

doi:10.15199/48.2020.08.26

Pomiary diagnostyczne linii kablowych średniego napięcia z użyciem różnych źródeł napięć probierczych

Streszczenie. W artykule opartym na doświadczeniach przedstawiono szereg metod pomiarowych z wykorzystaniem różnych źródeł napięć probierczych, opis poszczególnych metod pomiarowych oraz zasady jakimi należy się kierować podczas wyboru odpowiedniego źródła napięcia probierczego.

Abstract. The experiential article presents a number of measurement methods using various sources of test voltages, a description of individual measurement methods and principles to be followed when selecting the appropriate source of test voltage. (**Diagnostic measurements of medium voltage cable lines with regard to different sources of tension voltage**).

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, diagnostyka linii kablowych, metody detekcji wyładowań niepełnych, napięcie przemiennie tłumione.

Keywords: partial discharges, cable lines diagnostics, methods of partial discharges measurement, damped AC voltage.

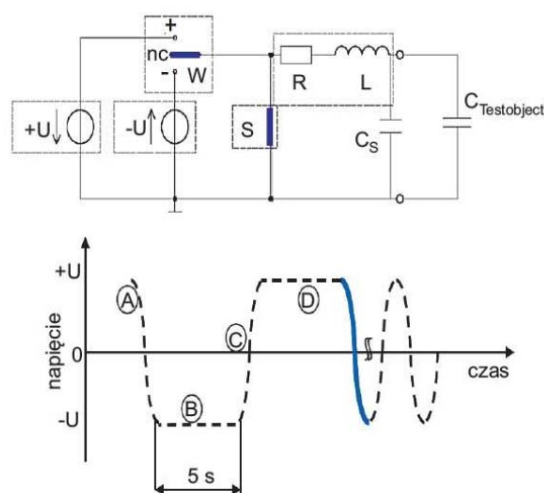
Wstęp

Wykorzystanie detekcji wyładowań niepełnych do oceny stanu izolacji linii kablowych jest zjawiskiem powszechnym. Pierwsze wzmianki sięgają lat 40-tych XX wieku, ale w ostatnich latach wzrasta zapotrzebowanie na tego typu pomiary. Nierozłącznie wiąże się to z restrykcyjnym podejściem do wskaźników związanych z awariami w sieciach takich jak SAIDI oraz SAIFI [1]. Producenci aparatury diagnostycznej wychodząc naprzeciw oczekiwaniom rynku prezentują coraz to nowsze rozwiązania proponując pomiar wyładowań niepełnych różnymi źródłami napięć probierczych. Służby zajmujące się eksploatacją sieci, których zadaniem jest kontrola przeprowadzanych pomiarów i weryfikacja otrzymanych wyników coraz częściej borykają się z dylematem jakim są rozbieżne wyniki końcowe. Rozwiązanie tego problemu wynikającego z zastosowania różnych źródeł napięć probierczych stało się kwestią kluczową. Każda technologia ma swoje wady i zalety które można ocenić porównując wyniki pomiarów różnych aparatów w takich samych warunkach i na tych samych odcinkach linii kablowych. W niniejszym artykule opisano najbardziej rozpowszechnione techniki badań diagnostycznych linii kablowych średnich napięć skupiając uwagę na źródłach napięć probierczych. Opisano również najnowszą generację wozów diagnostycznych posiadających możliwość wykonywania pomiarów kabli trzema źródłami napięć probierczych. Podjęto również dyskusję w jaki sposób w ciągu kilku ostatnich lat przedsiębiorstwa energetyczne powiększają i rozbudowują swoją bazę wozów pomiarowych na przykładzie Rejonu Energetycznego Lublin-Miasto, oraz kilku innych zakładów energetycznych będących w oddziale lubelskim PGE Dystrybucja S.A. [2, 5].

