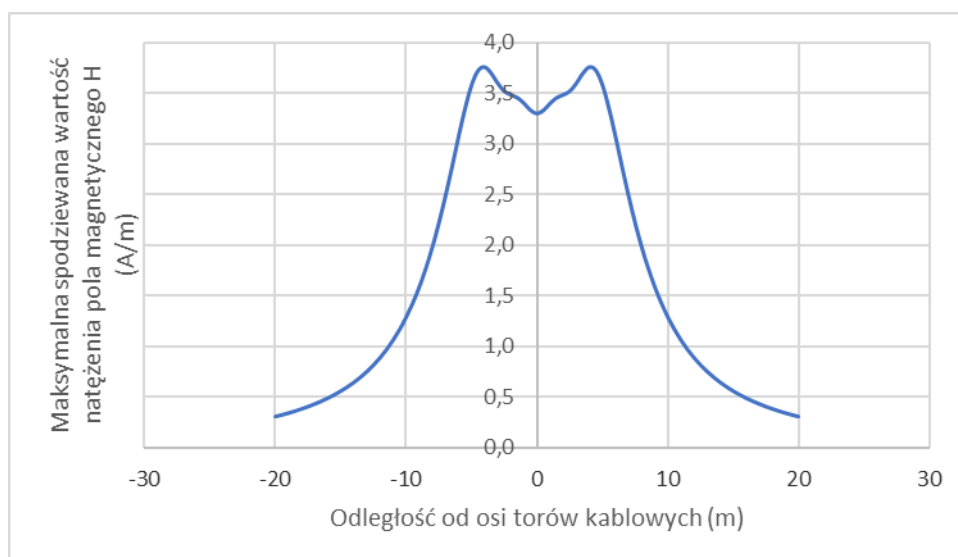
Wariant	Prąd (maksymalny) obciążenia toru kablowego $I_{(220 \text{ kV})} = 1000 \text{ A}$			Prąd (maksymalny) obciążenia toru kablowego $I_{(400 \text{ kV})} = 1250 \text{ A}$		
	Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego H [A/m] wyznaczona na wysokości:			Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego H [A/m] wyznaczona na wysokości:		
	[A/m]			[A/m]		
	0,2	1,0	2,0	0,2	1,0	2,0
Kable z żyłą miedzianą Cu	10,8	5,9	3,8	17,1	7,4	3,9
Kable z żyłą aluminiową Al	12,0	6,6	4,4	17,2	7,5	4,0



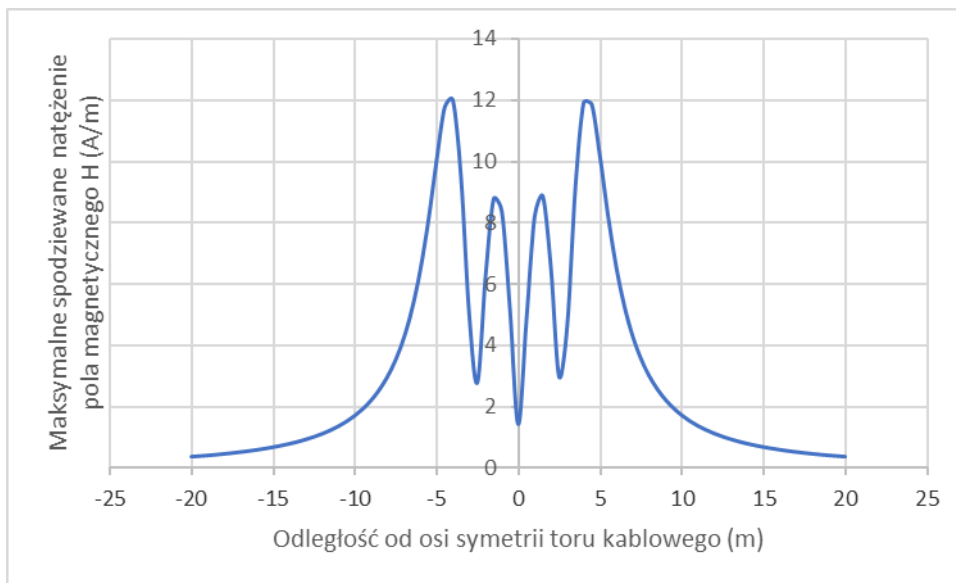
Rys.10. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 0,2 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 4 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 250 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą miedzianą (Cu), zasilanych napięciem $U_{n1} = 220 \text{ kV}$ i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{(220 \text{ kV})} = 1000 \text{ A}$).