Systemy diagnostyczne VLF Smart, TDS NT, oraz DAC

W oddziale lubelskim PGE Dystrybucja obecnie jest pięć zestawów diagnostycznych z czego Rejon Energetyczny Lublin-Miasto posiada dwa wozy do pomiarów wzn. Pierwszy z nich wyposażony jest w aparaturę generującą napięcie wolnozmiennie sinusoidalne 0,1 Hz. Drugą jednostkę rozbudowano o aparaturę do pomiaru wyładowań niepełnych. System został zainstalowany na już istniejącym samochodzie pomiarowym. Modułowa budowa systemu TDS NT umożliwiła modernizację już wcześniej zakupionego systemu VLF 0,1 Hz CR. Oprócz zwykłych prób napięciowych stało się możliwe wykonanie tzw. monitorowanych prób i diagnostyki kabli SN. Od momentu zainstalowania aparatury Rejon Energetyczny Lublin-Miasto

przeprowadził już pomiary diagnostyczne na ponad 380 kablach SN o różnej konstrukcji. Specyficzną cechą rozbudowanego systemu jest możliwość generowania dwóch różnych typów napięć probierczych tj: napięcia wolnozmiennego VLF (Very Low Frequency) 0,1 Hz jak i napięcia oscylacyjno-tłumionego DAC (Damped AC) [3].

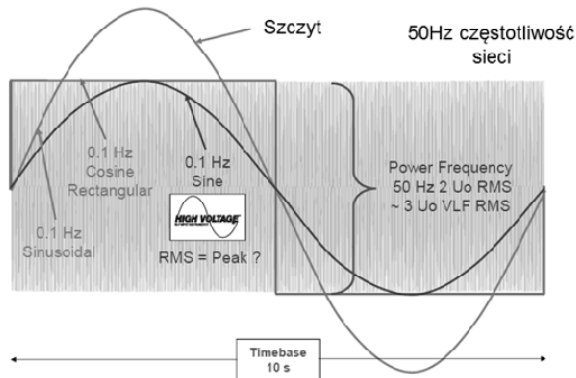


Rys.1. Schemat obwodu probierczego DAC i VLF oraz przebieg napięcia dla układu VLF [3]

Rysunek 1 pokazuje schemat obwodu, jaki został zastosowany do generacji obydwu napięć [3]. Obwód ten składa się z dwóch źródeł napięcia: dodatniego $+U$ jak i ujemnego $-U$. Przełącznik W łączy jedno ze źródeł, podczas gdy drugie jest izolowane. Indukcyjność L i pojemność wewnętrzna systemu C_S odpowiadają za doprowadzenie układu do stanu rezonansowego. Straty wewnętrzne obwodu rezonansowego są reprezentowane przez rezystancję R . Głównym zadaniem tego systemu jest osiągnięcie właściwego czasu przełączania. Rysunek 1 przedstawia również schematycznie wykres czasowy trybu VLF. W fazie „B” i „D” napięcie pozostaje stałe, co oznacza że dodatnie lub ujemne źródło napięcia jest załączone za pomocą przełącznika W . Przełącznik S jest otwarty. W fazie rezonansowej, „A” i „C”, przełącznik W jest ustawiony w pozycji neutralnej, aby odizolować źródła napięcia stałego od obwodu rezonansowego. Przełącznik S zamyka się i zamiana biegunów odbywa się z częstotliwością zgodną z równaniem

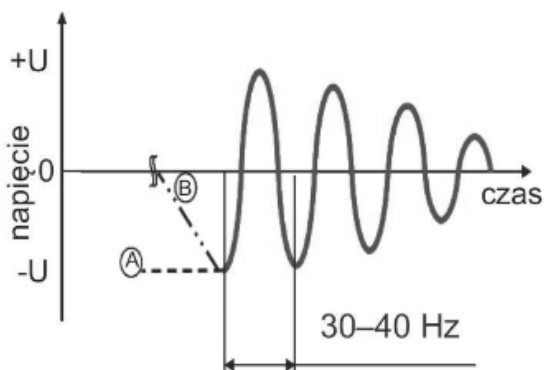
$$(1) \quad f_{swing} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_S + C_{TestObject})}}$$

gdzie: f_{swing} – częstotliwość obwodu przełączającego, L – indukcyjność wewnętrzna systemu, C_S – pojemność wewnętrzna systemu, $C_{TestObject}$ – pojemność badanego obiektu [3].



Rys.2. Charakterystyka przebiegów napięciowych VLF [4]

Istnieje zasadnicza różnica w generowaniu napięcia VLF cosinus, a napięcia oscylacyjno-tłumionego DAC (rys.2). W trybie VLF cosinus, faza rezonansu jest zatrzymana przez otwarcie przełącznika S w odpowiednim czasie. Źródła ładują pojemność wewnętrzną C_S do napięcia nominalnego, zadanego przez system. W trybie DAC przełącznik S jest zamknięty, tak więc obwód rezonansowy o określonej częstotliwości jest wytwarzany przez rezonans między wewnętrzną cewką L , jak i pojemnością badanego obiektu $C_{TestoObject}$. Tłumienie drgań jest wywołane przez straty wewnętrznych elementów generatora napięciowego, jak i straty rezystancyjne badanego obiektu. Rysunek 3 pokazuje napięcie oscylacyjno-tłumione DAC [3, 4].



Rys.3. Cykl napięcia oscylacyjno-tłumionego DAC [3]

System TDS NT pozwala na generację obydwu rodzajów napięcia w jednym systemie. System pozwala nawet na kombinację sekwencji napięć, np. w pierwszej kolejności zastosowanie napięcia DAC i po nim bezpośrednio VLF 0,1 Hz. Ponadto należy zauważyć, iż mając (+) pozytywne, jak i (-) negatywne źródło napięcia dla fazy ładowania, np. dla napięcia DAC + VLF kombinacja obu źródeł podczas próby napięciowej jest możliwa. Główną zaletą połączonych źródeł napięcia probierczego jest jego zastosowanie dla prób napięciowych nowych kabli SN, gdzie ogólnie zaleca się stosowanie napięcia

zmiennego o stałej amplitudzie (którym jest tryb VLF cosinus) rekomendowany również przez polską normę SEP: N-SEP-E-004 (2014). Dla badań kabli będących już w eksploatacji zalecane jest napięcie niedestruktywne o fali samogasnącej czyli napięcie oscylacyjne tłumione DAC o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości sieciowej 50 Hz. W omawianym systemie obydwie źródła napięć są dostępne przełączając w oprogramowaniu odpowiedni tryb. W opisywanych systemach przy napięciach DAC, VLF CR jak i VLF Sinus pomiar wnz odbywa się zgodnie ze standardem IEC 60270 [3, 5, 8, 9, 11, 12, 16].

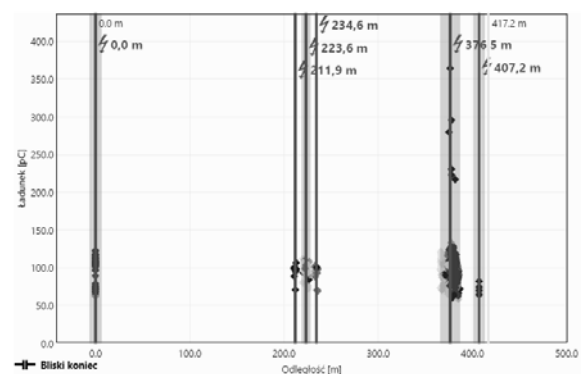
Ważnymi aspektami których nie można pominąć są kwestie aktualnych norm i przepisów dotyczących pomiarów diagnostycznych. Kluczową rolę odgrywa międzynarodowa norma IEEE. Polska norma poświęcona projektowaniu i budowie elektroenergetycznych linii kablowych to norma N SEP-E 004 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe [6, 7, 10, 11, 13, 14, 15].

Przeprowadzone badania

Do badań wykorzystano kable będące w ciągłej eksploatacji jak również kable przeznaczone wyłącznie do testowania. W pierwszym przypadku zbadany został kabel relacji GPZ Elektrownia do stacji transformatorowej o numerze K-1592. Długość badanej linii to 417 mb. Linia kablowa wykonana kablem typu XRUHAKXs 1x120/25 mm² 12/20 kV. Napięcie znamionowe pracy w układzie faza-zemia wynosi 8,7 kV.