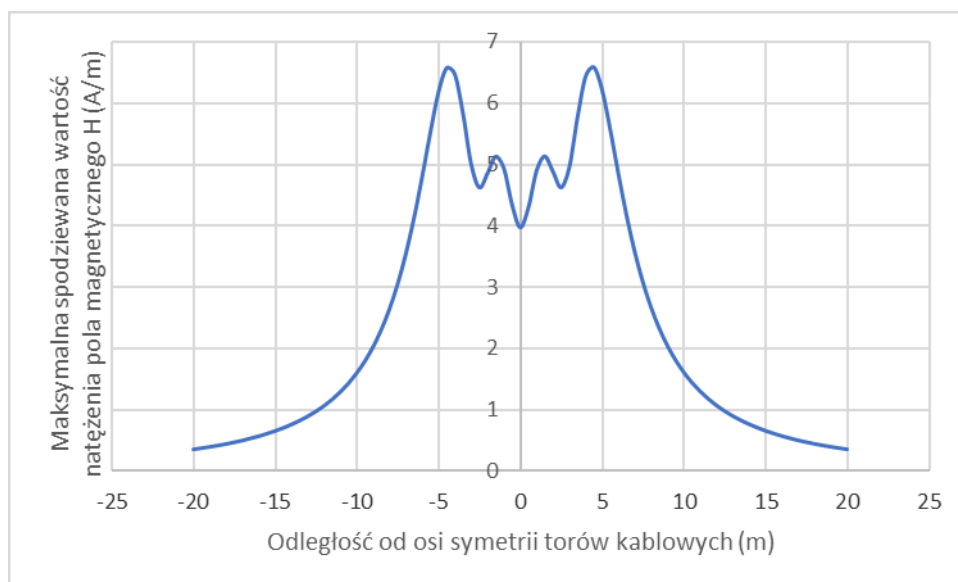
Rys.11. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 1,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 4 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 250 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą miedzianą (Cu), zasilanych napięciem $U_{n1} = 220$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1000$ A).



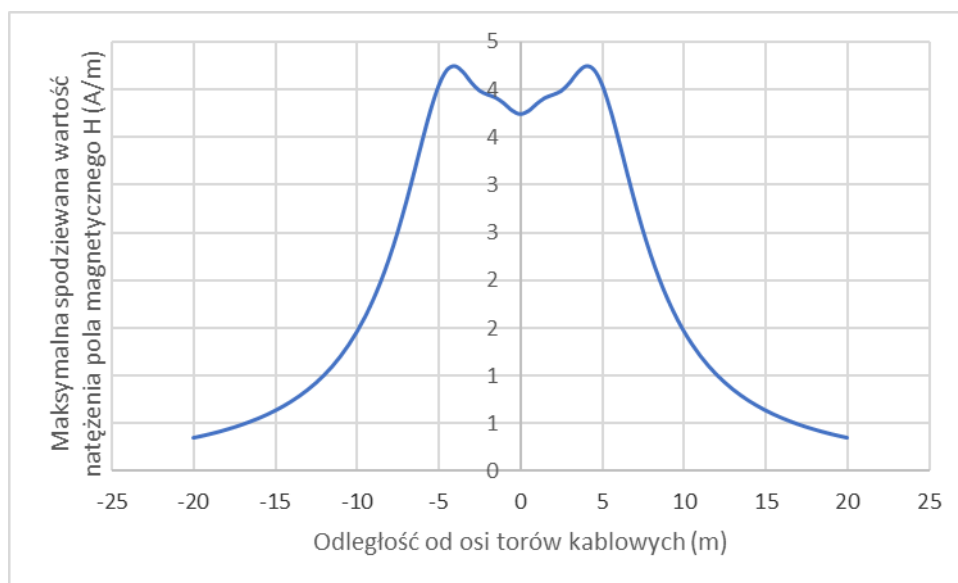
Rys.12. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 2,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 4 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 250 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą miedzianą (Cu), zasilanych napięciem $U_{n1} = 220$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1000$ A).