Pierwszą aparaturę którą wykorzystano do pomiarów był zestaw pomiarowy „VLF Smart” austriackiej firmy B2, Zestaw probierczy posiada źródło napięciowe o napięciu wolnozmiennym 0,1Hz sin. Najnowsza wersja oprogramowania z 2019 posiada wiele pożytecznych funkcjonalności takich jak możliwość dołączenia mapy w wybranym przez pomiarowca systemie np. GIS lub OpenStreetMap. Przy bezpośrednim połączeniu z siecią istnieje również możliwość naniesienia współrzędnych GPS zainwentaryzowanych muf co jak na tą chwilę jest nowością wśród producentów aparatury diagnostycznej. Opisywana aparatura wykryła na badanym odcinku kablowym kilka charakterystycznych miejsc z dużym skupiskiem wyładowań niezupełnych co przedstawia rysunek 4.

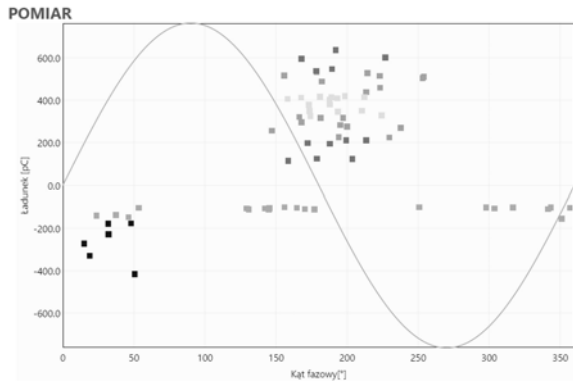
WYKRESY ŁADUNEK / ODLEGŁOŚĆ



Rys.4. Wartość ładunku pozornego w funkcji odległości

Skupiska na obydwu końcach kabla świadczą o niewielkich wyładowaniach koronowych na głowicach kablowych co zostało wyeliminowane po odpięciu kabli oraz zastosowaniu odpowiednich do danego typu głowicy izolatorów eliminując w ten sposób wyładowania koronowe. Pierwszym znaczącym skupiskiem wnz okazał się 25-cio metrowy odcinek w odległości 220 metrów od bliskiego końca. Jak się okazało było to odcinek kabla o izolacji z

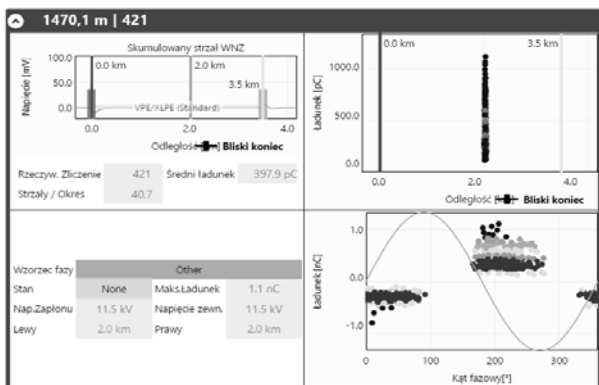
polietylenu termoplastycznego PE, który w następstwie przeprowadzonych badań został wymieniony. Przyczyną drugiego skupiska wnz okazała się błędnie wykonana mufa kablowa na 376 metrze od bliskiej głowicy. Podczas dalszej analizy tego skupiska wnz wykazano że przyczyna występowania wyładowań niepełnych jest ostra krawędź na potencjale ziemi. Jest to zmanifestowane poprzez wyższe amplitudy na zboczu ujemnym co przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Wartości ładunku w zależności do kąta fazowego

Pomiary wykonane na tym samym odcinku kablowym aparaturą wyposażoną w TDS NT oraz DAC dały bardzo zbliżone wyniki. Niewielką różnicą było napięcie zapiłonu które w przypadku źródła napięcia VLF sinus było nieco wyższe od pozostałych.

Do kolejnego porównania wykorzystano specjalną linię testową wybudowaną na potrzeby szkoleń brygad monterskich w Rejonie Energetycznym Lublin-Miasto. Jej wielką zaletą jest długość 3500 metrów, duża ilość muf z charakterystycznymi defektami, oraz możliwość konfigurowania miejsc występowania wyładowań niepełnych. Kabel stanowią odcinki wykonane z polietylenu usieciowanego XLPE, oraz polietylenu termoplastycznego PE. W pomiarach wykorzystano te same wozy diagnostyczne. Podczas przeprowadzania badań dało się zauważyć pewne różnice wynikające z budowy i zasady działania poszczególnych zestawów. Zestaw VLF Smart posiada możliwość wykonywania jednocześnie próby napięciowej z detekcją wyładowań niepełnych, oraz pomiar kąta stratności dielektrycznej tgδ, pomiar w tym przypadku trwa nieco dłużej. Zaletą systemów DAC oraz TDS NT jest szybszy pomiar. W obu przypadkach zainicjowane wyładowania niepełne zostały bezbłędnie zlokalizowane co pokazuje rysunek 6.



Rys.6. pomiar ładunku i kąta fazowego VLF Sinus

Wnioski

Wieloletnie doświadczenie lubelskiego zespołu pomiarowców w diagnostyce linii kablowych średnich napięć potwierdziło funkcjonalności systemów VLF sin, VLF CR i TDS NT, z czego każdy z nich charakteryzują się swoimi odrębnymi cechami:

1. VLF Sinus 0,1 Hz – bardzo mała prędkość oscylacji napięcia (aż 500 razy mniejsza od napięcia sieciowego 50 Hz) co ma duży wpływ na charakter wyładowań niepełnych. WNZ są zależne od prędkości zmian napięcia, przez co przy częstotliwości 0,1 Hz ich napięcie zapiłonu będzie znacznie wyższe niż przy napięciu roboczym kabla. Napięciem tym można wykonywać próby izolacji kabli energetycznych zgodnie ze wszystkimi europejskimi i światowymi normami [4]. Niewątpliwą zaletą tego kształtu napięcia (rys.2) w stosunku do innych jest fakt, że można za jego pomocą wykonać pomiar tgδ [3, 4].



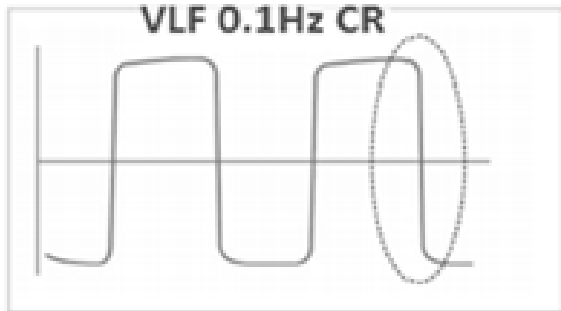
Rys.7. Aparatura diagnostyczna B2 Suite (fot. Durak, Gustaw)

2. DAC – napięcie oscylacyjne tłumione (rys.8) jest mniej niszczące od napięcia VLF ze względu na pomiar wykonywany przy krótkich "strzałach" napięciowych. Nie przykładamy napięcia przez cały czas pomiaru, dzięki czemu możliwe jest efektywne wykonanie diagnostyki kabla mocno wyeksploatowanego bez zniszczenia jego izolacji. Częstotliwość oscylacji napięcia zależna jest od pojemności badanego kabla i zawiera się w przedziale od ok. 20 Hz do 500 Hz (warunki bardzo zbliżone do napięcia znamionowego kabla – częstotliwość max. 10 razy większa). Systemy DAC są bardzo mobilne, lekki i niewielki system jest w stanie testować bardzo długie kable. Wadą tego rodzaju napięcia jest to, że nie można przy jego użyciu wykonywać prób napięciowych zgodnie z obowiązującymi normami [5, 10, 11, 12, 15, 16].



Rys.8. Fala oscylacyjno-tłumiona dla diagnostyki WNZ [4]

3. VLF CR – tzw. Slope (technologia pomiaru WNZ przy zboczu napięcia 50 Hz) - System generuje napięcie VLF cosinus prostokątny 0,1 Hz, ale pomiar WNZ wykonywany jest tylko w "okienkach" oscylacji napięcia co pokazuje rysunek 9 [3, 4].