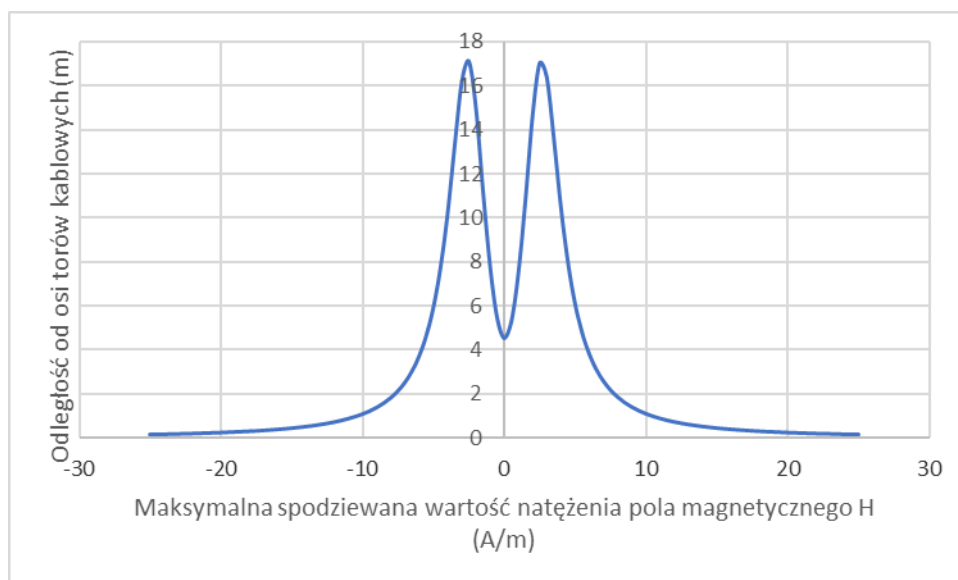
Rys.13. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 0,2 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 4 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 250 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą aluminium (Al), zasilanych napięciem $U_{n1} = 220 \text{ kV}$ i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1000 \text{ A}$).



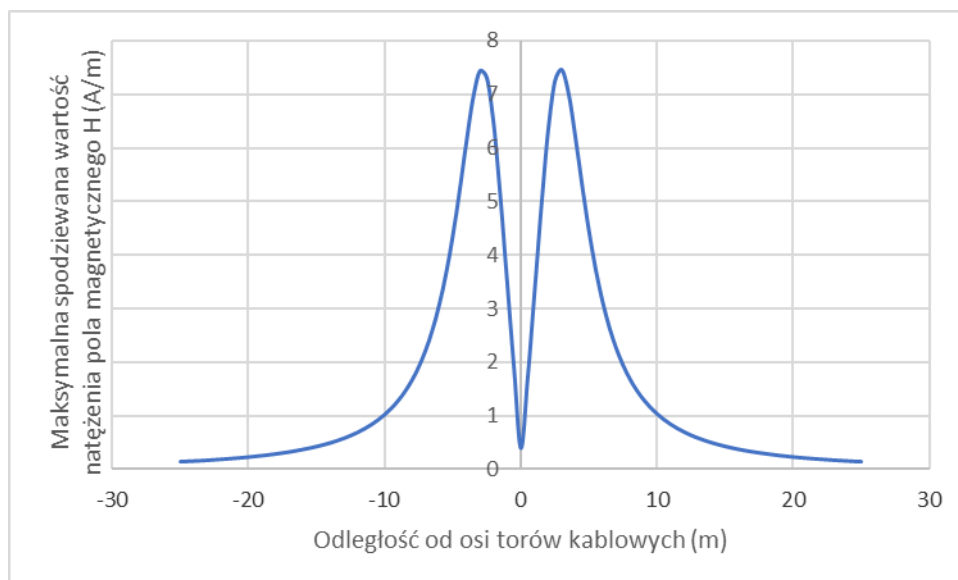
Rys.14. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 1,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 4 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 250 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą aluminium (Al), zasilanych napięciem $U_{n1} = 220 \text{ kV}$ i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1000 \text{ A}$).



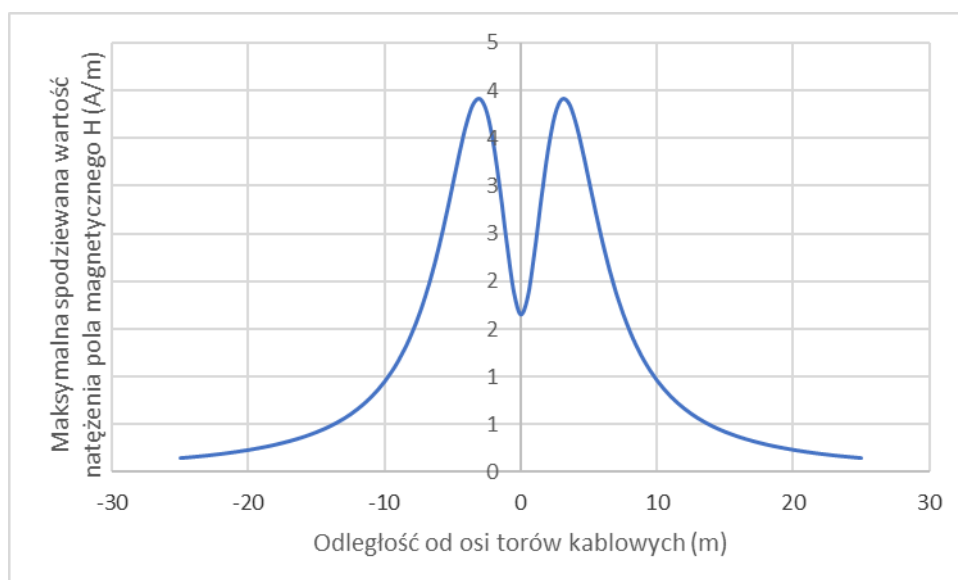
Rys.15. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 2,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 4 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 250 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą aluminium (Al), zasilanych napięciem $U_{n1} = 220$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1000$ A).



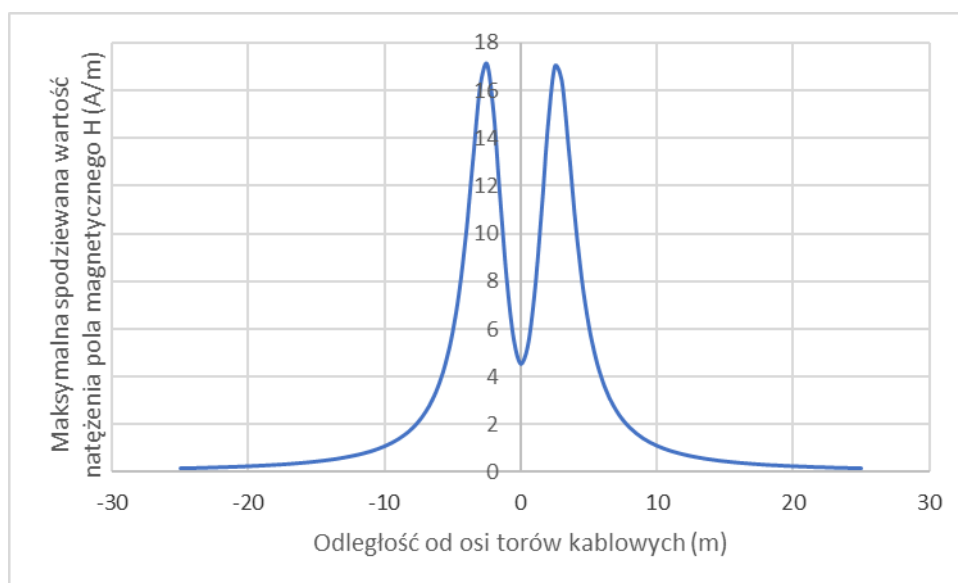
Rys.16. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 0,2 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 2 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 500 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą miedzianą (Cu), zasilanych napięciem $U_{n1} = 400$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1250$ A).



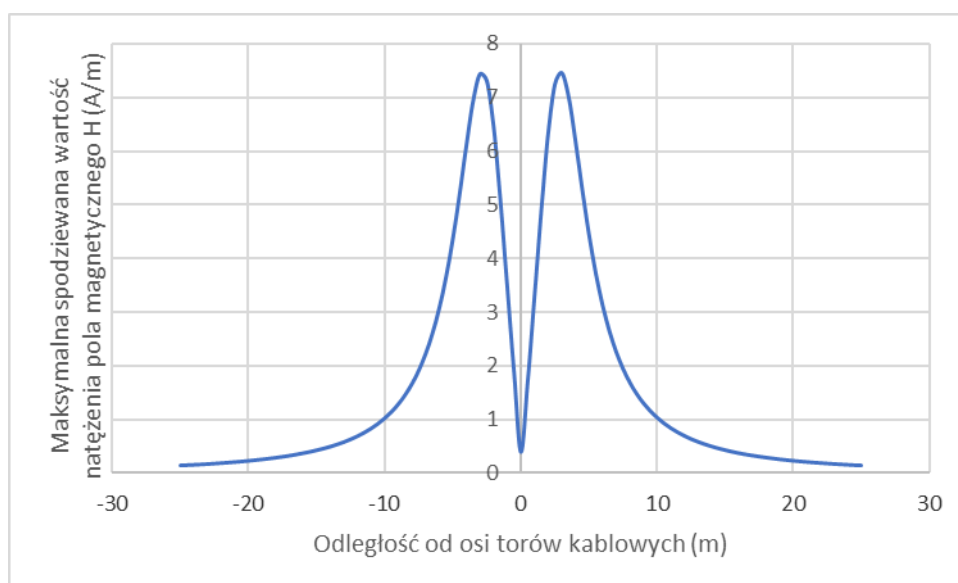
Rys.17. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 1,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 2 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 500 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą miedzianą (Cu), zasilanych napięciem $U_{n1} = 400$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1250$ A).



Rys.18. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 2,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 2 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 500 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą miedzianą (Cu), zasilanych napięciem $U_{n1} = 400$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1250$ A).

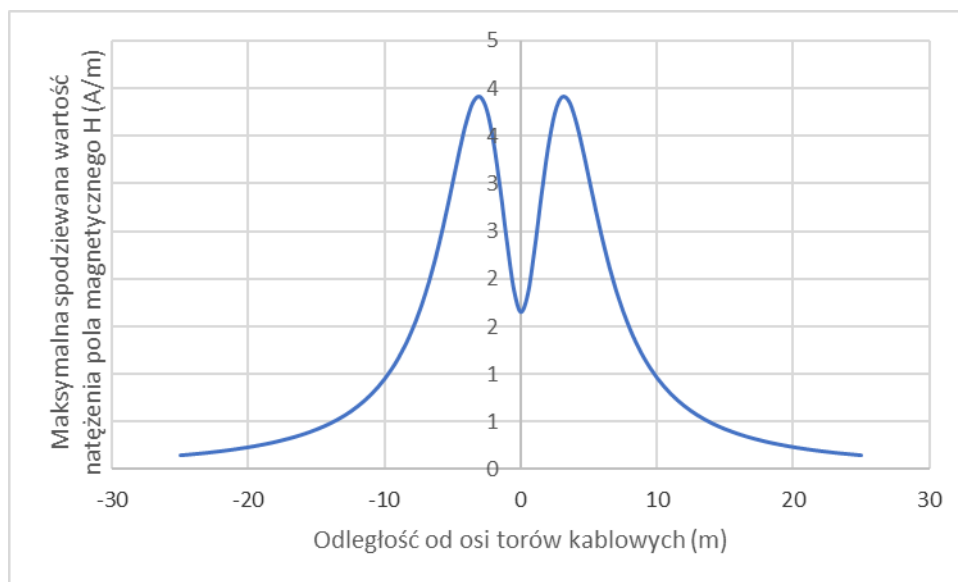


Rys.19. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 0,2 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 2 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 500 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą aluminium (Al), zasilanych napięciem $U_{n1} = 400$ kV i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1250$ A).



Rys.20. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 1,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 2 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 500 cm. Obliczenia wyko-

nano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą aluminiową (Al), zasilanych napięciem $U_{n1} = 400 \text{ kV}$ i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1250 \text{ A}$).



Rys.21. Spodziewana maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego (H) na wysokości 2,0 m n.p.t. w funkcji odległości od osi ciągu kablowego składającego się z 2 torów kablowych, w którym odległość pomiędzy sąsiednimi torami kablowymi wynosi 500 cm. Obliczenia wykonano dla torów kablowych wykonanych kablami z żyłą aluminiową (Al), zasilanych napięciem $U_{n1} = 400 \text{ kV}$ i maksymalnej obciążalności prądowej toru kablowego ($I_{220 \text{ kV}} = 1250 \text{ A}$).

2.5.3. Komentarz do wyników obliczeń

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują, że niezależnie od realizacji ciągów kablowych (4 tory pracujące na napięciu 220 kV czy 2 tory pracujące na napięciu 400 kV), największych wartości natężenia pola magnetycznego nad ciągiem kablowym można spodziewać się tuż nad powierzchnią ziemi (0,2 m n.p.t.). Na wysokości 2 m n.p.t. wartości te będą ponad trzykrotnie mniejsze.

Przeprowadzone oszacowania jednoznacznie wskazują, że nawet przy maksymalnym obciążeniu poszczególnych linii kablowych, a w konsekwencji całego ciągu kablowego, wartość dopuszczalna natężenia pola magnetycznego (60 A/m) ustalona wspomnianym wcześniej rozporządzeniem, nie będzie przekroczona ponad poziom gruntu, w szczególności na wysokości 2,0 m n.p.t. Oznacza to, że przebywanie

ludności (ekspozycja środowiskowa) nawet bezpośrednio nad ciągami kablowymi będzie dozwolone bez jakichkolwiek ograniczeń czasowych.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. 2019.2448).
- [2] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 17 lutego 2020 r. w sprawie sposobów sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U.2020.258 z późn. zm.).