Rys.9. Metoda detekcji wnz przy napięciu VLF Sinus [4]

Prędkość tych oscylacji zależy od długości (pojemności) badanego kabla i będzie ona zbliżona do oscylacji przy metodzie DAC. Główna różnica w stosunku do napięcia DAC to fakt, że tutaj napięcie przykładane jest do badanego obiektu przez cały czas, jak przy próbie napięciowej. Można tym napięciem wykonywać próby napięciowe kabli zgodnie ze wszystkimi obowiązującymi normami. Systemy generujące to napięcie są niewielkie i lekkie w porównaniu do systemów VLF Sinus 0,1 Hz i pozwalają na badanie dłuższych kabli [3, 4].

Generalnie najbardziej istotna różnica pomiędzy w/w metodami leży w częstotliwości oscylacji napięcia pomiarowego. Przy napięciu VLF Sinus 0,1 Hz prędkość narastania jest bardzo mała i przez to WNZ na danym defekcie mogą zapalać się przy wyższym napięciu niż przy pomiarze metodami DAC czy Slope. Napięcia DAC i Slope mają częstotliwość znacznie bardziej zbliżoną do napięcia znamionowego kabla, dzięki czemu dają one nam bardziej wymierne wyniki pomiaru diagnostycznego. Często zdarza się sytuacja, gdzie przy pomiarze metodą VLF sinus 0,1 Hz WNZ nie występują wcale, albo napięcie ich zapłonu jest znacznie wyższe niż U_0 , a po pomiarze tego samego kabla metodami DAC czy Slope okazuje się, że wyładowania zapalają się przy $0,8 \times U_0$, i rozpoznanych jest kilka punktów, w których znajdują się defekty [3, 4].

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Partyka, prof. PL, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: j.partyka@pollub.pl;
mgr inż. Sławomir Durak, mgr inż. Mariusz Gustaw, PGE Dystrybucja S.A. Oddział Lublin ul. Garbarska 21a, 20-340 Lublin, E-mail: slawomir.durak@pgedystrybucja.pl, mariusz.gustaw@pgedystrybucja.pl

LITERATURA

- [1] Konarski M., Węgierek P., The use of power restoration systems for automation of medium voltage distribution grid, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), no. 6, 86-89
- [2] Parciak J., Gulski E., Rakowska A., Soda K., Doświadczenia z badań odbiorczych i eksploatacyjnych linii kablowych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), no. 10/2018, 33-36
- [3] Cichecki P., Bratek D., Chmielak W., Nogal Ł., Łasica A., Diagnostyka wyładowań niepełnych kabli SN oparta na napięciu wolnozmiennym VLF i oscylacyjno-tłumionym DAC, *Elektro-Info*, 10/2015, 88-102
- [4] Cichecki P., Testing and Diagnosis of High Voltage and Extra High Voltage Power Cables with Damped AC Voltages, *Delft University of Technology*, 2018
- [5] Wymagania szczegółowe wykonywania prób i pomiarów kabli Elektroenergetycznych nN i SN w PGE Dystrybucja S.A. Oddział Białystok, Maj 2018
- [6] IEEE 400.2-2013: IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency, (2013)
- [7] IEEE 400.4-2015: Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC), (2015)
- [8] PN-EN 60060-3:2008P Wysokonapięciowa technika probiercza, część 3: Definicje i wymagania dotyczące badań w miejscu zainstalowania. Badania rezonansowym napięciem przemiennym DAC, pkt. 10
- [9] PN-E-04700:1998/Az1:2000 Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych. Wytuczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych
- [10] IEEE 400.4/D7:2014PL Wytuczne badania odbiorczych i eksploatacyjnych ekranowanych kabli energetycznych o napięciu znamionowym powyżej 5 kV za pomocą napięcia prądu przemiennego tłumionego
- [11] PN-EN 60270:2003P Wysokonapięciowa technika probiercza - Pomiar wyładowań niepełnych
- [12] PN-EN 60885-2:2004E Elektryczne metody badań kabli energetycznych Część 2 Wyładowania niepełne
- [13] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Elektroenergetycznych linii kablowych, PTPIREE Poznań, maj 2011
- [14] N SEP-E-004 Wydanie II Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa