



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Elektroenergetyka

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko
dr inż. Sylwester Adamek
mgr inż. Adrian Belowski

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektroenergetyki



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Plan prezentacji

1. System Elektroenergetyczny
2. Budowa i modelowanie elementów systemu elektroenergetycznego
3. Problemy napięciowe w systemie elektroenergetycznym
4. Straty mocy i energii w sieciach elektroenergetycznych
5. Rozpływy mocy w systemie elektroenergetycznym



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Plan prezentacji

6. Optymalizacja stanów pracy SEE
7. Zakłócenia w systemach elektroenergetycznych
8. Problematyka przyłączeniowa
9. Stabilność systemu elektroenergetycznego
10. Podstawy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej
11. Jakość energii elektrycznej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Energetyka i elektroenergetyka – historia i teraźniejszość w ujęciu historycznym



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



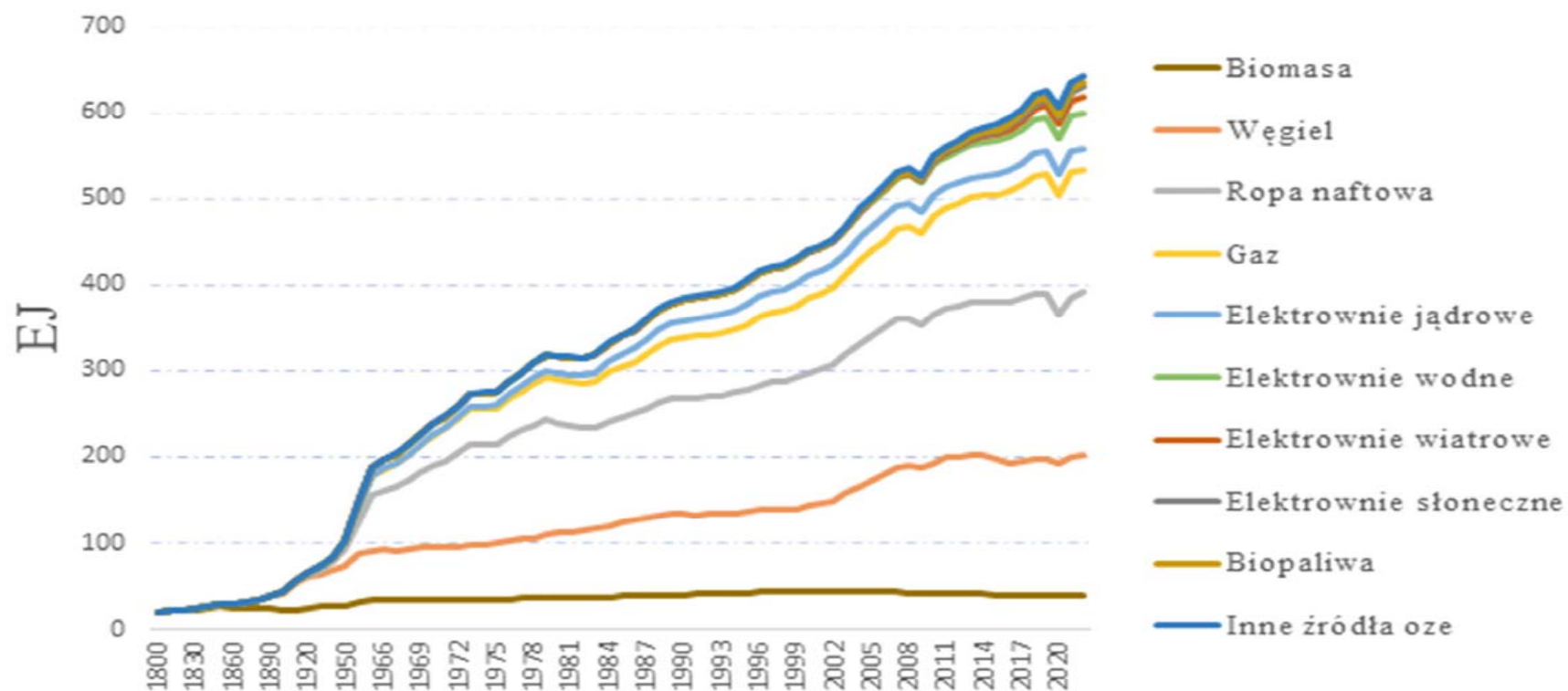
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Świat: globalne zużycie energii pierwotnej wg źródeł



Rys 1. Globalna konsumpcja energii pierwotnej na świecie w latach 1800 – 2022 wg paliw i źródeł [1]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



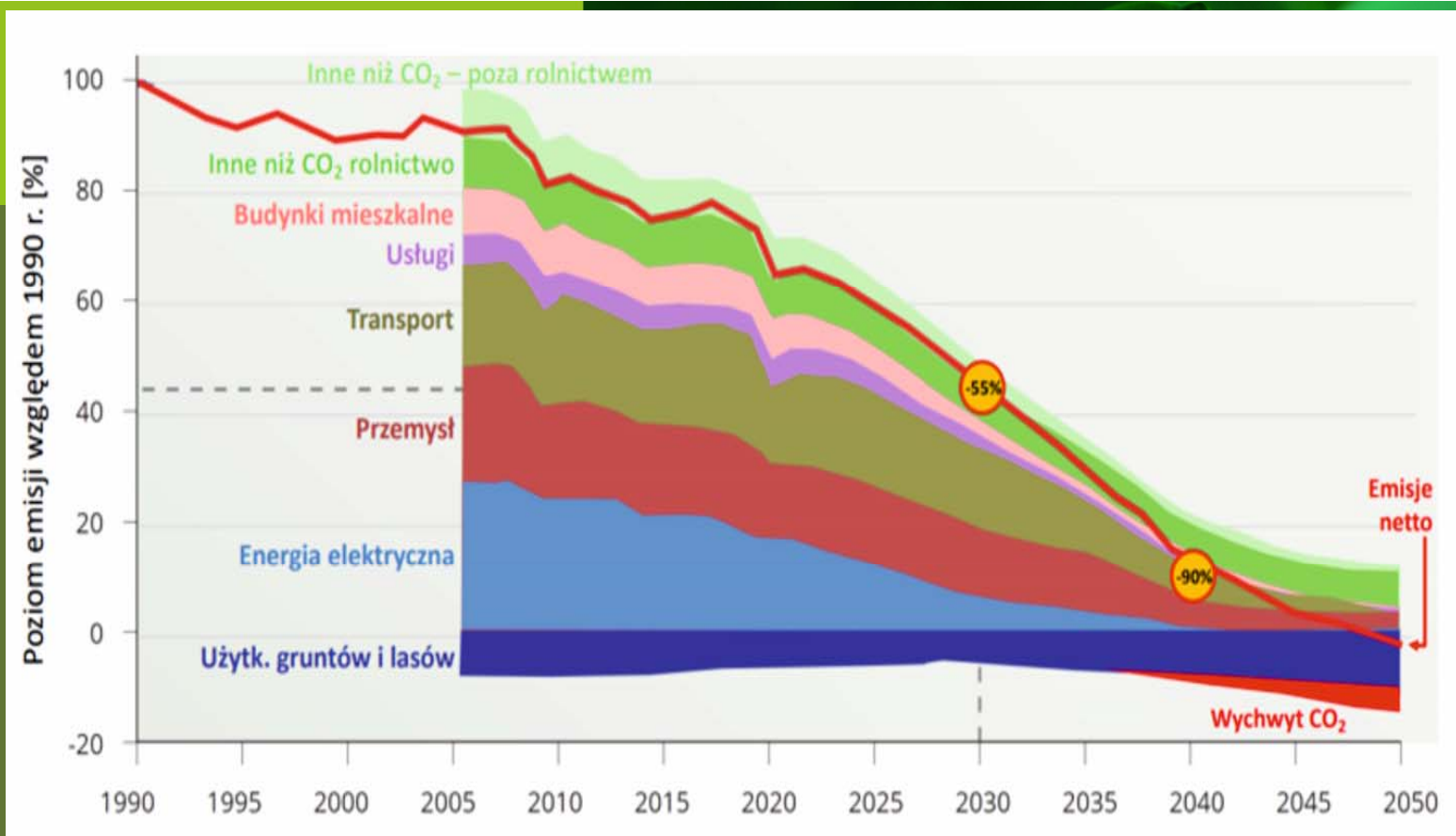
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Europejski Zielony Ład (European Green Deal) to strategia Unii Europejskiej, której celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Zakłada ona przekształcenie UE w obszar zrównoważonego rozwoju, oszczędnego w zasoby, przyjaznego środowisku i sprawiedliwego społecznie. Inicjatywa ta jest odpowiedzią na kryzys klimatyczny i degradację środowiska. Plan zakłada m.in. 55% redukcję emisji gazów cieplarnianych do 2030 r. w porównaniu z 1990 r. Zielony Ład obejmuje także sektory takie jak rolnictwo, gdzie planowane są ograniczenia emisji metanu z hodowli zwierząt. Redukcja emisji ma być równoważona poprzez pochłanianie CO₂ przez uprawy i zastosowanie technologii wychwytu tego gazu.



Rys 2. Plany przejścia krajów Unii Europejskiej do gospodarki zeroemisyjnej do 2050 r.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Elektrownie ciepłe

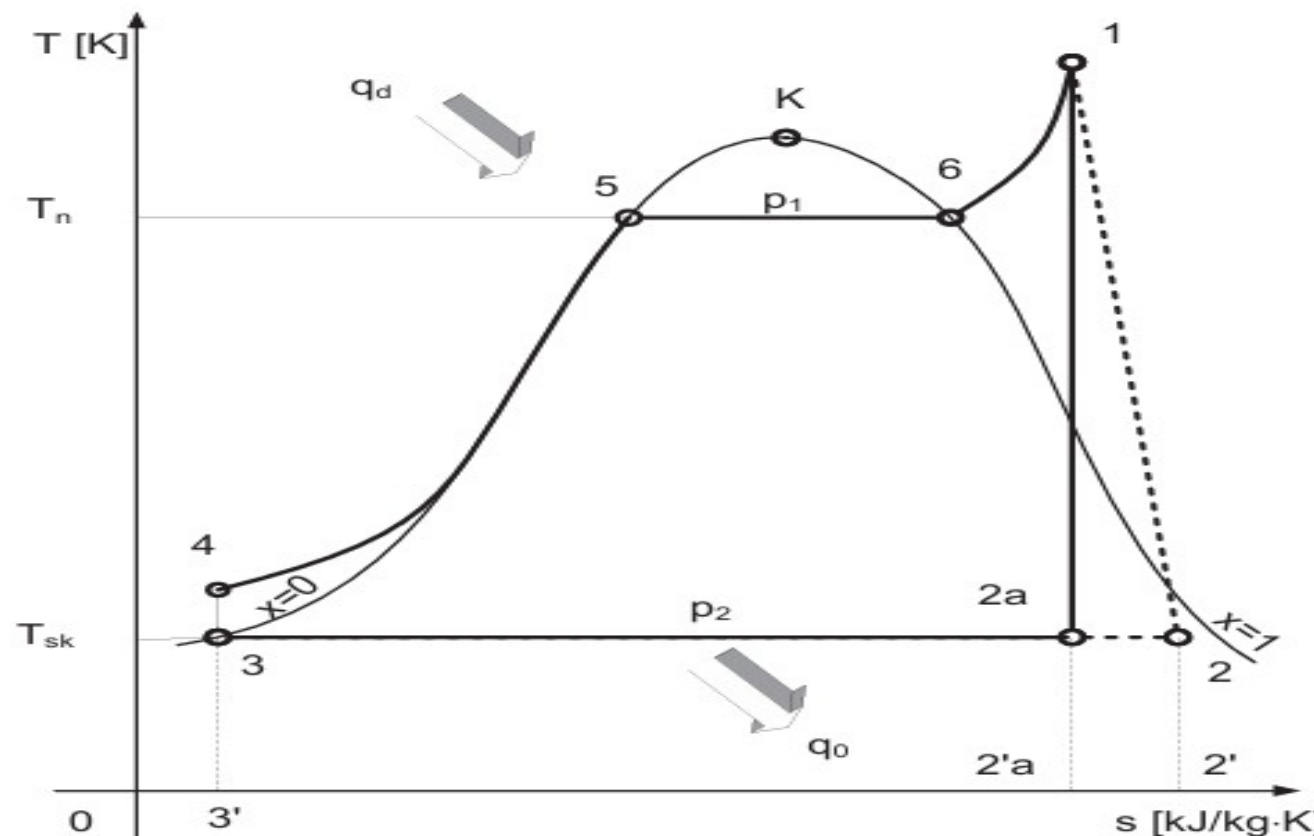


POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Podstawowym wskaźnikiem określającym efektywność procesu produkcji energii elektrycznej jest jego sprawność, czyli stosunek energii elektrycznej uzyskanej z określonej ilości paliwa, do całkowitej ilości energii w tym paliwie zawartej. Teoretycznym obiegiem termodynamicznym klasycznej elektrowni parowej jest obieg Rankine'a. Rzeczywiste obiegi termodynamiczne są jego modyfikacjami, które stosuje się w celu powiększenia sprawności procesu. Q_d oznacza energię cieplną wprowadzoną do obiegu, a Q_o ciepło z niego odebrane. Pole 3-4-5-6-1-2a-3 oznacza ciepło zamienione na pracę.



Rys 3. Obieg Rankine’a elektrowni parowej kondensacyjnej w układzie T-S (temperatura – entropia) [2]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



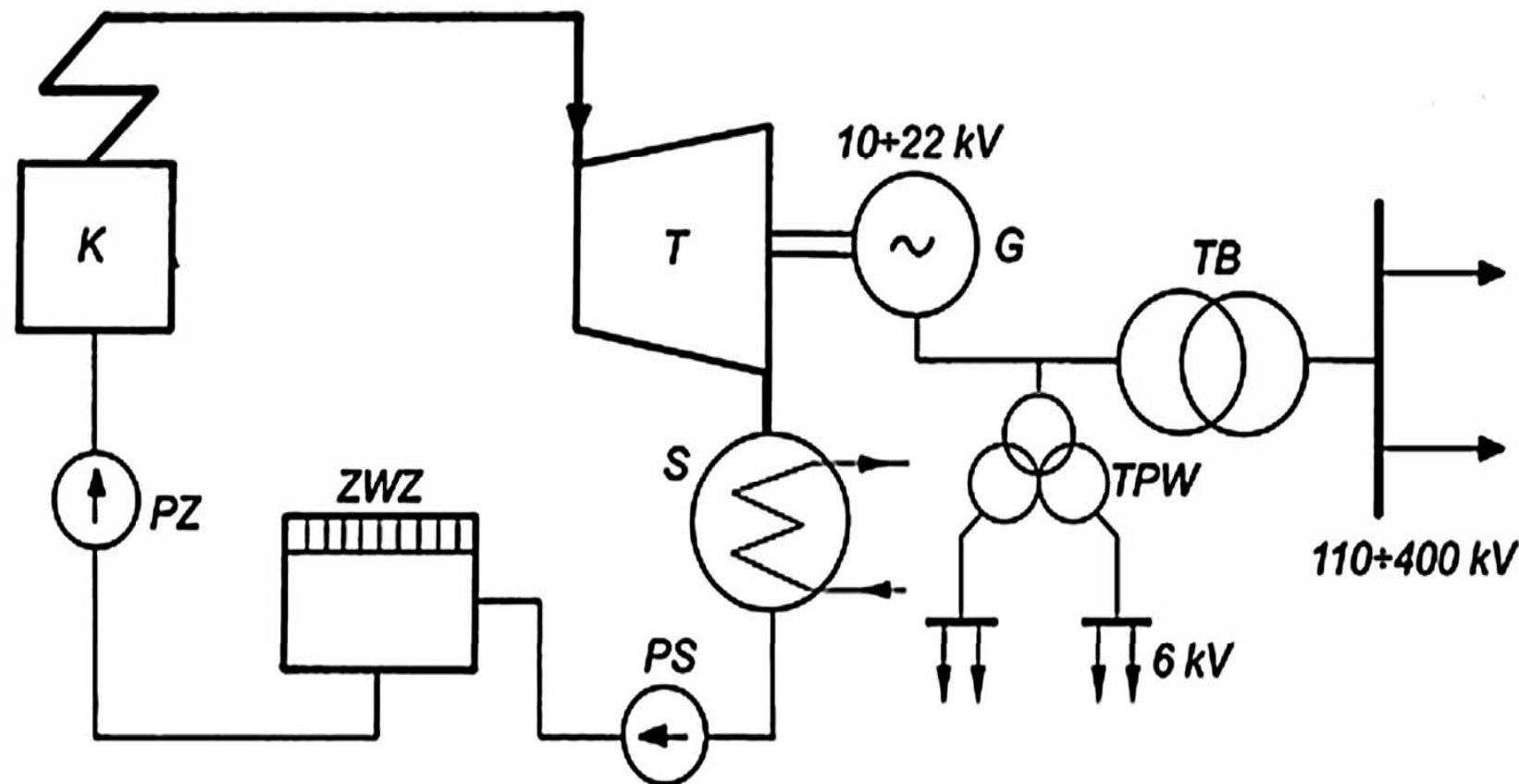
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

K – kocioł parowy z
przegrzewaczem pary;
T – turbina parowa;
S – skraplacz pary;
PS – pompa skroplin;
ZWZ – zbiornik wody
zasilającej;
PZ – pompa zasilająca kocioł;
G – generator;
TB – transformator blokowy;
TPW – transformator potrzeb
własnych (odczepowy).



Rys 4. Uproszczony schemat bloku elektrowni parowej [2]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

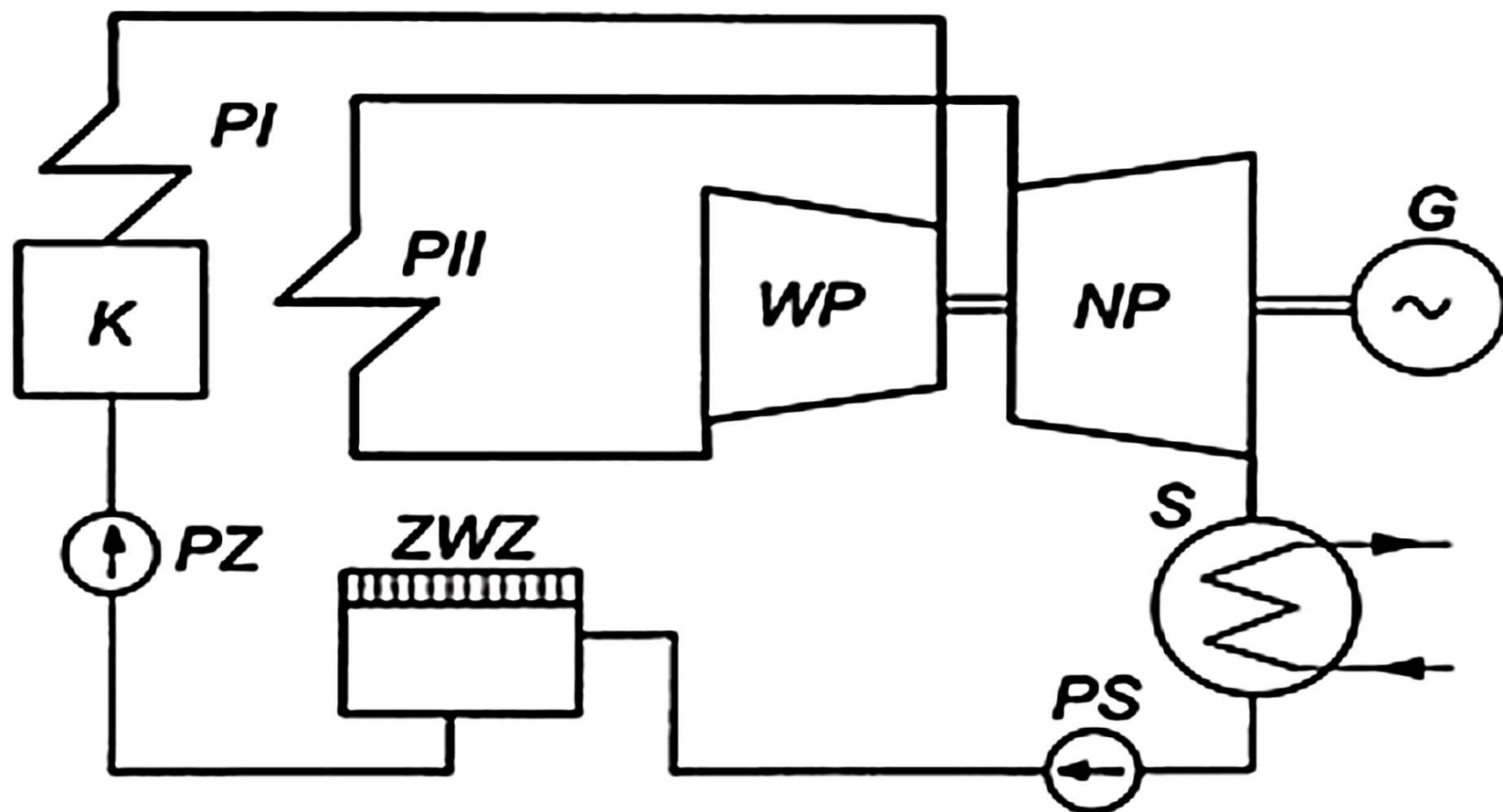


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 5. Uproszczony schemat bloku z międzystopniowym przegrzewaniem pary [2]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Podstawą działania turbin gazowych jest obieg Braytona–Joule’a, w którym spalanie paliwa odbywa się przy stałym ciśnieniu. Najprostszy układ (Rys. 6a) składa się ze:

- sprężarki (S);
- komory spalania (KS);
- turbiny (T);
- generatora (G).

Sprężarka zasysa powietrze i wtłacza je do KS, gdzie następuje spalanie z paliwem. Gazy spalinowe napędzają turbinę, która napędza zarówno generator, jak i sprężarkę. W układach zamkniętych (Rys. 6d) czynnik roboczy krąży w obiegu, a spalanie paliwa odbywa się poza turbiną – ciepło przekazywane jest przez nagrzewnicę. Pozwala to spalać paliwa stałe bez ryzyka erozji łopatek. Sprawność turbiny rośnie teoretycznie wraz ze stopniem sprężenia, ale w rzeczywistości istnieje wartość optymalna. Efektywność zwiększa się dzięki regeneracyjnemu podgrzewaniu powietrza (Rys. 6c), wielostopniowemu sprężaniu i rozprężaniu z chłodzeniem i regeneracją ciepła. Układy z podziałem na jednostki jednowałowe (Rys. 6b) są bardziej zwarte i dyspozycyjne niż rozwiązania wielowałowe, które choć technicznie zaawansowane są dziś wypierane ze względu na złożoność i długi czas uruchamiania.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

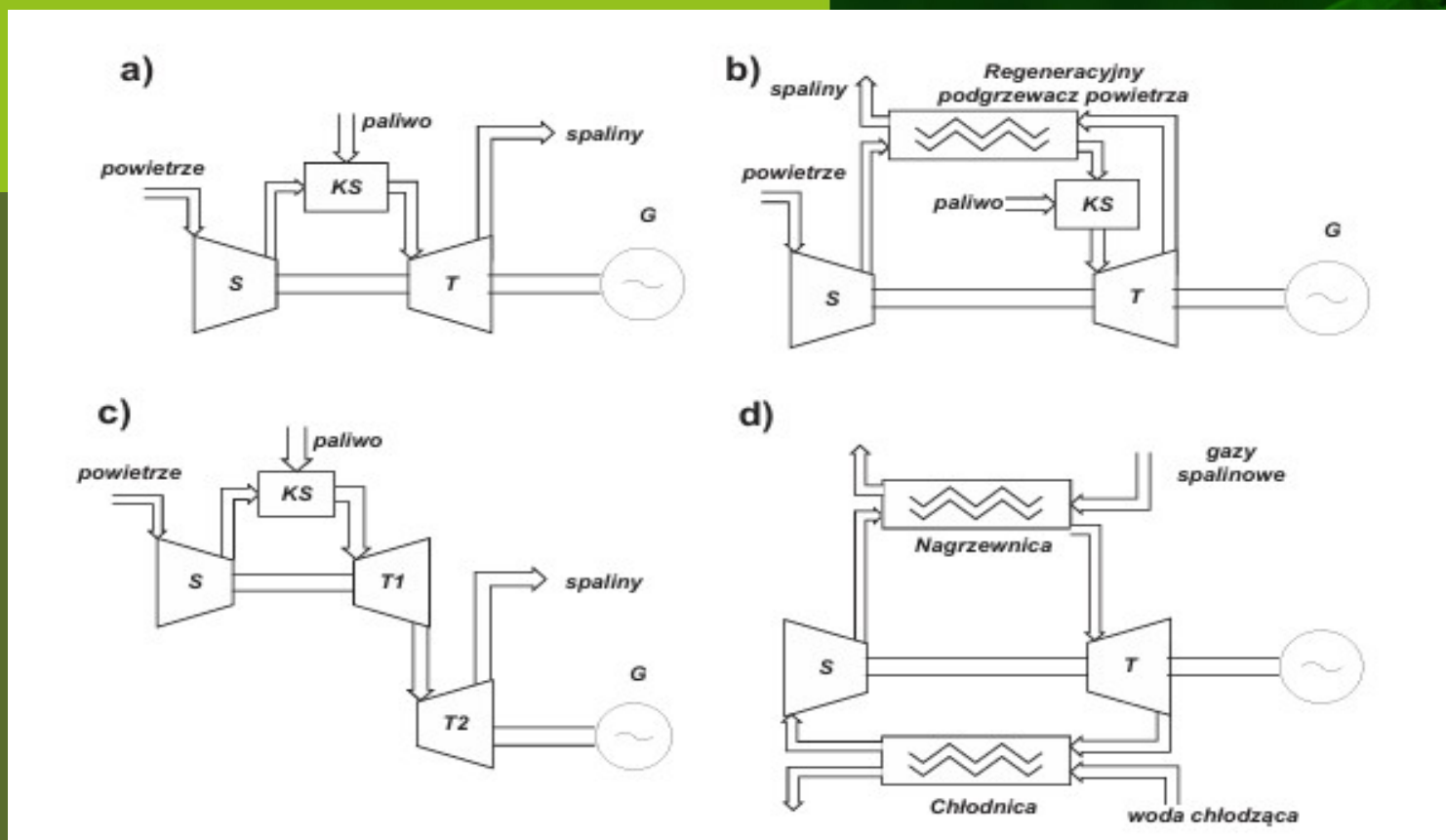


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 6. Układy turbin gazowych: a) układ otwarty, b) obieg otwarty z regeneracją, c) turbina dwuwałowa, d) turbina z obiegiem zamkniętym



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

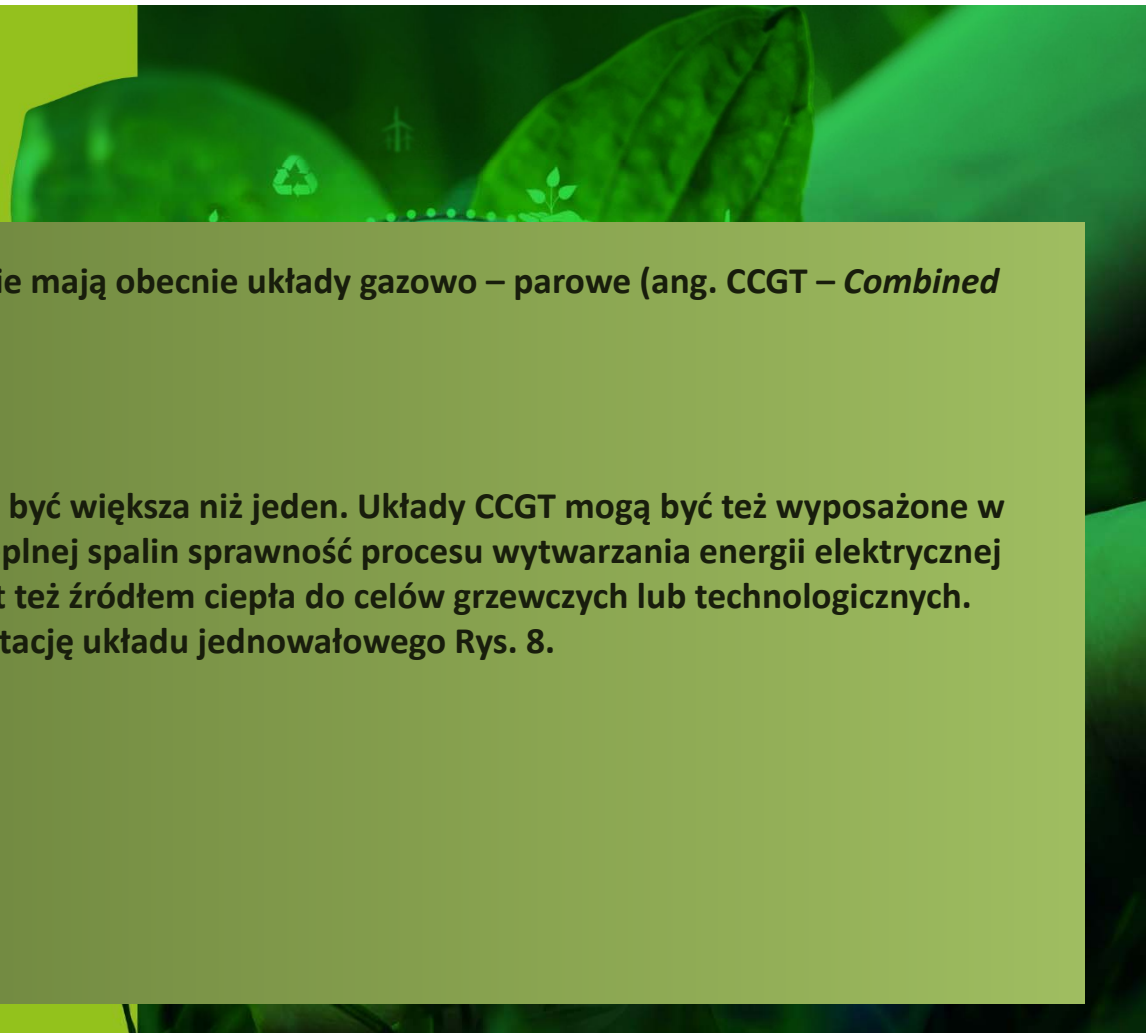


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



W układach kogeneracyjnych dużej mocy szerokie zastosowanie mają obecnie układy gazowo – parowe (ang. CCGT – *Combined Cycle Gas Turbine*). Układy CCGT mogą być budowane jako:

- jednostki jednowałowe (obie jednostki na jednym wale) ;
- jednostki dwuwałowe (turbiny na osobnych wałach).

Liczba turbin gazowych zasilających kocioł odzysknicowy może być większa niż jeden. Układy CCGT mogą być też wyposażone w jeden lub dwa generatory. W wyniku wykorzystania energii cieplnej spalin sprawność procesu wytwarzania energii elektrycznej znacząco rośnie, nawet powyżej 55%. Kocioł odzysknicowy jest też źródłem ciepła do celów grzewczych lub technologicznych. Schemat układu CCGT przedstawia Rys. 7, a poglądową prezentację układu jednowałowego Rys. 8.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

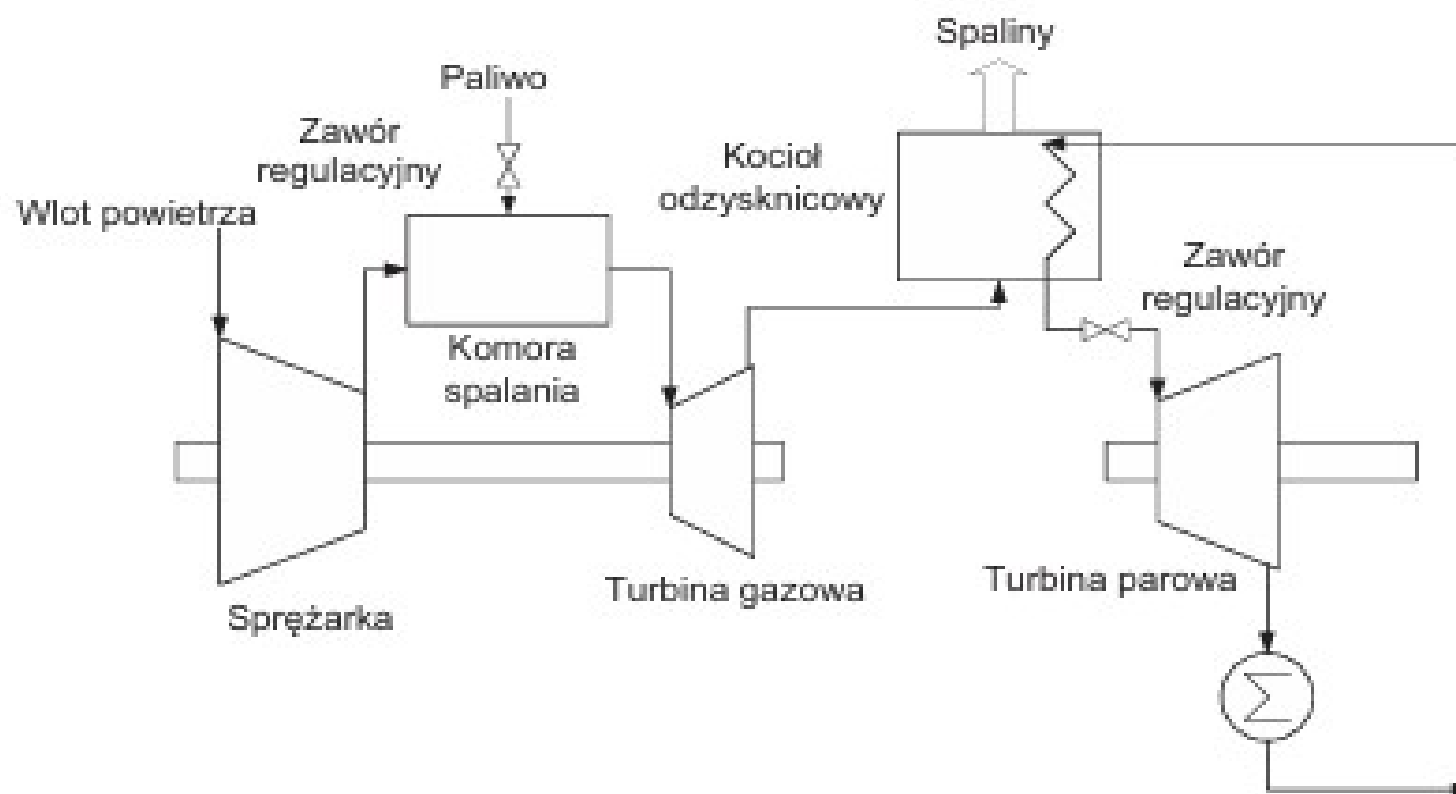


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 7. Przykładowy schemat układu gazowo - parowego



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

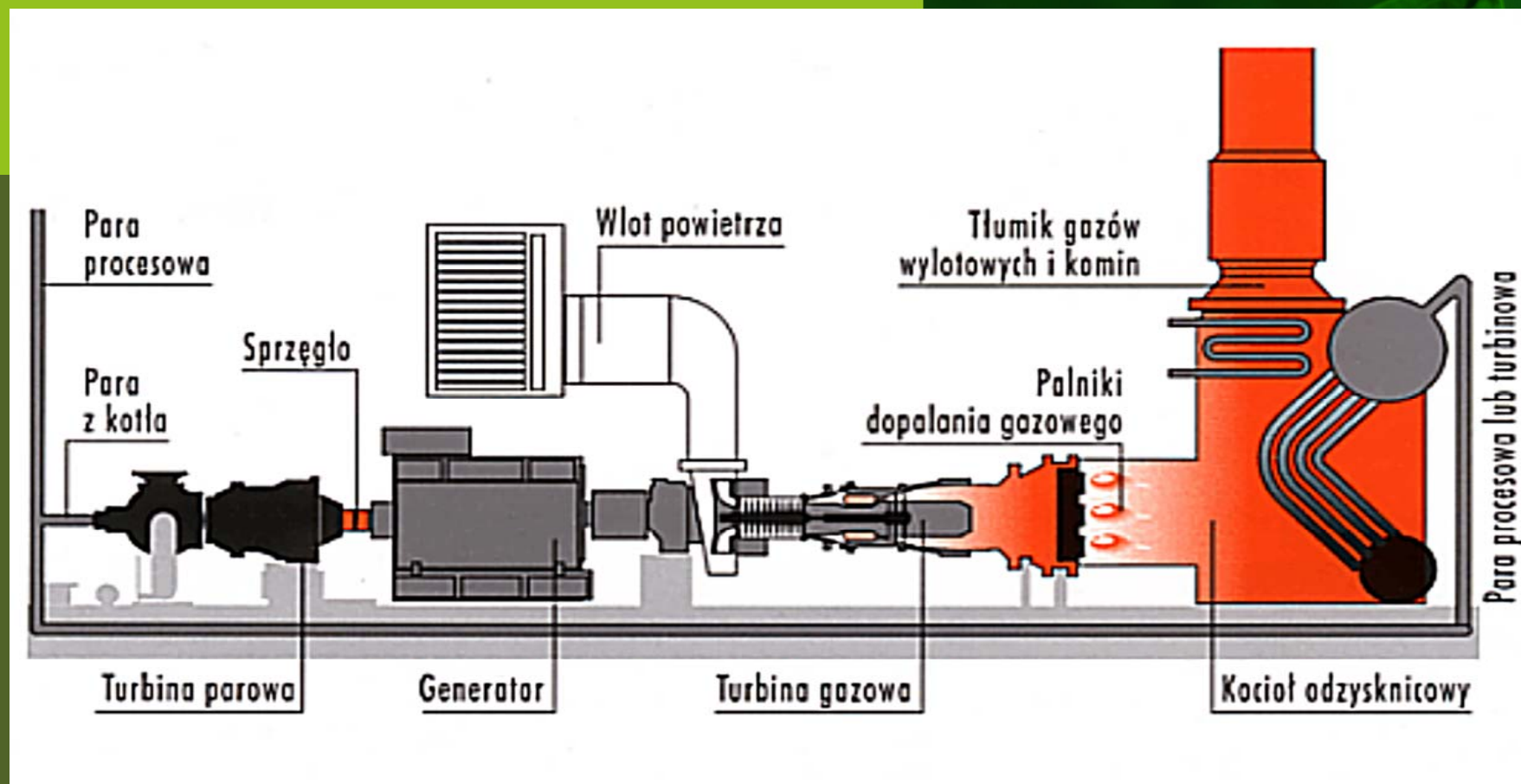


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 8. Przykład układu gazowo – parowego małej mocy [3]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

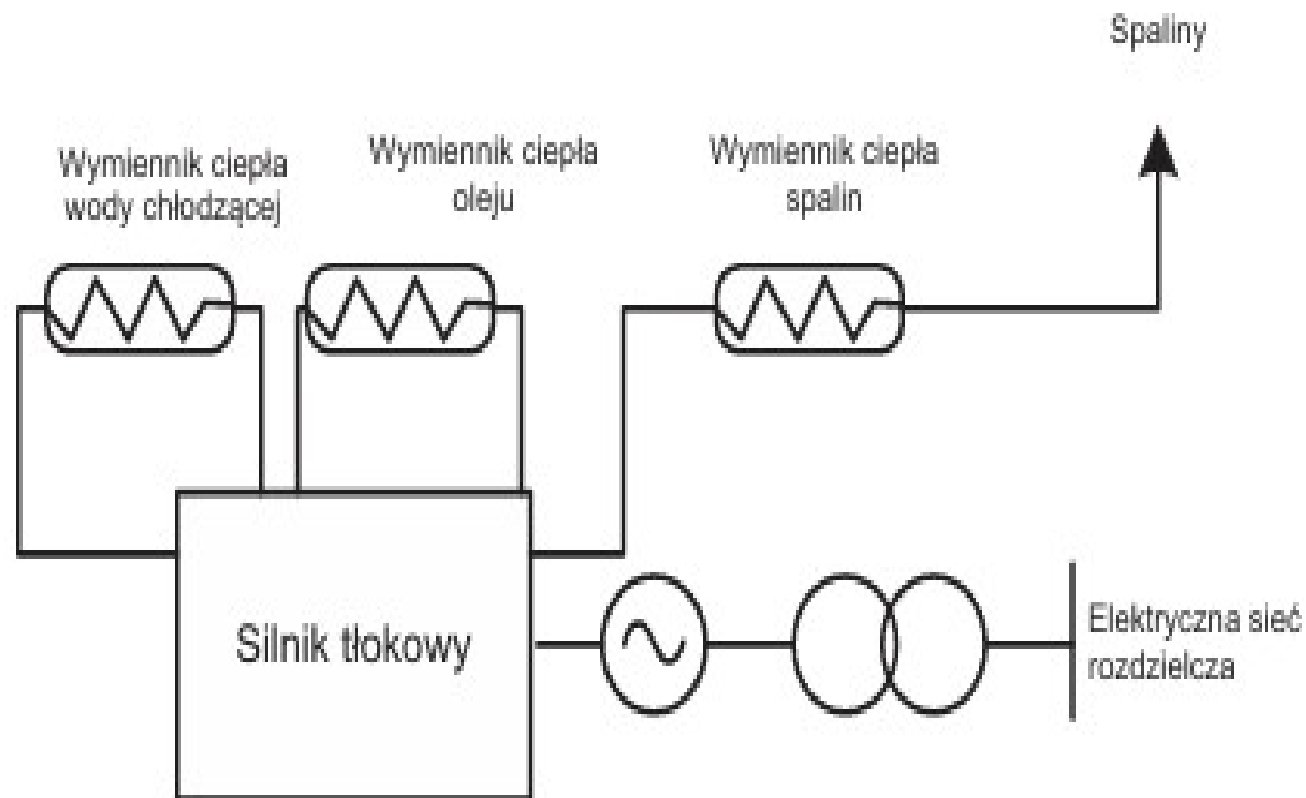
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Silniki tłokowe układów kogeneracyjnych budowane są jako jednostki pracujące ze stałą prędkością obrotową, która dla mniejszych jednostek wynosi 1000 i 1500 obr./min, a dla jednostek o mocy kilku megawatów i większych jako jednostki wolnoobrotowe pracujące z prędkością rzędu 500-750 obr./min. W układach kogeneracyjnych z silnikami tłokowymi istnieje kilka możliwości odbioru ciepła co przedstawia Rys. 9 oraz Rys. 10:

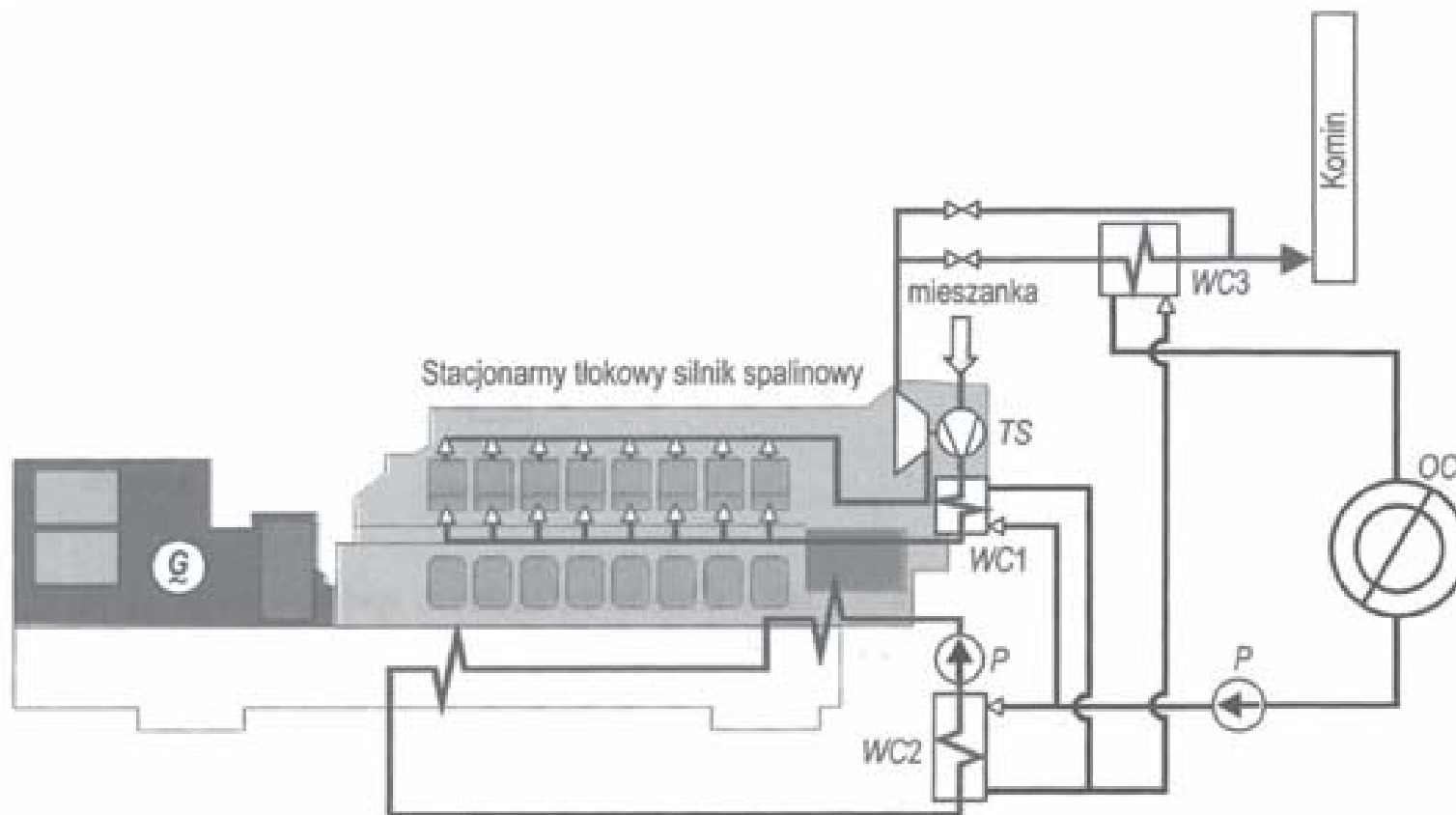
- z obiegu wody chłodzącej;
- z obiegu oleju smarowego;
- poprzez chłodzenie mieszanki doładowanej z turbosprężarką;
- ze spalin wylotowych.



Rys 9. Idea budowy układu kogeneracyjnego z silnikiem tłokowym



G – generator;
P – pompa;
TS – turbosprężarka;
OC – wymiennik ciepła;
WC1 – wymiennik ciepła chłodzenia powietrza doładowania;
WC2 – wymiennik ciepła chłodzenia płaszcza wodnego i miski olejowej;
WC3 – spalinowy podgrzewacz wody.



Rys 10. Układ CHP z tłokowym silnikiem spalinowym [4]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

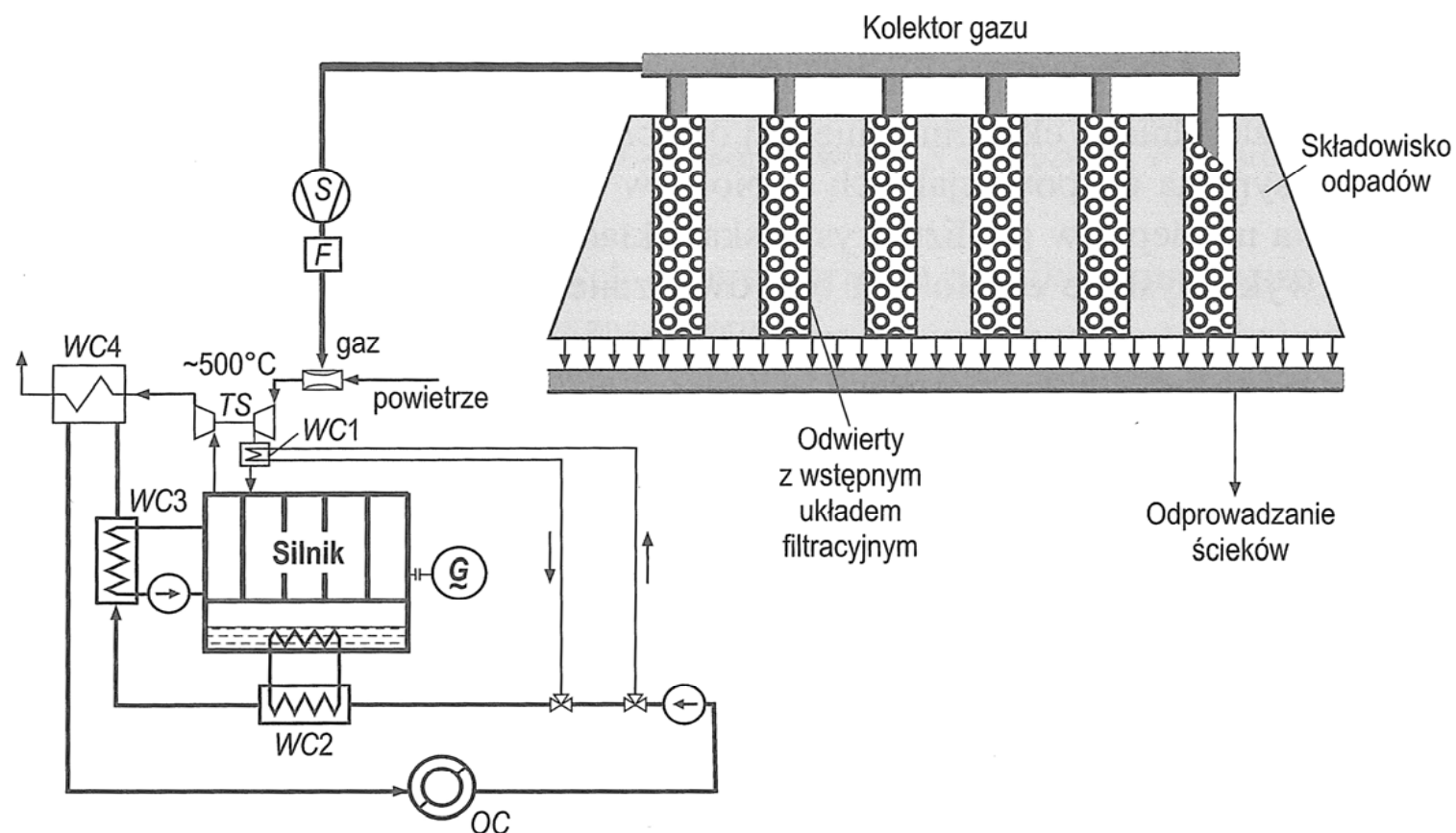
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Roczny potencjał biogazu odpowiada ponad 25% zużycia gazu ziemnego w Polsce (ok. 18 mld m³), więc choć jest to potencjał teoretyczny, to praktyczne wykorzystanie tylko jego niewielkiej części może przynieść wymierne korzyści. Rys. 11 przedstawia układ związany z wykorzystaniem biogazu na wysypiskach i w oczyszczalniach ścieków jako paliwa gazowych silników tłokowych.

WC1, WC2, WC3 – wymienniki układu chłodzenia silnika;
WC4 – wymiennik spalinowy;
TS – turbosprężarka;
OC – odbiór ciepła;
S – sprężarka;
F – filtr gazu.



Rys 11. Schemat elektrociepłowni z silnikiem spalinowym zasilanym gazem wysypiskowym [3]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



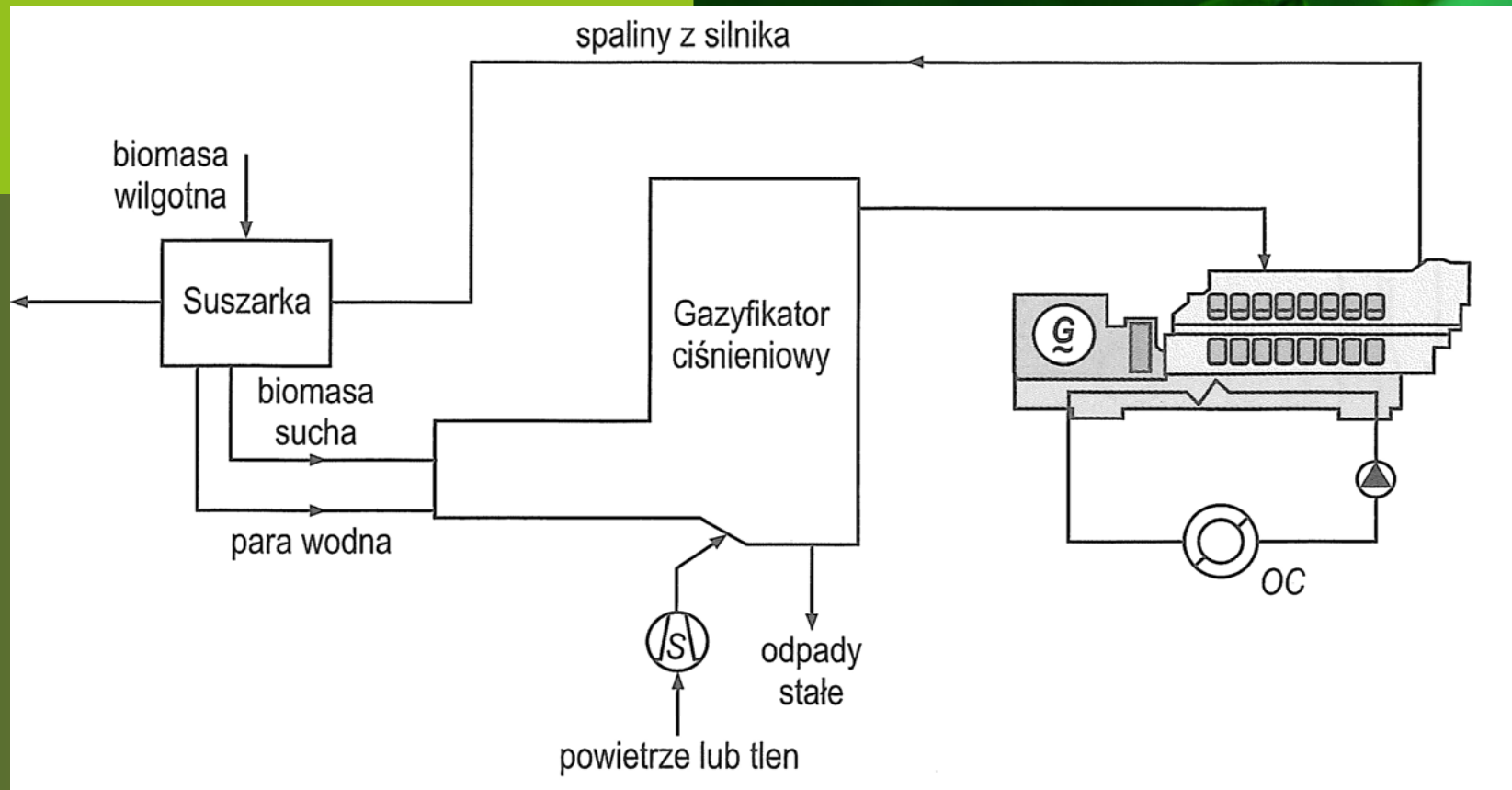
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Biomasa, która w przypadku Polski może być traktowana jako istotne źródło energii odnawialnej, może być także źródłem paliwa dla kogeneracyjnych układów gazowych, po poddaniu jej procesowi zgazowania. Problemem produkcji stabilnego, bezpiecznego dla środowiska i taniego gazu syntezowego podlega jednak wciąż doskonaleniu. Na Rys. 12 przedstawiono przykład układu wykorzystującego proces zgazowania biomasy w gazyfikatorze ciśnieniowym.



Rys 12. Schemat układu z silnikiem spalinowym zintegrowanym ze zgazowaniem biomasy (gazyfikator typu ciśnieniowego) [3]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

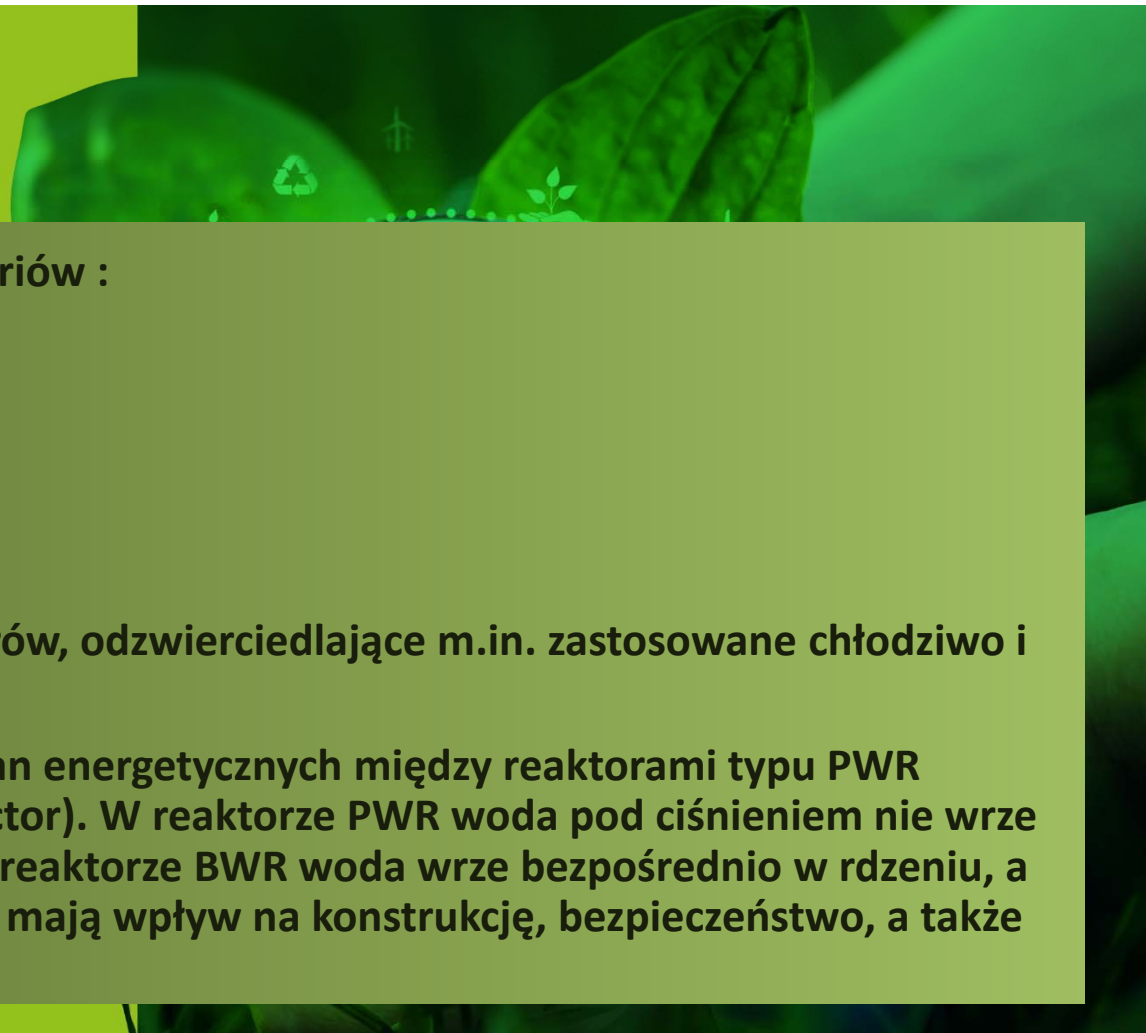


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Reaktory jądrowe klasyfikuje się według różnych kryteriów :

- energii neutronów rozszczepiających,
- konstrukcji rdzenia i paliwa,
- rodzaju moderatora i chłodziwa,
- bilansu materiałów rozszczepialnych.

W praktyce stosuje się angielskie skróty typów reaktorów, odzwierciedlające m.in. zastosowane chłodziwo i moderator (np. PWR, BWR).

Na Rys. 13 przedstawiono różnice w przebiegu przemian energetycznych między reaktorami typu PWR (Pressurized Water Reactor) i BWR (Boiling Water Reactor). W reaktorze PWR woda pod ciśnieniem nie wrze – przekazuje ciepło do wtórnego obiegu parowego. W reaktorze BWR woda wrze bezpośrednio w rdzeniu, a para wodna trafia bezpośrednio do turbiny. Różnice te mają wpływ na konstrukcję, bezpieczeństwo, a także na sposób eksploatacji tych bloków.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

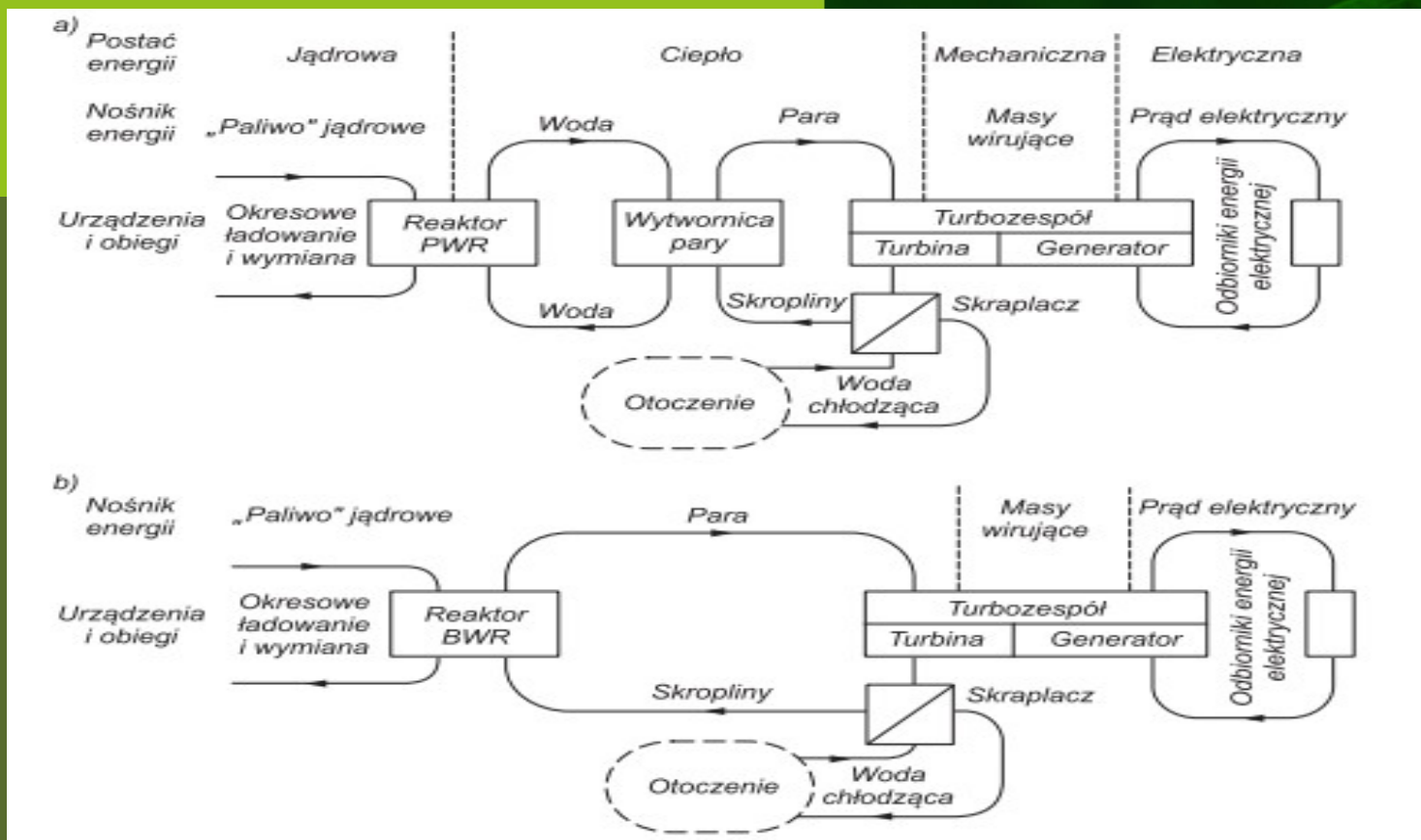


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 13. Schemat przemian energetycznych w elektrowniach jądrowych: a) z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR), b) z reaktorem wrzącym (BWR)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Odnawialne źródła energii



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

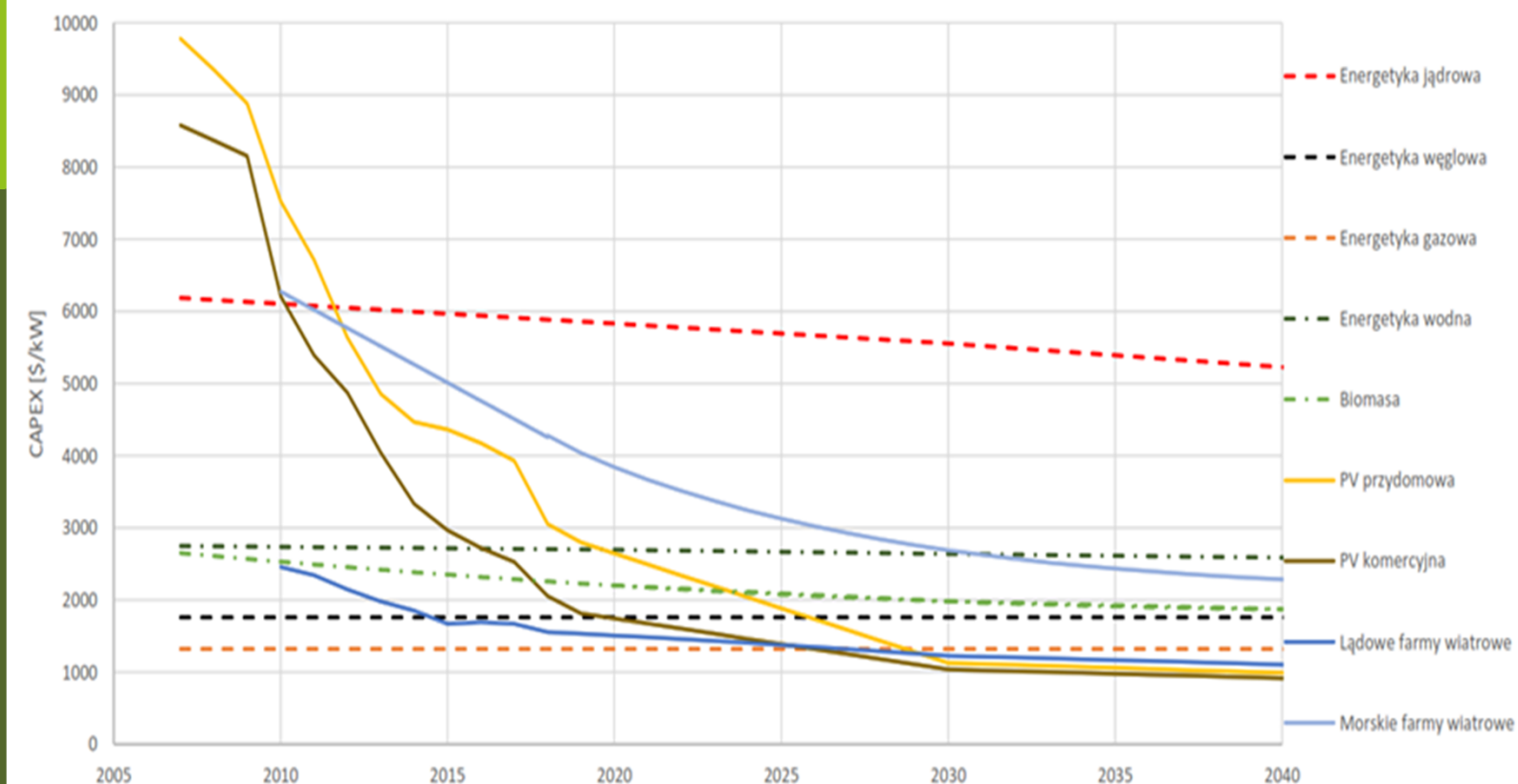


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 14. Zmiany kosztów kapitałowych (CAPEX) różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej według dokumentu PEP2040 [5]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



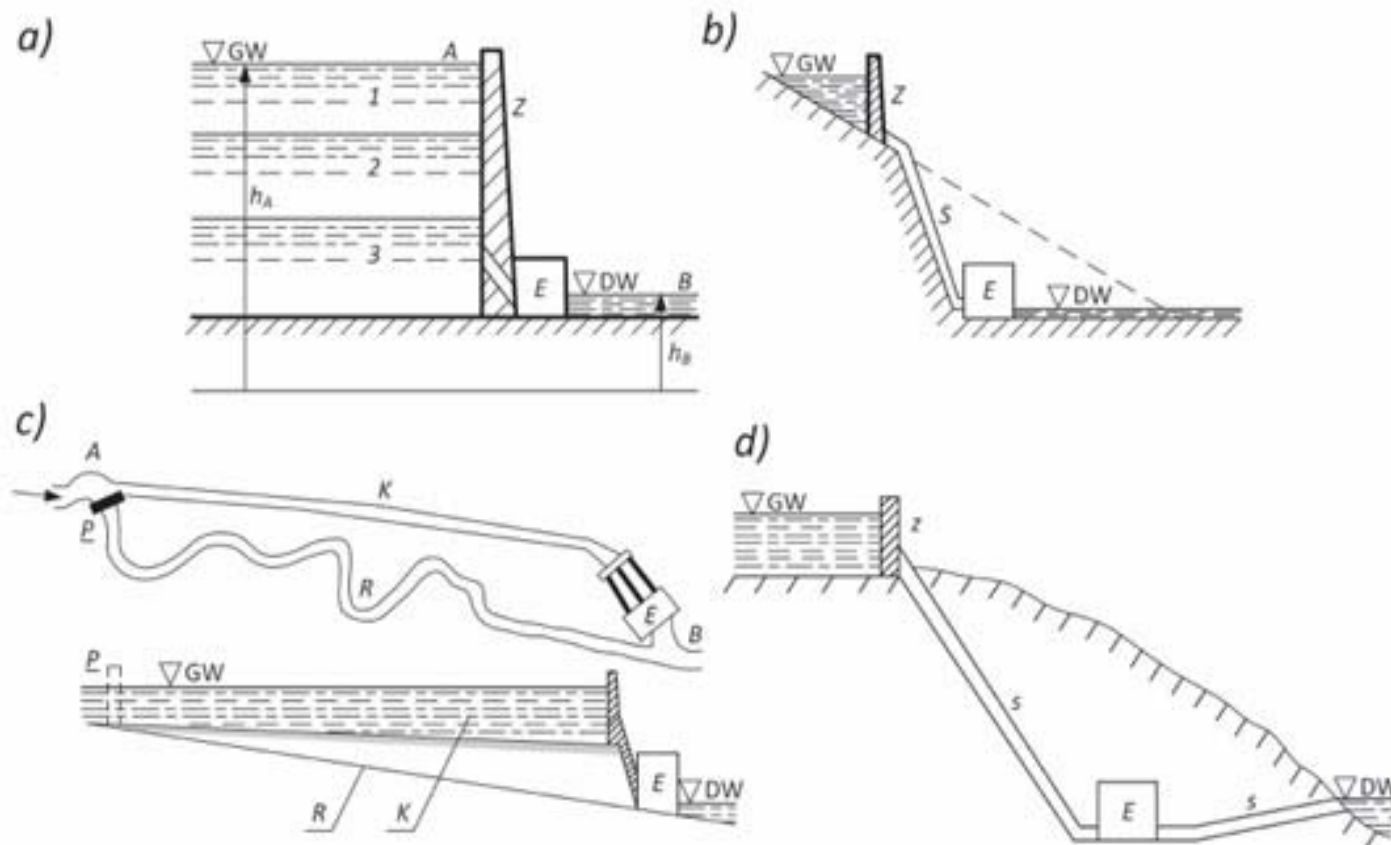
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

E – elektrownia wodna;
K – kanał skracający;
P – przegroda;
R – koryto rzeki;
Z – zapora;
S – sztolnia (derywacja ciśnieniowa);
1 – warstwa retencyjna;
2 – warstwa energetyczna;
3 – warstwa martwa;
DW – dolna woda;
GW – górna woda.



Rys 15. Sposoby koncentracji spadku rzeki



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

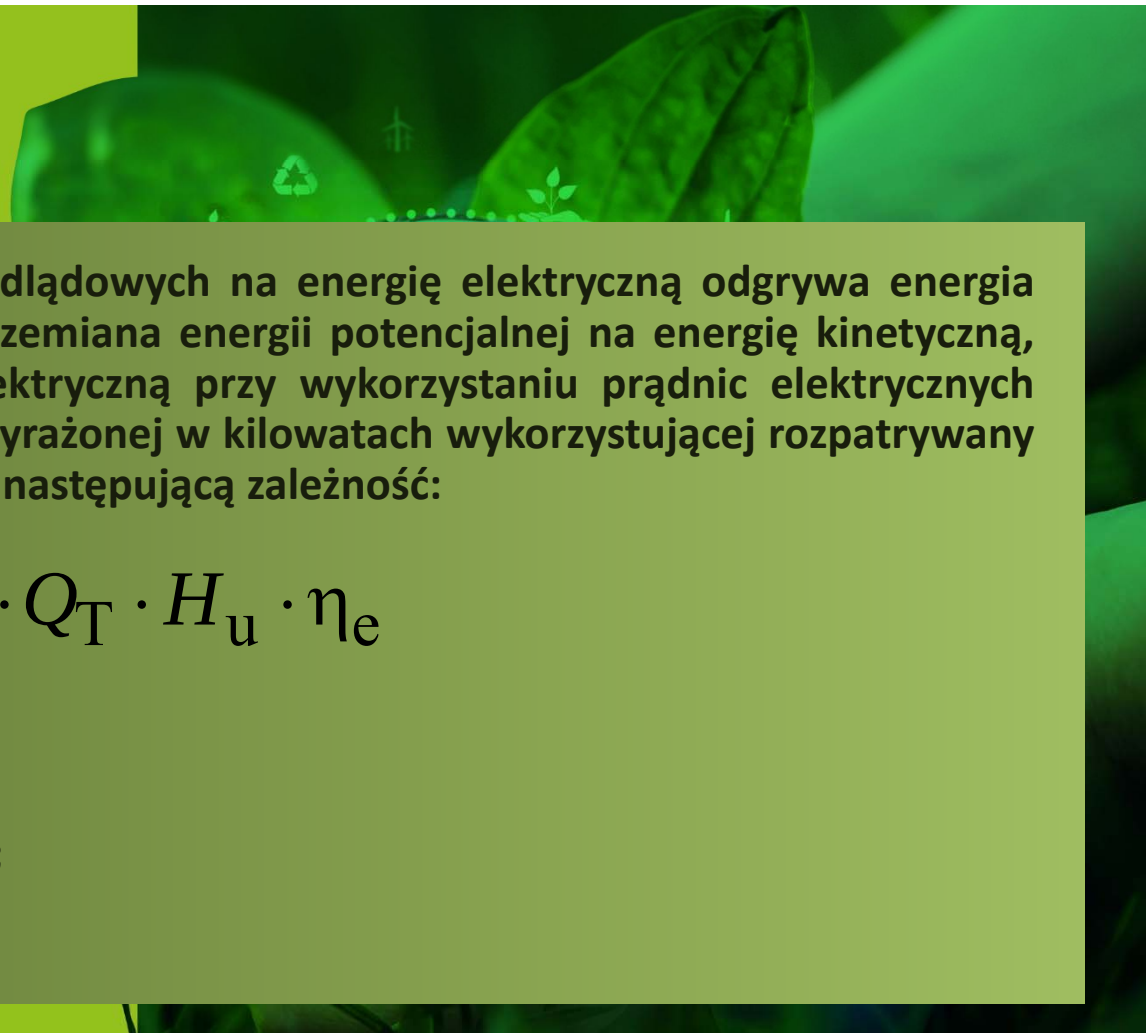


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Podstawową rolą w przemianie energii wód śródlądowych na energię elektryczną odgrywa energia potencjalna. W turbinach wodnych następuje przemiana energii potencjalnej na energię kinetyczną, która następnie jest zamieniana na energię elektryczną przy wykorzystaniu prądnic elektrycznych (hydrogeneratorów). Moc P elektrowni wodnej wyrażonej w kilowatach wykorzystującej rozpatrywany odcinek cieku wodnego może być wyrażona przez następującą zależność:

$$P_T = 9,81 \cdot Q_T \cdot H_u \cdot \eta_e$$

Gdzie:

Q_T – jest to przeływ turbiny wyrażony w m^3/s ;

H_u – oznacza spad użyteczny wyrażony w metrach;

η_e – oznacza sprawność elektrowni.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

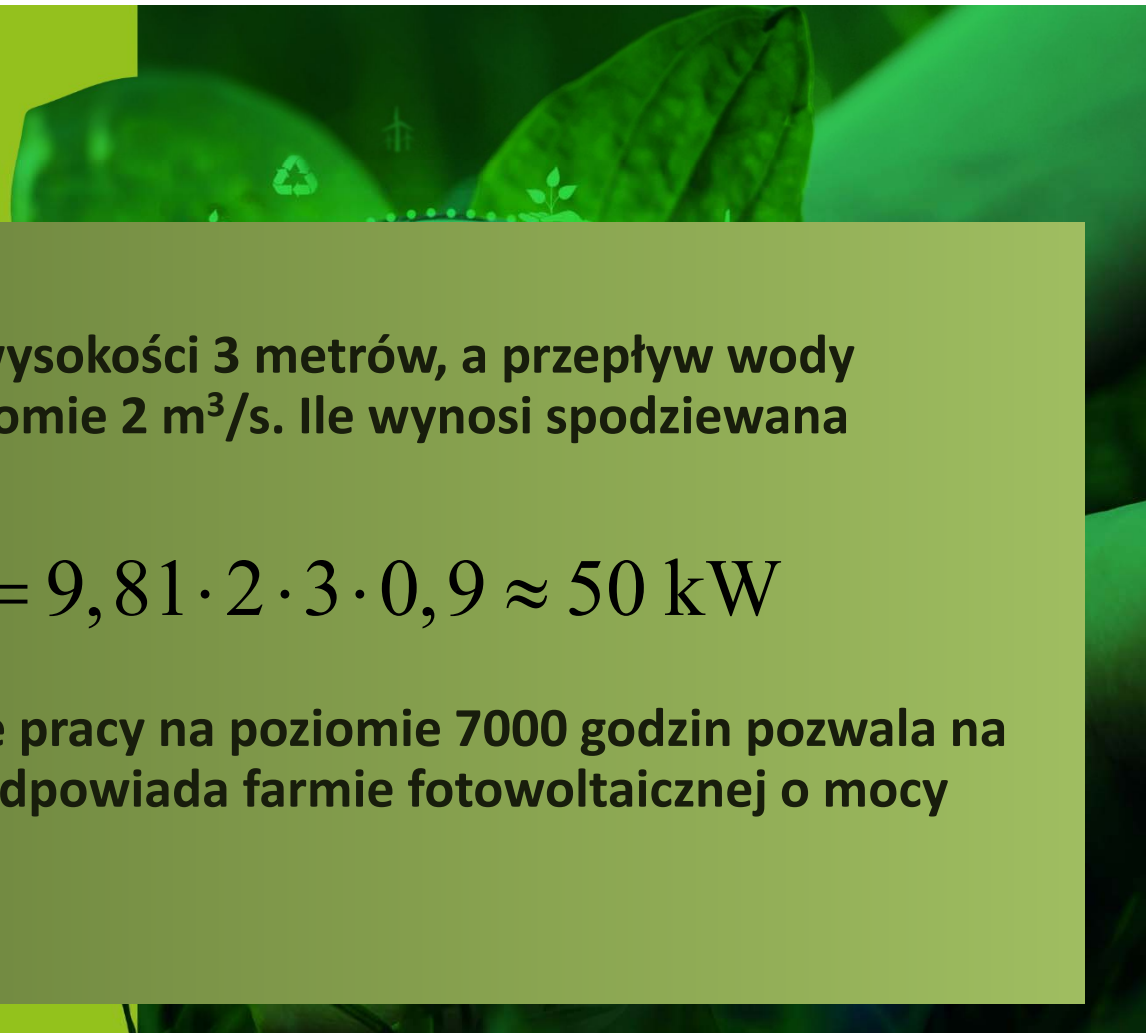


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Przykład 1.

Na cieku wodnym zbudowano spiętrzenie o wysokości 3 metrów, a przepływ wody umożliwia uzyskanie przepływu turbiny na poziomie $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Ile wynosi spodziewana wartość mocy turbiny?

$$P_T = 9,81 \cdot Q_T \cdot H_u \cdot \eta_e = 9,81 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 0,9 \approx 50 \text{ kW}$$

Jest to niewielka moc, ale przy rocznym czasie pracy na poziomie 7000 godzin pozwala na uzyskanie 370 MWh energii elektrycznej, co odpowiada farmie fotowoltaicznej o mocy 400 kW.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



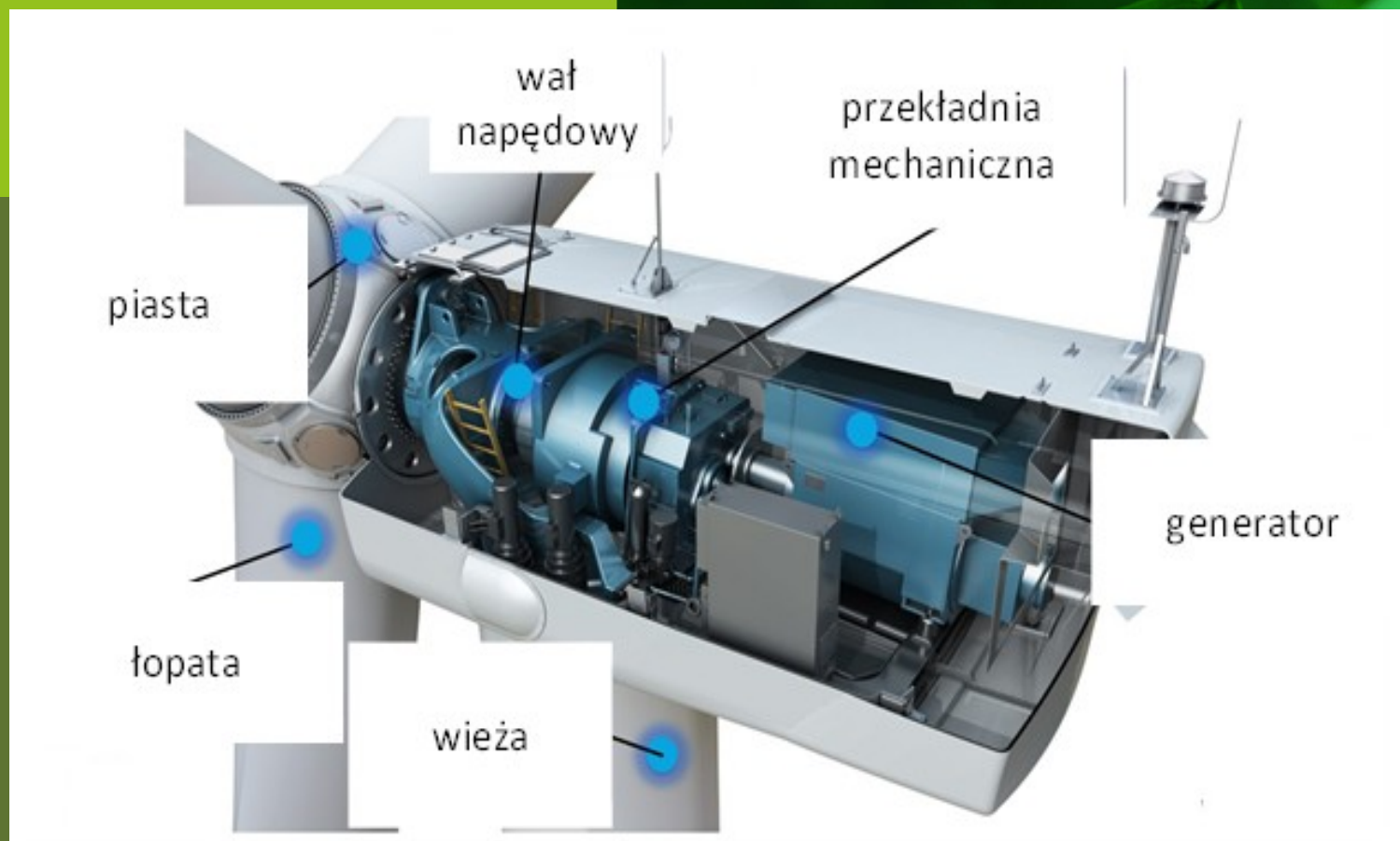
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Elektrownia wiatrowa jest źródłem energii wykorzystującym naturalny ruch przemieszczających się mas powietrza związany z różnicą ciśnienia atmosferycznego. Elektrownie wytwarzają energię elektryczną w generatorach napędzanych za pomocą turbin wiatrowych. Obecnie turbiny wiatrowe przeznaczone dla energetyki na lądzie mają moce rzędu 2-6 MW. Moce siłowni stosowanych na morzach osiągają wartość rzędu 15 MW. Główne elementy typowej turbiny wiatrowej o mocy około 3 MW przedstawiono na Rys. 16.



Rys 16. Ogólny widok gondoli wiatraka o mocy 3 MW [6]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Moc użyteczna pobierana od strumienia wiatru wynika z różnicy energii kinetycznej przed i za wirnikiem turbiny. Przy optymalnym wykorzystaniu energii wiatru teoretyczna moc użyteczna turbiny jest określona wzorem:

$$P_{\max} = \frac{2\pi}{27} D^2 \rho v^3$$

Gdzie:

D – średnica turbiny wiatrowej;

ρ - gęstość powietrza;

v - prędkość wiatru.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 2.

Turbina wiatrowa o długości łopaty wynoszącej 50 m pracuje przy prędkości wiatru wynoszącej 6,5 m/s (typowa wartość dla terenów w centrum Polski). Należy określić moc turbiny dla tych warunków oraz po wzroście prędkości wiatru do 12 m/s.

- dla 6,5 m/s

$$P_{\max} = \frac{2\pi}{27} D^2 \rho v^3 = \frac{2\pi}{27} \cdot 100^2 \cdot 1,3 \cdot 6,5^3 = 0,83 \text{ MW}$$

- dla 12 m/s

$$P_{\max} = \frac{2\pi}{27} D^2 \rho v^3 = \frac{2\pi}{27} \cdot 100^2 \cdot 1,3 \cdot 12^3 = 5,2 \text{ MW}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



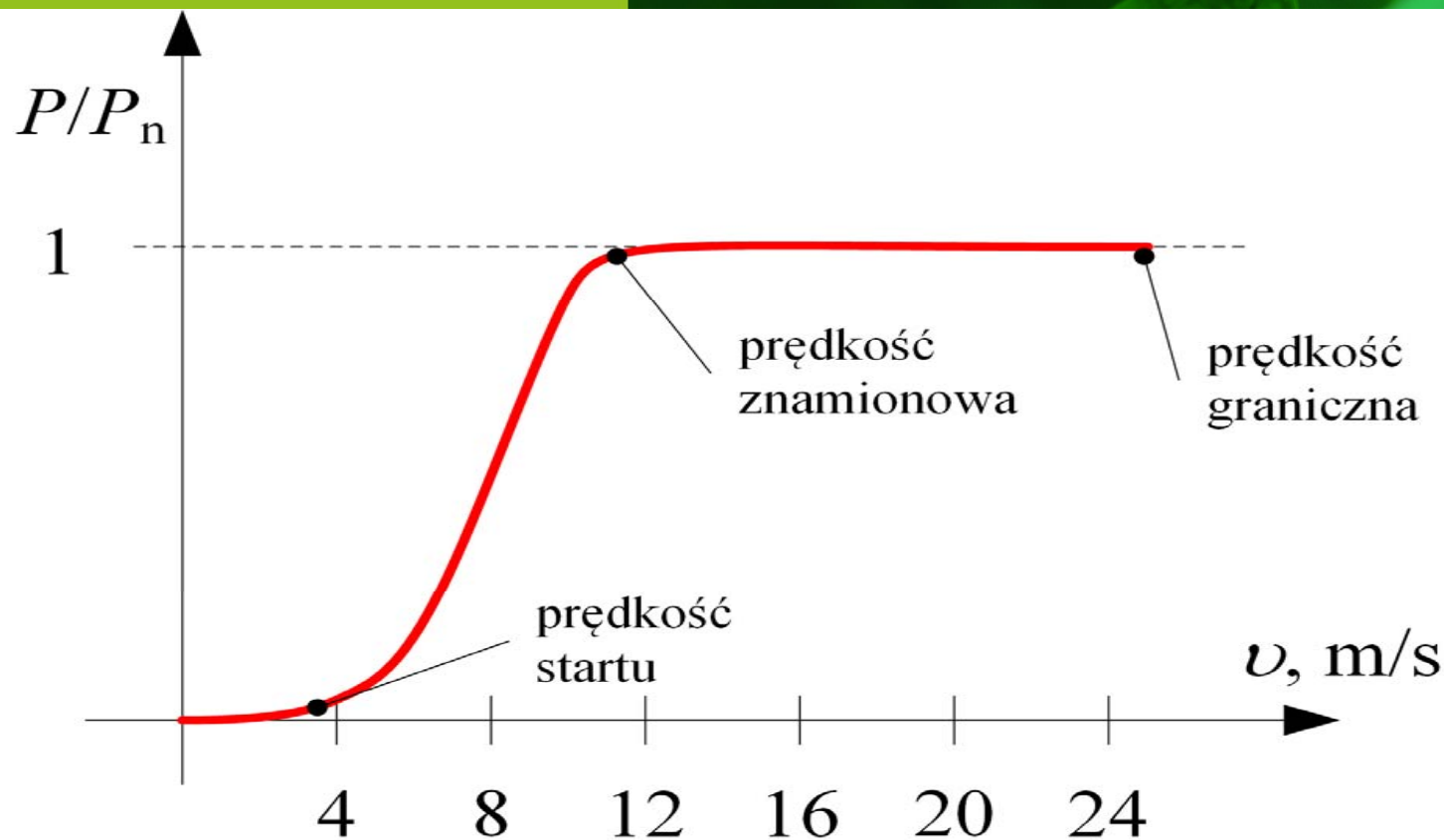
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W praktyce moc turbiny opisana jest za pomocą charakterystyki nieliniowej przedstawionej na Rys. 17. Charakterystyczne punkty krzywej mocy turbiny to punkt startu (ok. 3 m/s), jest to minimalna prędkość, przy której turbina może podjąć pracę. Punkt osiągnięcia mocy znamionowej to ok. 12 m/s. Powyżej tej prędkości moc turbiny jest ograniczana poprzez sterowanie turbiną i prędkość graniczną wynoszącą ok. 25 m/s, powyżej której turbina jest wyłączana, a łopaty są ustawiane w sposób zapobiegający uszkodzeniu jednostki.



Rys 17. Charakterystyka współczesnej turbiny wiatrowej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

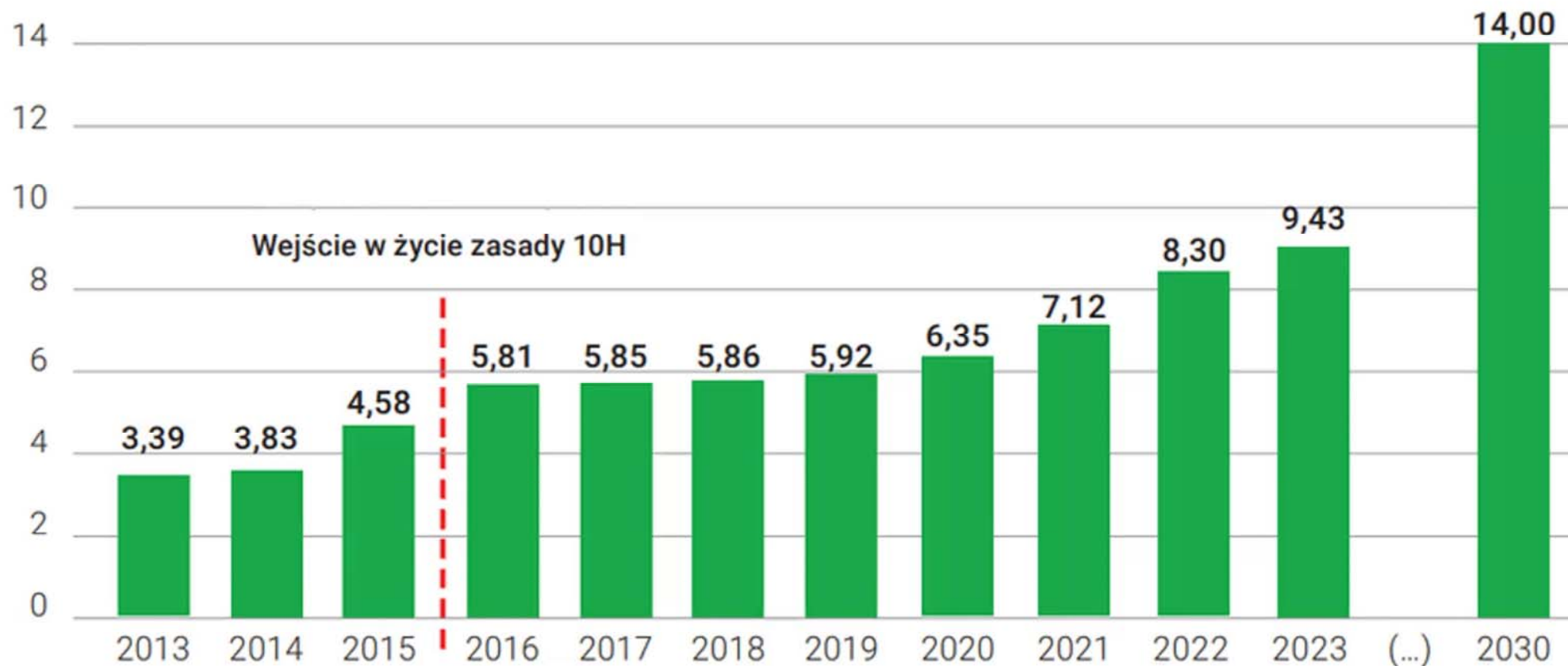


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 18. Dynamika zmian mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych w Polsce, dane historyczne i jedna z prognoz na rok 2030 [5]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

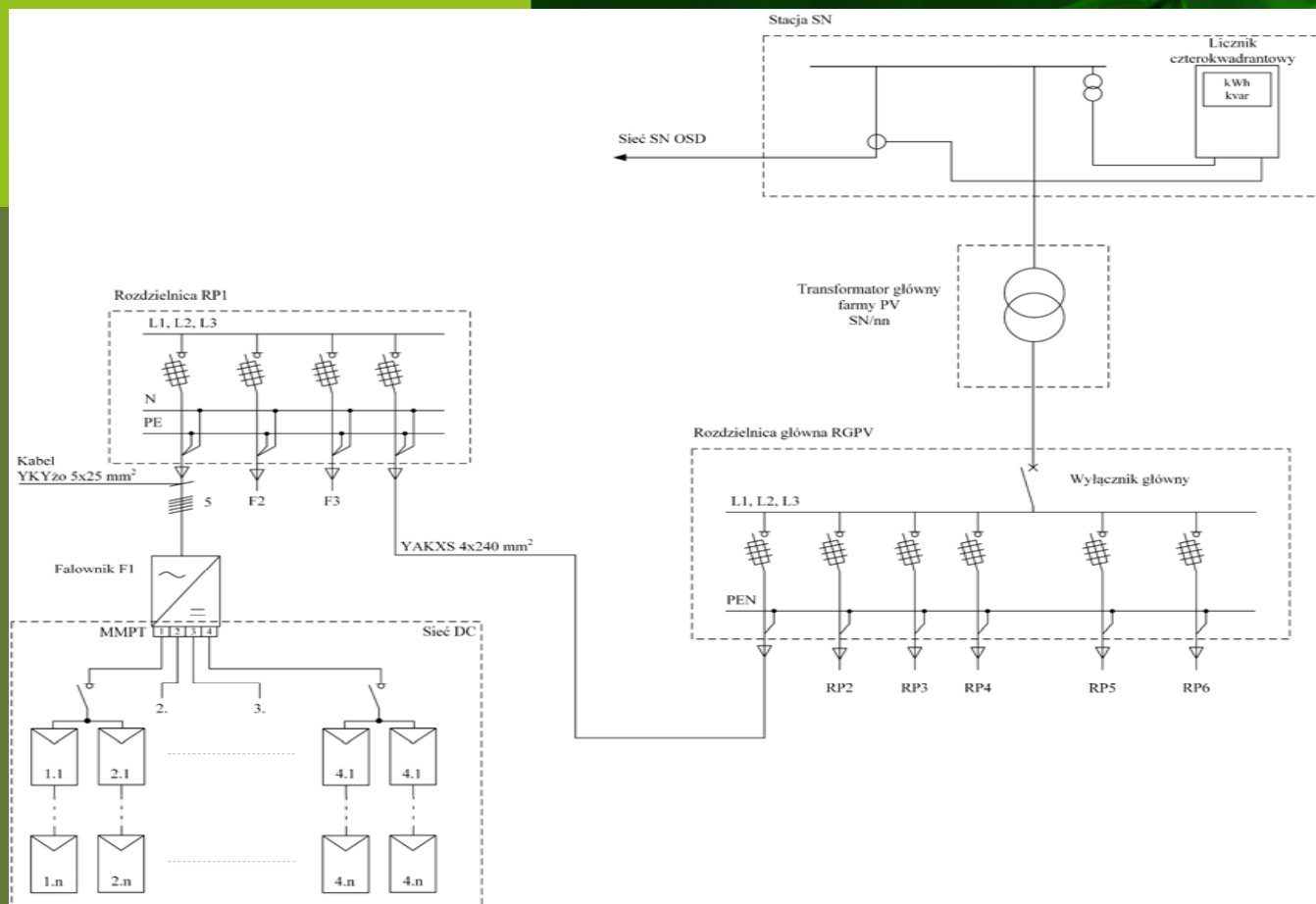


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na Rys. 19 przedstawiono schemat farmy fotowoltaicznej o mocy 1 MW. Takich obiektów jest w Polsce w chwili obecnej około 4000. Na schemacie widoczne są m.in. urządzenia łączeniowe.

Podstawowym elementem generującym moc są panele fotowoltaiczne. Wobec mocy farmy 1 MW, można stwierdzić, że składa się ona z 2000 paneli 500 W łączonych szeregowo w tak zwane łańcuchy.

Na Rys. 20 przedstawiono schemat prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej. Takich obiektów jest w Polsce ponad 1,5 miliona. Pomimo, że jej moce to zazwyczaj tylko kilka kilowatów, schemat ten jest bardzo zbliżony do farmy o mocy 1 MW. Do pojedynczego inwertera przyłączone są dwa łańcuchy paneli. Zwraca uwagę ich ochrona przed przepięciami (ochronniki, uziemienie) oraz fakt, że instalacja jest przyłączona do wewnętrznej instalacji odbiorcy.



Rys 19. Schemat połączeń farmy fotowoltaicznej o mocy 1 MW



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



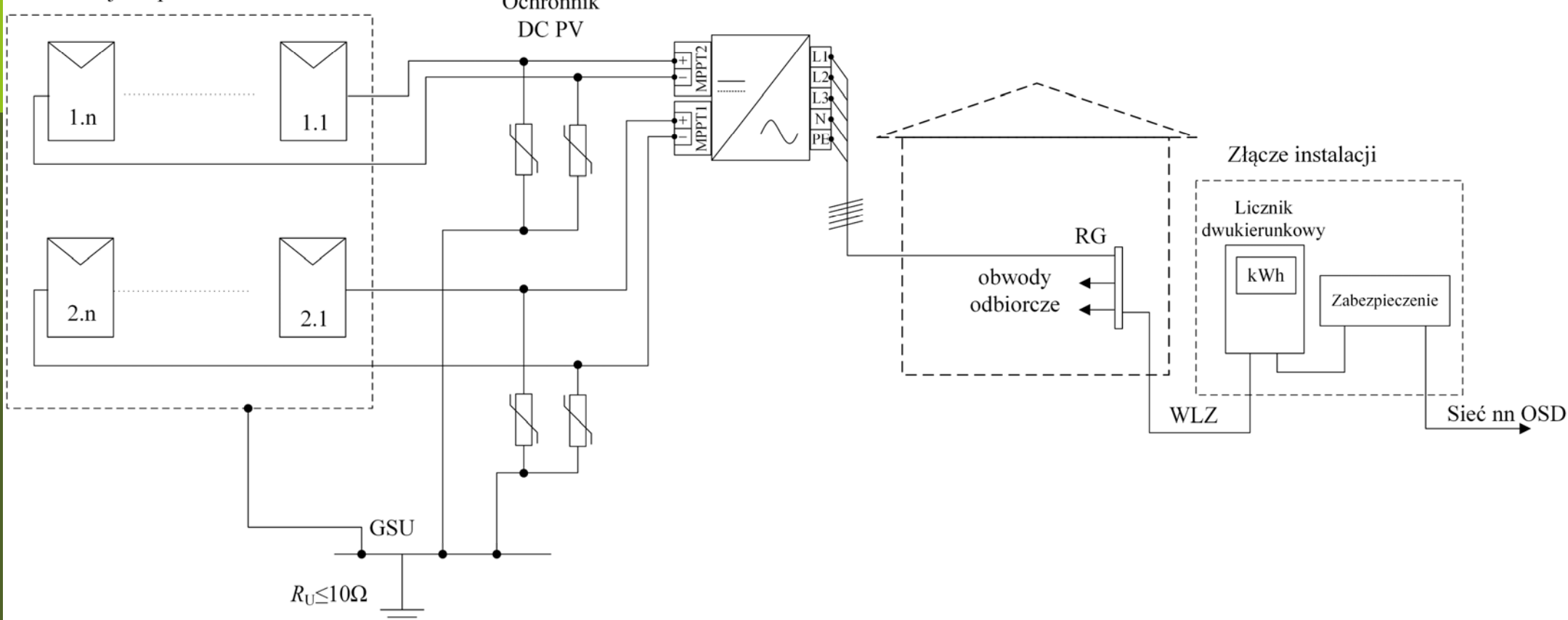
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Konstrukcja wsporcza



Rys 20. Schemat połączeń prosumenckiej farmy fotowoltaicznej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce – trendy i polityka



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



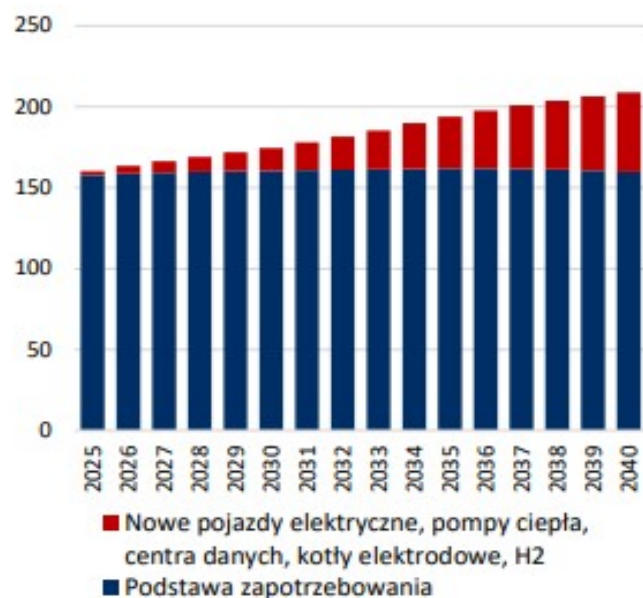
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

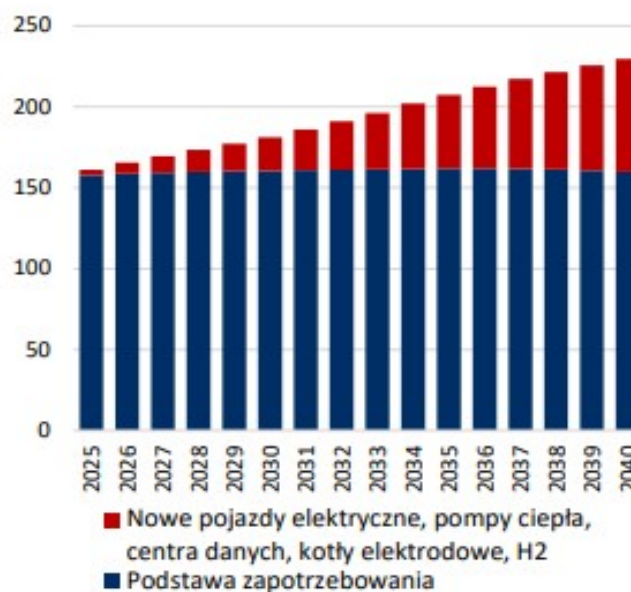


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Scenariusz SST



Scenariusz SDT



*H2 - zapotrzebowanie na energię elektryczną wynikające z produkcji wodoru

Rys 21. Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną netto w latach 2025 – 2040, średnia z lat klimatycznych 1982 – 2019 [TWh], według dokumentu PRSP 2025-2034. Scenariusz stabilny (po lewej stronie) oraz scenariusz dynamiczny (po prawej stronie) [7]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



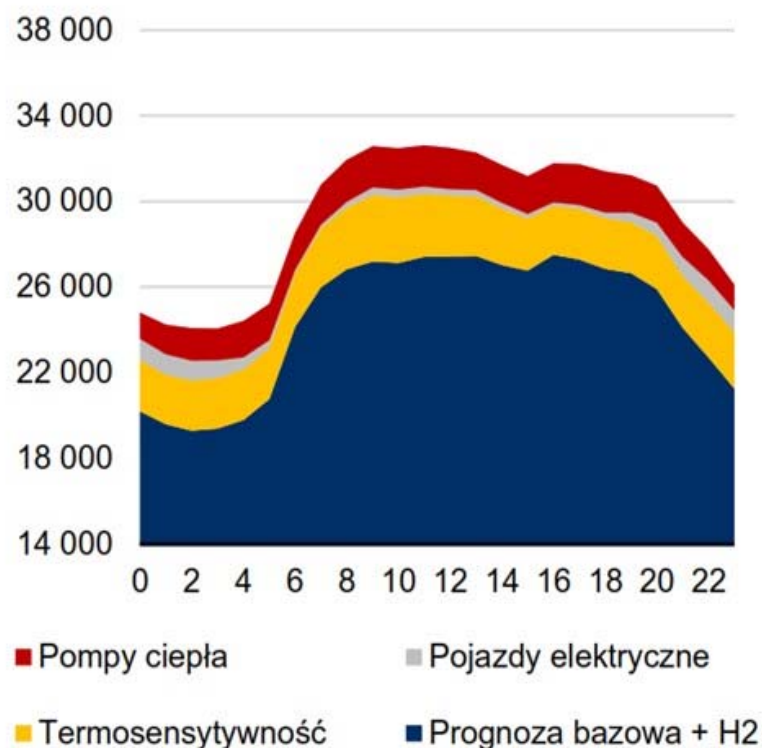
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

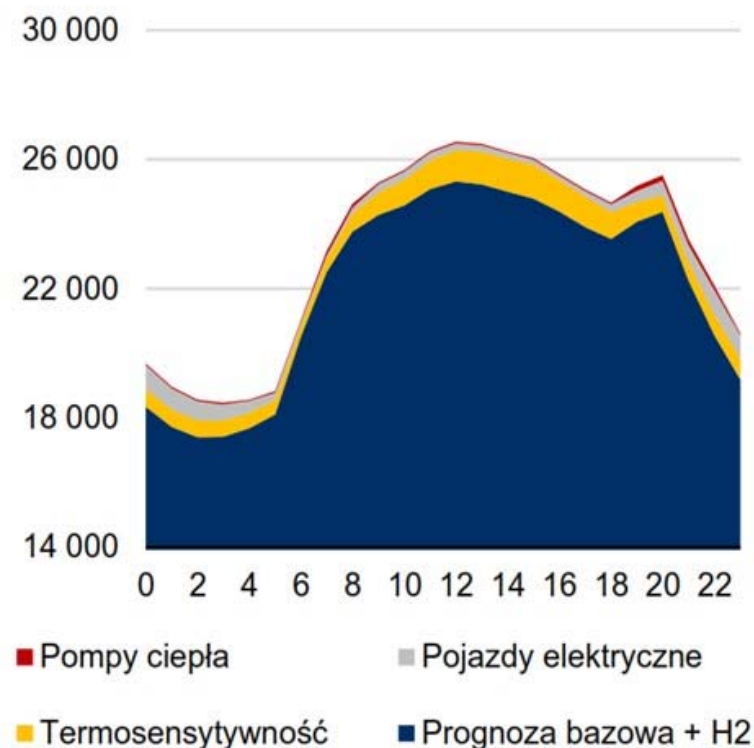


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Dzień szczytu zimowego – 2032 r. [MW]



Dzień szczytu letniego – 2032 r. [MW]



Rys 22. Prognoza typowych dobowych przebiegów obciążenia KSE w roku 2032 [7]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

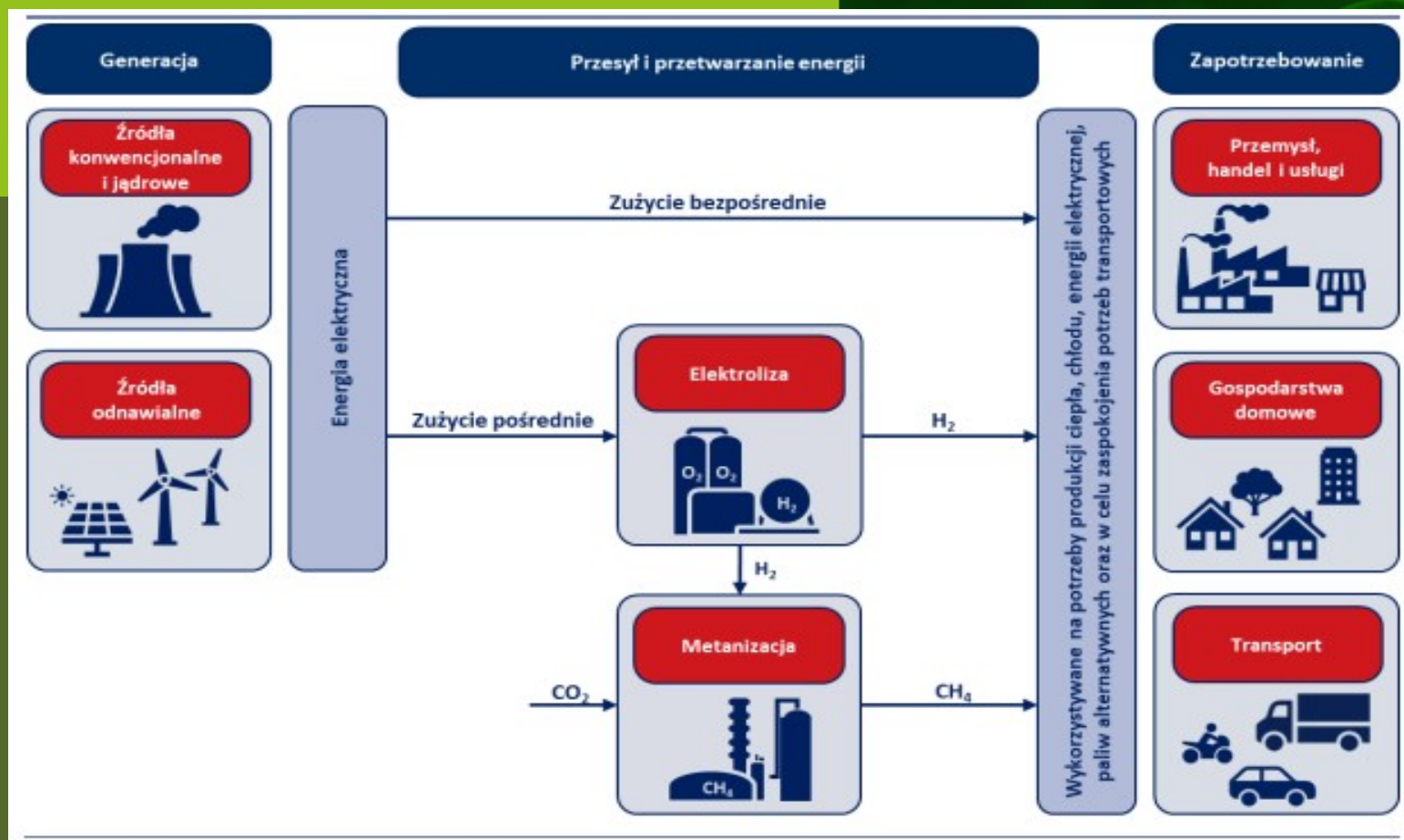


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 23. Wizja przyszłego systemu elektroenergetycznego wg dokumentu PSE [7]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Hierarchiczna struktura systemu elektroenergetycznego



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

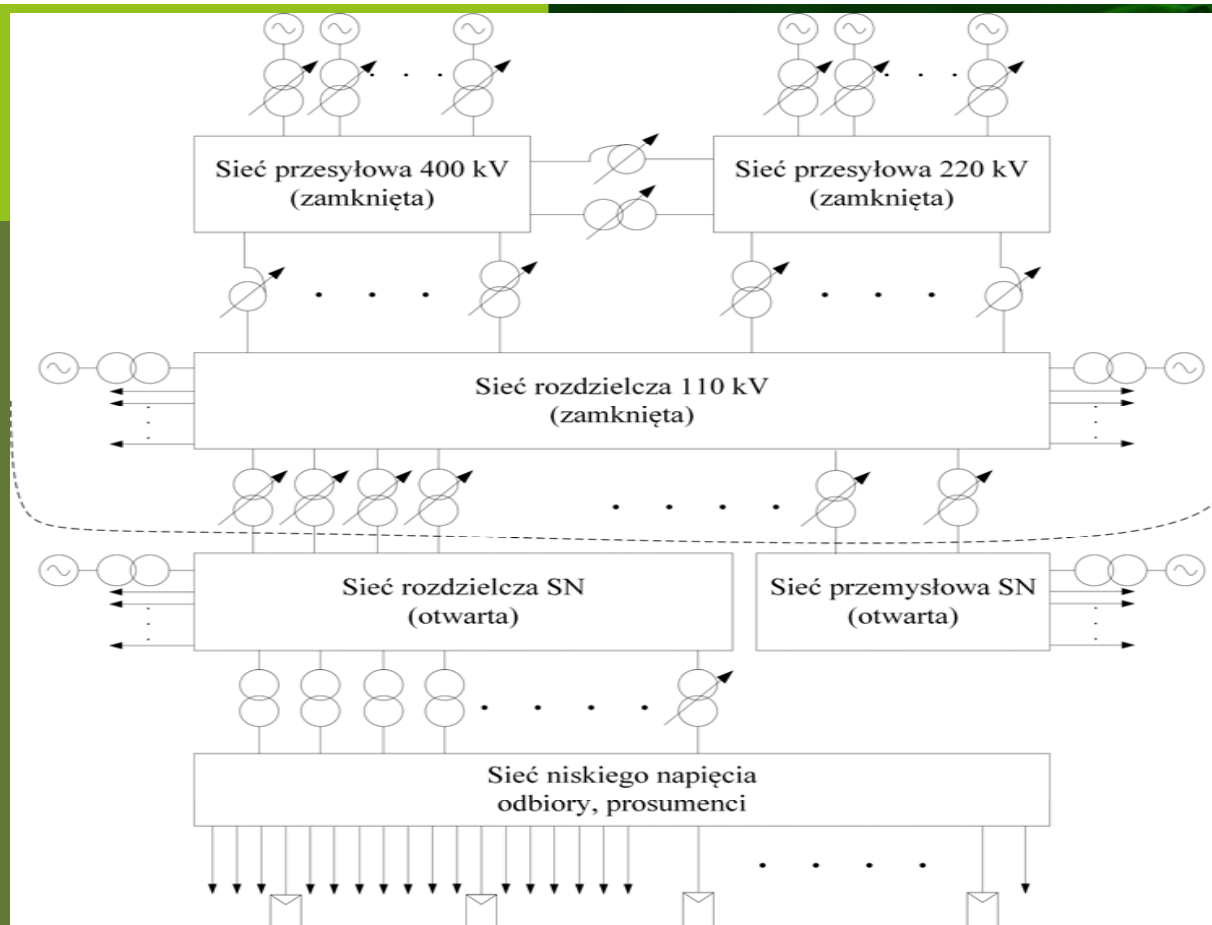
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Oprócz sektora wytwórczego zasadniczą rolę w pracy systemu elektroenergetycznego odgrywają sieci przesyłowe oraz dystrybucyjne. Tworzą one rozbudowany szkielet, dzięki któremu energia niezawodnie trafia ze źródeł do odbiorców.

Charakteryzując system elektroenergetyczny, można stwierdzić, że ma on strukturę hierarchiczną - sieć przesyłowa prowadzona przez jej operatora (OSP) zasila sieć dystrybucyjną na napięciu 110 kV, której pracą kierują operatorzy (OSD). Z sieci dystrybucyjnej o napięciu 110 kV zasilane są sieci średniego napięcia, a z nich sieci niskiego napięcia. To podporządkowanie funkcjonalne znajduje także odbicie w strukturze zarządzania. Model funkcjonalny systemu elektroenergetycznego i wzajemne usytuowanie jego głównych elementów składowych pokazano na Rys. 24.



Rys 24. Funkcjonalny model KSE z zasadniczymi elementami składowymi



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



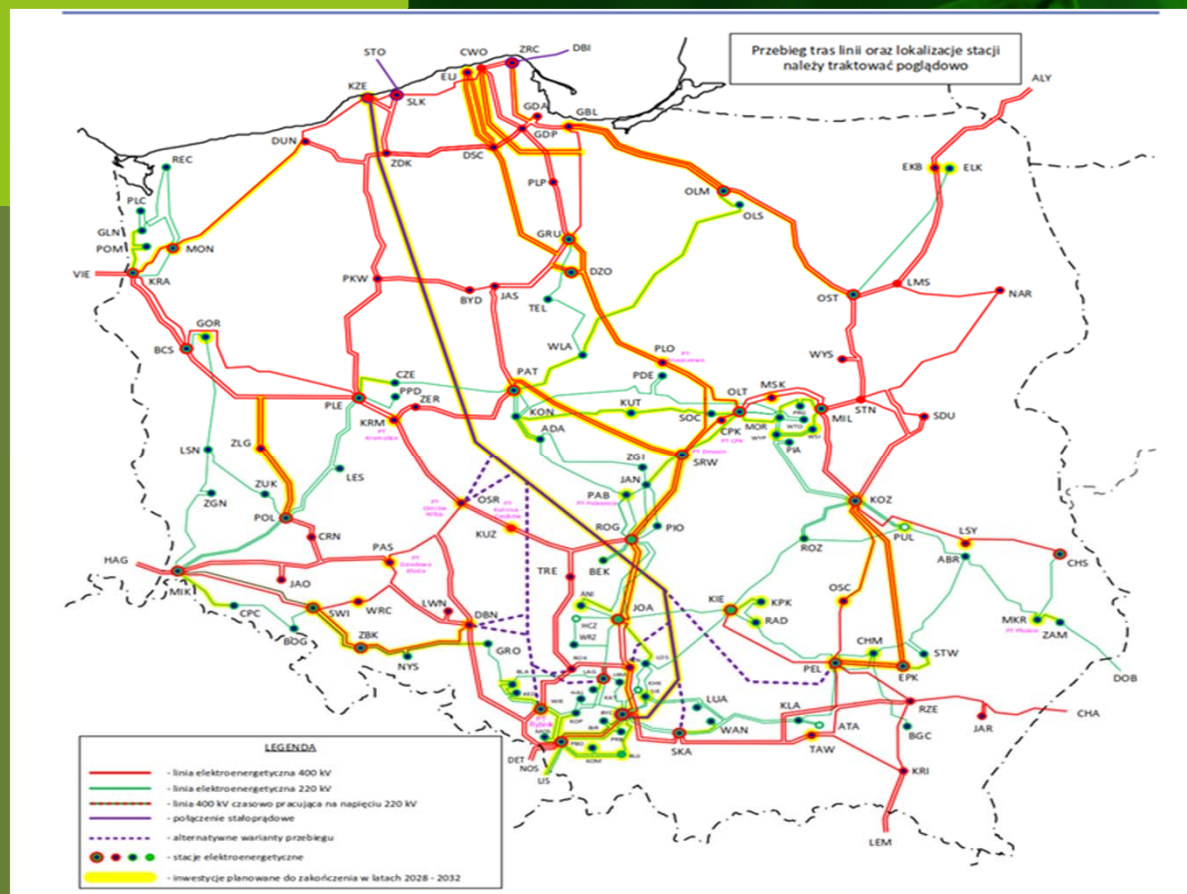
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na Rys. 25 przedstawiono plan krajowej sieci przesyłowej na rok 2032. Widoczna jest wysoka koncentracja linii w okolicach Żarnowca (5 linii dwutorowych). Ich przeznaczeniem jest wyprowadzenie mocy z farm morskich oraz pierwszej elektrowni jądrowej. Widoczne jest połączenie stałoprądowe do Szwecji oraz połączenie morskie z Litwą (zrezygnowano z jej budowy, wybudowane zostanie połączenie lądowe). W stacji Krzemienica (KZE) początek bierze linia prądu stałego (HVDC) prowadząca na południe Polski, lub nawet dalej do Czech. Ma ona zapewnić transfer mocy z obszarów o przyszłej wysokiej produkcji do obszarów, w których generacja może zostać w istotnym zakresie wygaszona.



Rys 25. Schemat sieci przesyłowej - prognoza na rok 2032 [7]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



**Rys 26. Zniszczona linia 220 kV w wyniku obfitego opadu mokrego śniegu, okolice
Szczecina 8 kwietnia 2008 r.**



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Siecią dystrybucyjną zarządzają (i są jej właścicielami) przedsiębiorstwa energetyczne – operatorzy systemów dystrybucyjnych (OSD). Są to przedsiębiorstwa o strukturze akcjonariatu należącego zarówno do inwestorów prywatnych jak i Skarbu Państwa. W kraju najważniejszymi i największymi spółkami dystrybucyjnymi są obecnie: PGE Dystrybucja S.A., TAURON Dystrybucja S.A., ENERGA – Operator S.A., ENEA Operator Sp. z o. o. oraz Stoen Operator Sp. z o. o. Obszary ich działalności przedstawiono na Rys. 27.



Rys 27. Obszary działania operatorów systemów dystrybucyjnych



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

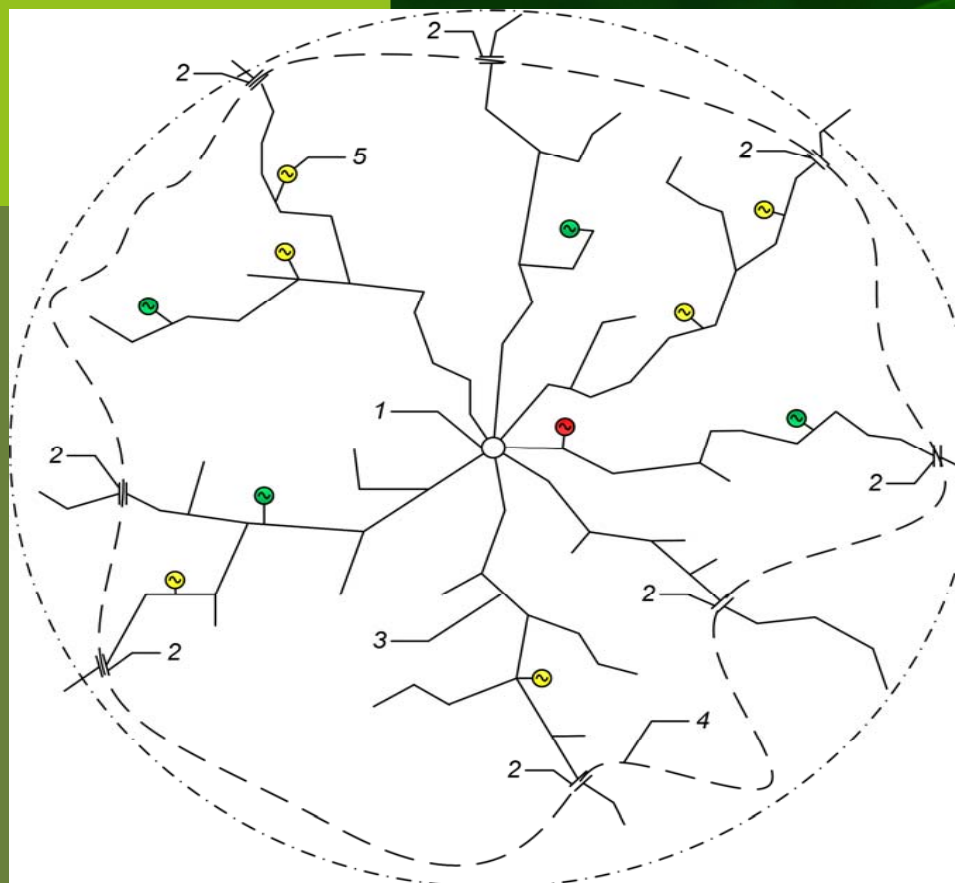
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Terenowa sieć SN (po odpowiednim przekształceniu schematu) ma układ radialny o przeciętnym promieniu 15 – 20 km. Schemat takiej sieci przedstawia Rys. 28.

Centralnie od stacji GPZ (1) odchodzą linie magistralne z odgałęzieniami. Magistrale biegną do sąsiedniego GPZ, ale na granicy obszarów zasilania są otwarte (2). Z sieci zasilane są stacje SN/nN (pomiędzy 100, a 200 sztuk na jeden transformator 110/SN). Do sieci przyłączone są jednostki energetyki rozproszonej w postaci pojedynczych wiatraków, farm PV, małych elektrowni wodnych oraz biogazowni. W Polsce jest ponad 1600 stacji o górnym napięciu 110 kV oraz około 300 000 stacji o górnym napięciu SN.



Rys 28. Uproszczony schemat sieci terenowej 15 kV zasilanej z GPZ 110/SN



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

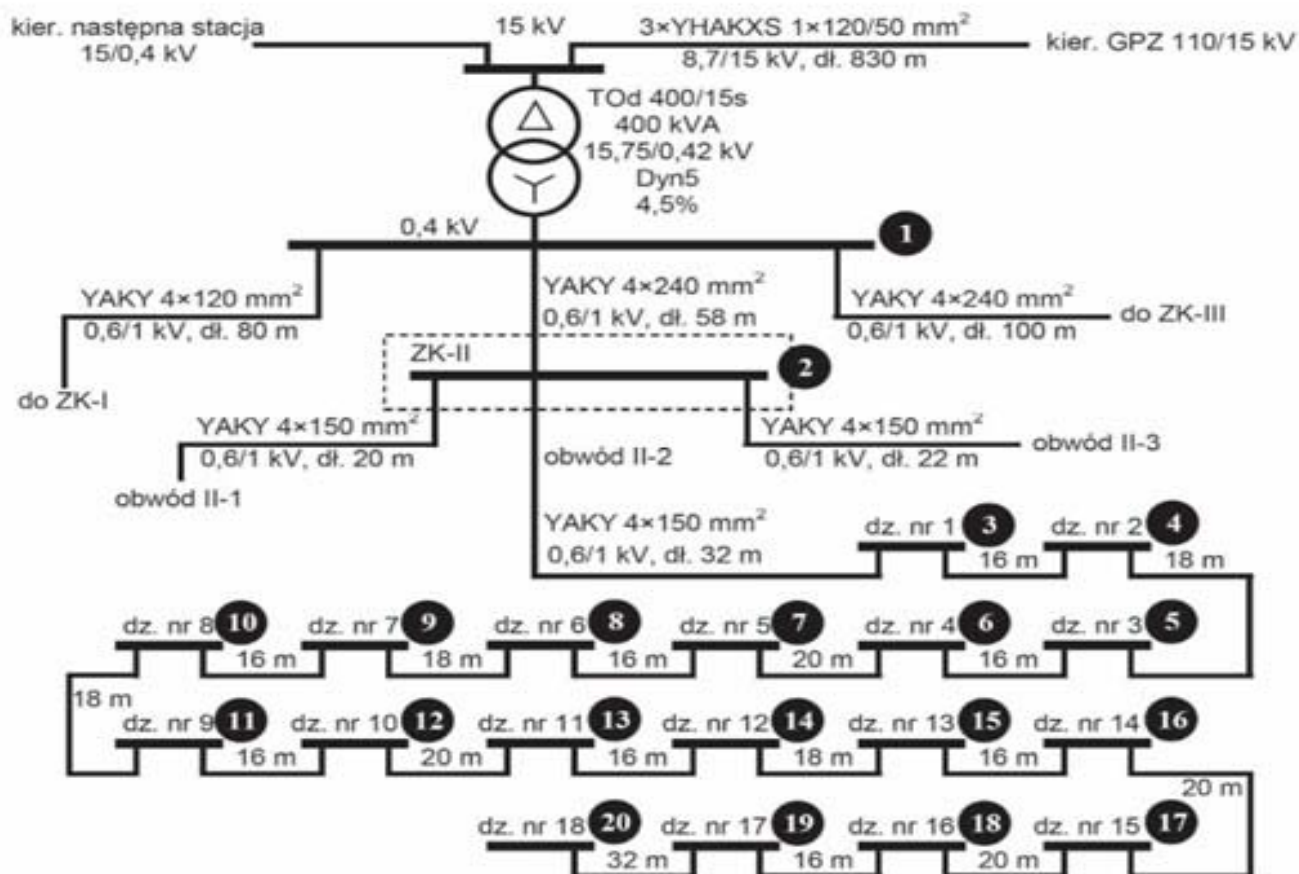


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 29. Fragment typowej sieci niskiego napięcia na przykładzie osiedla domów jednorodzinnych [8]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na terytorium Polski coraz częściej w mniejszym lub większym natężeniu występują ekstremalne warunki pogodowe. Wielokrotnie siła nawałnic była tak duża, że doprowadzała do zniszczenia lub uszkodzenia wielu linii elektroenergetycznych (110 kV, SN, nn), a skala koniecznych napraw była ogromna i często porównywalna z koniecznością odtworzenia nowej infrastruktury sieciowej. Operatorzy ogłaszają wówczas dla swoich służb godziny H (huragan). Rys. 30 przedstawia linię 15 kV z ogromnym nawisem sadziowym, który spowodował ekstremalne wydłużenie przewodów, zwarcie doziemne i w rezultacie wyłączenie linii i konieczność jej gruntownej naprawy. Wskaźniki określające poziom awaryjności sieci noszą nazwy SAIDI i SAIFI



Rys 30. Ekstremalny nawis sadziowy na linii SN (zima 2010, Jura Krakowsko - Częstochowska)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Składowe symetryczne



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Główna idea przekształcenia 0,1,2 polega na zastąpieniu układu trzech fazorów znajdujących się na płaszczyźnie zespolonej (fazory te odpowiadają wielkościom charakteryzującym sieci lub urządzenia trójfazowe – prądom, napięciom, strumieniom magnetycznym itd.) kombinacjami liniowymi trzech innych fazorów – zerowego, zgodnego i przeciwnego. Tym samym każdy element rozpatrywanej „trójki” fazorów – oznaczono je jako $\underline{W}_{L1}$, $\underline{W}_{L2}$, $\underline{W}_{L3}$ niezależnie od stopnia asymetrii może być zapisany jako kombinacja liniowa innego układu fazorów oznaczonego jako $\underline{W}_0$, $\underline{W}_1$, $\underline{W}_2$, przy czym współczynniki kombinacji liniowej nie ulegają zmianie, niezależnie od wartości fazorów wyjściowych. Tak określone przekształcenie liniowe jest zdefiniowane przy wykorzystaniu wskazanych wyżej operatorów w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_{L1} \\ \underline{W}_{L2} \\ \underline{W}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Widoczna w wyrażeniu macierz przekształcenia definiowana jest najczęściej za pomocą symbolu $\underline{S}$, a jej odwrotność oznaczana jest jako $\underline{S}^{-1}$. Tym samym:

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}; \quad \underline{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Dysponując macierzą odwrotną przekształcenia $\underline{S}^{-1}$ można dla dowolnego układu trójfazowego fazorów $\underline{W}_{L1}$, $\underline{W}_{L2}$, $\underline{W}_{L3}$ wyznaczyć składowe symetryczne:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{W}_{L1} \\ \underline{W}_{L2} \\ \underline{W}_{L3} \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Czyli ostatecznie:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_{L1} \\ \underline{W}_{L2} \\ \underline{W}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_0 \\ \underline{W}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ a^2 \underline{W}_1 \\ a \underline{W}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{W}_2 \\ a \underline{W}_2 \\ a^2 \underline{W}_2 \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 3.

Przez element trójfazowy przepływa niesymetryczny prąd trójfazowy $\underline{I}_{L1} = (4+j8)$, $\underline{I}_{L2} = (4-j2)$, $\underline{I}_{L3} = (-3-j2)$. Należy obliczyć jego składowe symetryczne.

Składowa zerowa dana jest wzorem $\underline{I}_0 = (\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3})/3$. Stąd po podstawieniu liczb:

$$\underline{I}_0 = [(4 + j 8) + (4 - j 2) + (-3 - j 2)] / 3 \cong (1,666 + j 1,333)$$

Składowa zgodna dana jest wzorem: $\underline{I}_1 = (\underline{I}_{L1} + a \underline{I}_{L2} + a^2 \underline{I}_{L3})/3$. Stąd po podstawieniu liczb:

$$\underline{I}_1 = [(4 + j 8) + (-1/2 + j \sqrt{3}/2)(4 - j 2) + (-1/2 - j \sqrt{3}/2)(-3 - j 2)] / 3 \cong (1,166 + j 5,354)$$

Składowa przeciwna dana jest wzorem: $\underline{I}_2 = (\underline{I}_{L1} + a^2 \underline{I}_{L2} + a \underline{I}_{L3})/3$. Stąd po podstawieniu liczb:

$$\underline{I}_2 = [(4 + j 8) + (-1/2 - j \sqrt{3}/2)(4 - j 2) + (-1/2 + j \sqrt{3}/2)(-3 - j 2)] / 3 \cong (1,166 + j 1,313)$$

Zadane prądy fazowe oraz ich obliczone składowe symetryczne pokazano na płaszczyźnie zmiennej zespolonej na Rysunku 31.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

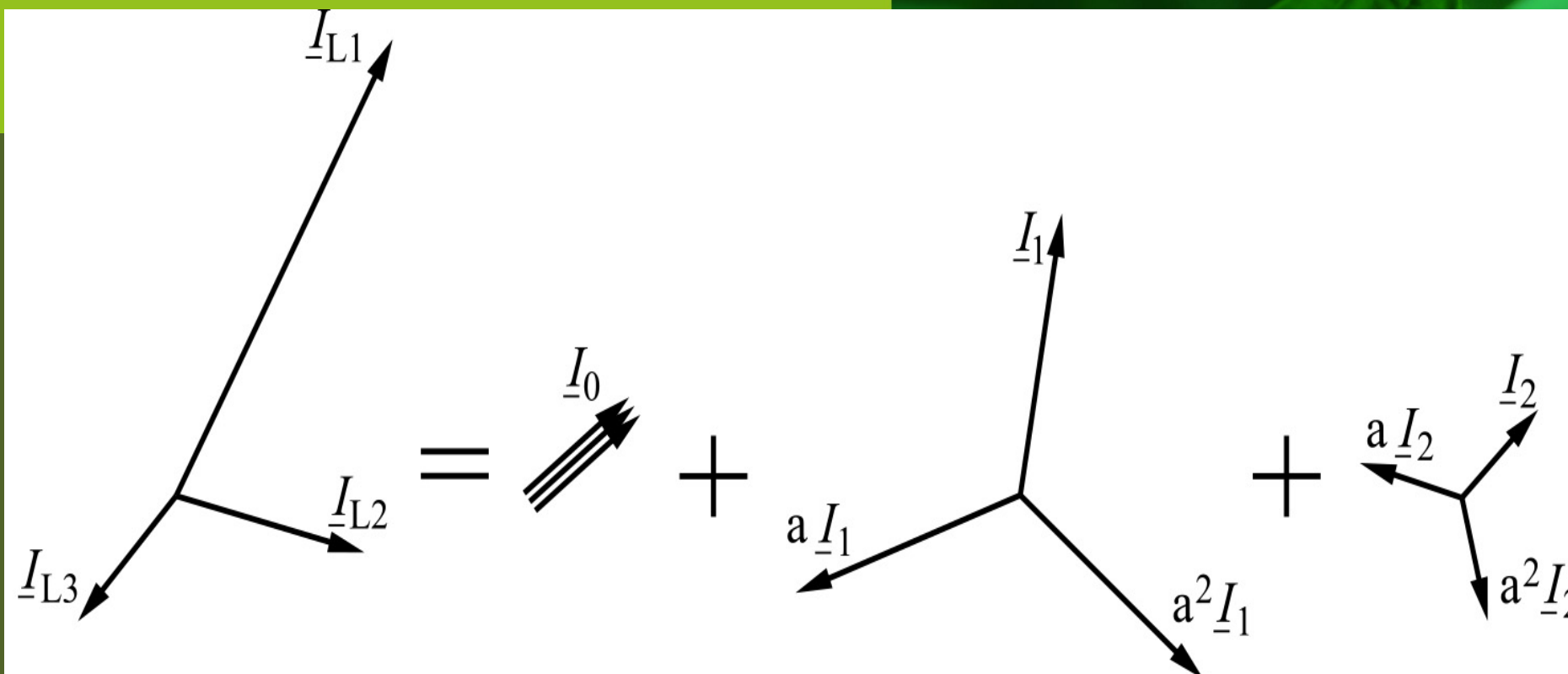


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 31. Rozkład dowolnego układu wektorów prądów fazowych na składowe symetryczne [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Symetryczny układ fazorów na następującą postać:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_{L1} \\ \underline{W}_{L2} \\ \underline{W}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W} \\ a^2 \underline{W} \\ a \underline{W} \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Po zastosowaniu macierzy S^{-1} otrzymuje się:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{W} \\ a^2 \underline{W} \\ a \underline{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{W} \\ 0 \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

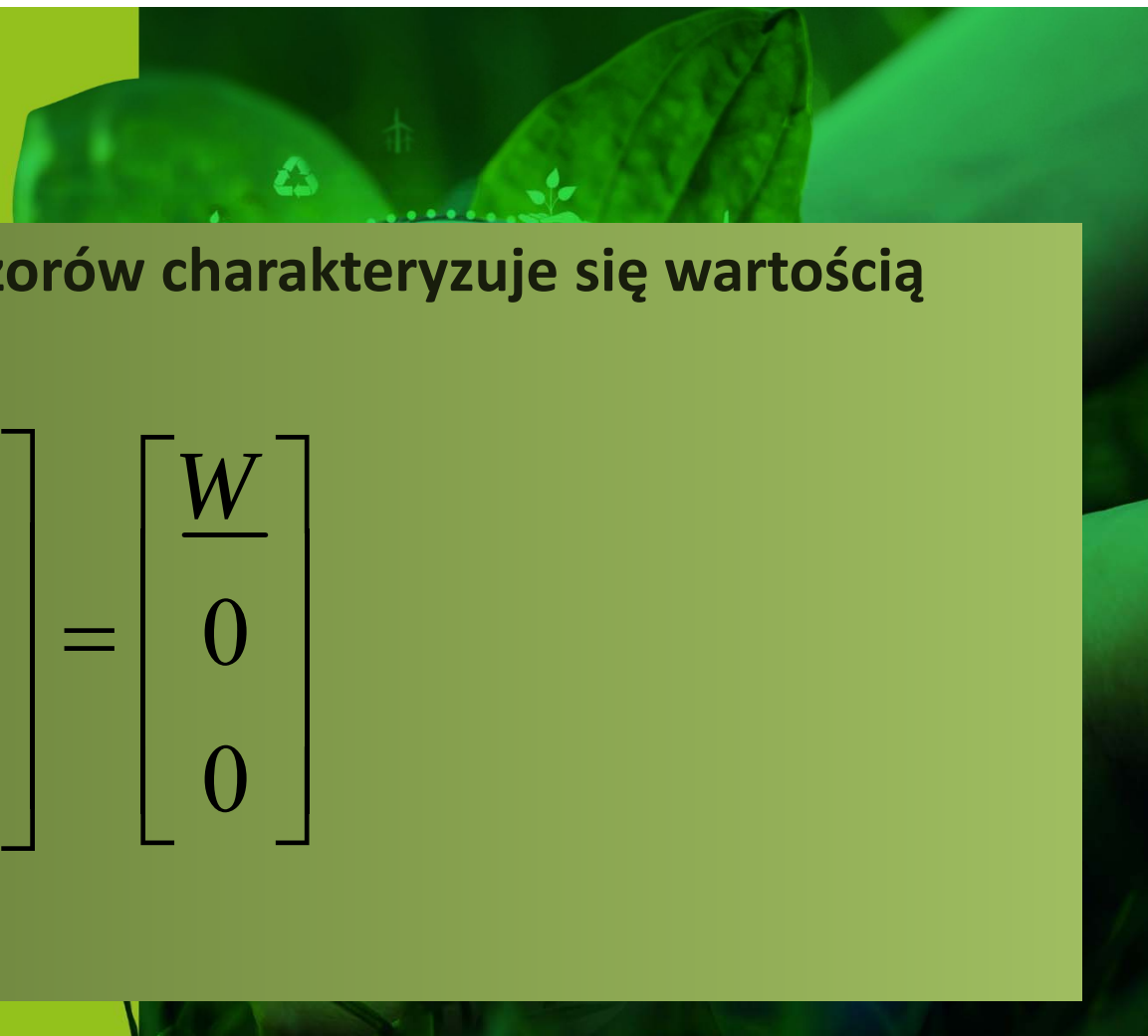


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Niesymetryczny, jednofazowy układ fazorów charakteryzuje się wartością niezerową tylko w jednej fazie (tu L1):

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_{L1} \\ \underline{W}_{L2} \\ \underline{W}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

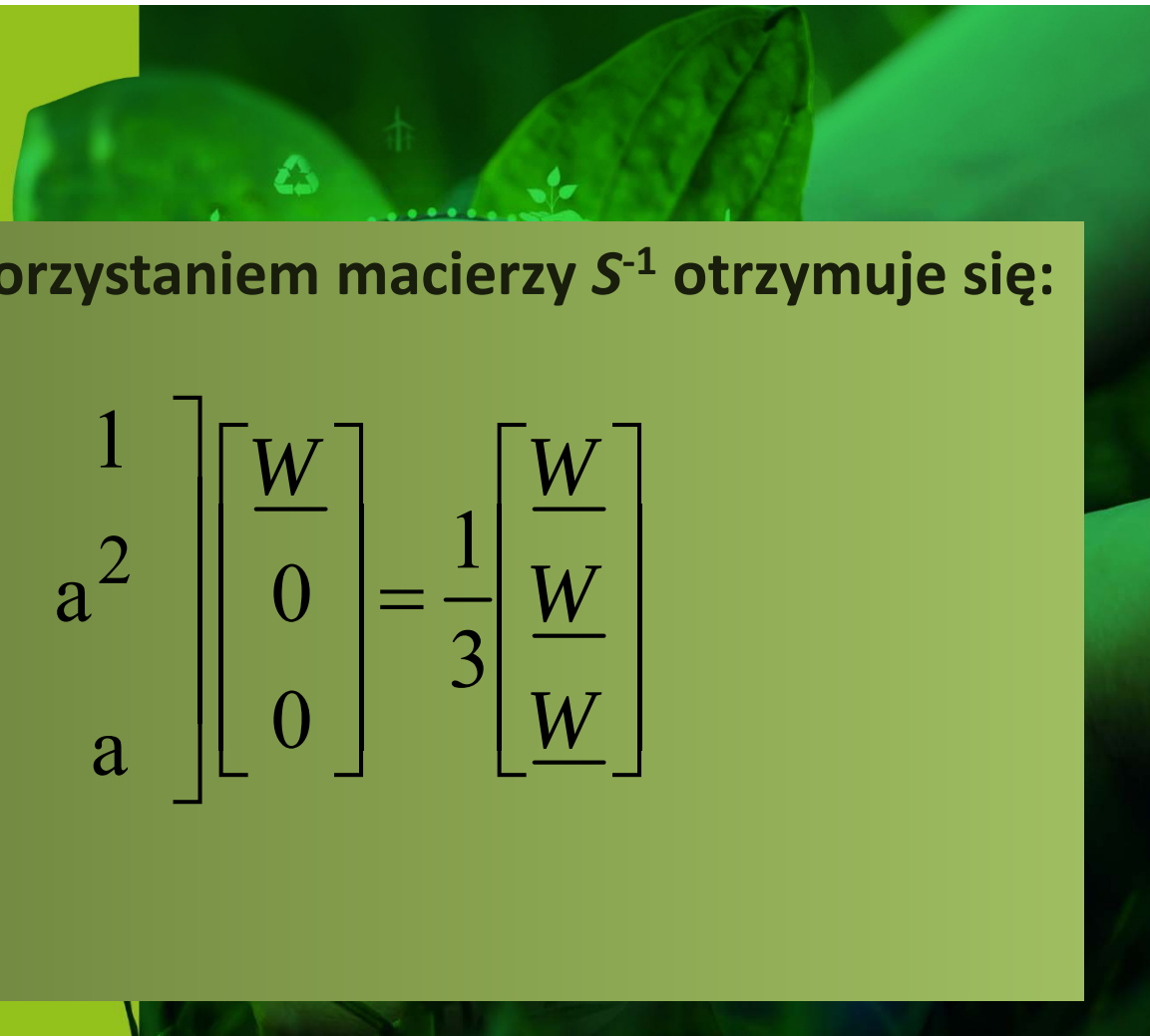


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Po zastosowaniu przekształcenia z wykorzystaniem macierzy S^{-1} otrzymuje się:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{W} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \underline{W} \\ \underline{W} \\ \underline{W} \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

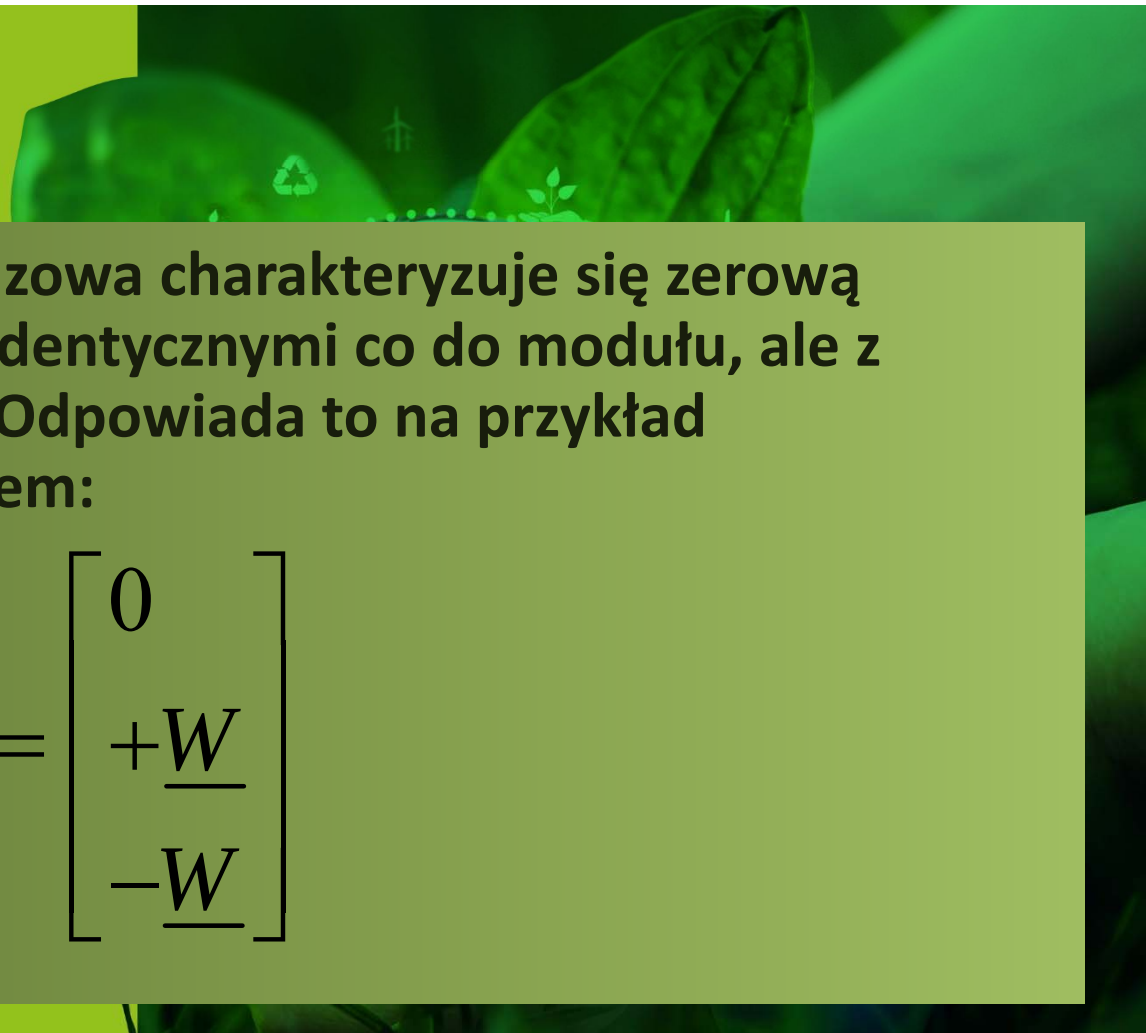


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Najczęściej spotykana asymetria dwufazowa charakteryzuje się zerową wartością w fazie L1 oraz wartościami identycznymi co do modułu, ale z przeciwnymi znakami w fazach L2 i L3. Odpowiada to na przykład przepływowi prądu w pętli L2-L3. A zatem:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_{L1} \\ \underline{W}_{L2} \\ \underline{W}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ +\underline{W} \\ -\underline{W} \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Po zastosowaniu macierzy S^{-1} otrzymuje się:

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ +\underline{W} \\ -\underline{W} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ a\underline{W} - a^2\underline{W} \\ a^2\underline{W} - a\underline{W} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ +j\sqrt{3}\underline{W} \\ -j\sqrt{3}\underline{W} \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Prąd trójfazowy (ogólnie niesymetryczny) płynąc przez element trójfazowy wytwarza trójfazową stratę napięcia, którą można wyrazić za pomocą następującego równania macierzowego:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_m & \underline{M}_m & \underline{M}_m \\ \underline{M}_m & \underline{W}_m & \underline{M}_m \\ \underline{M}_m & \underline{M}_m & \underline{W}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

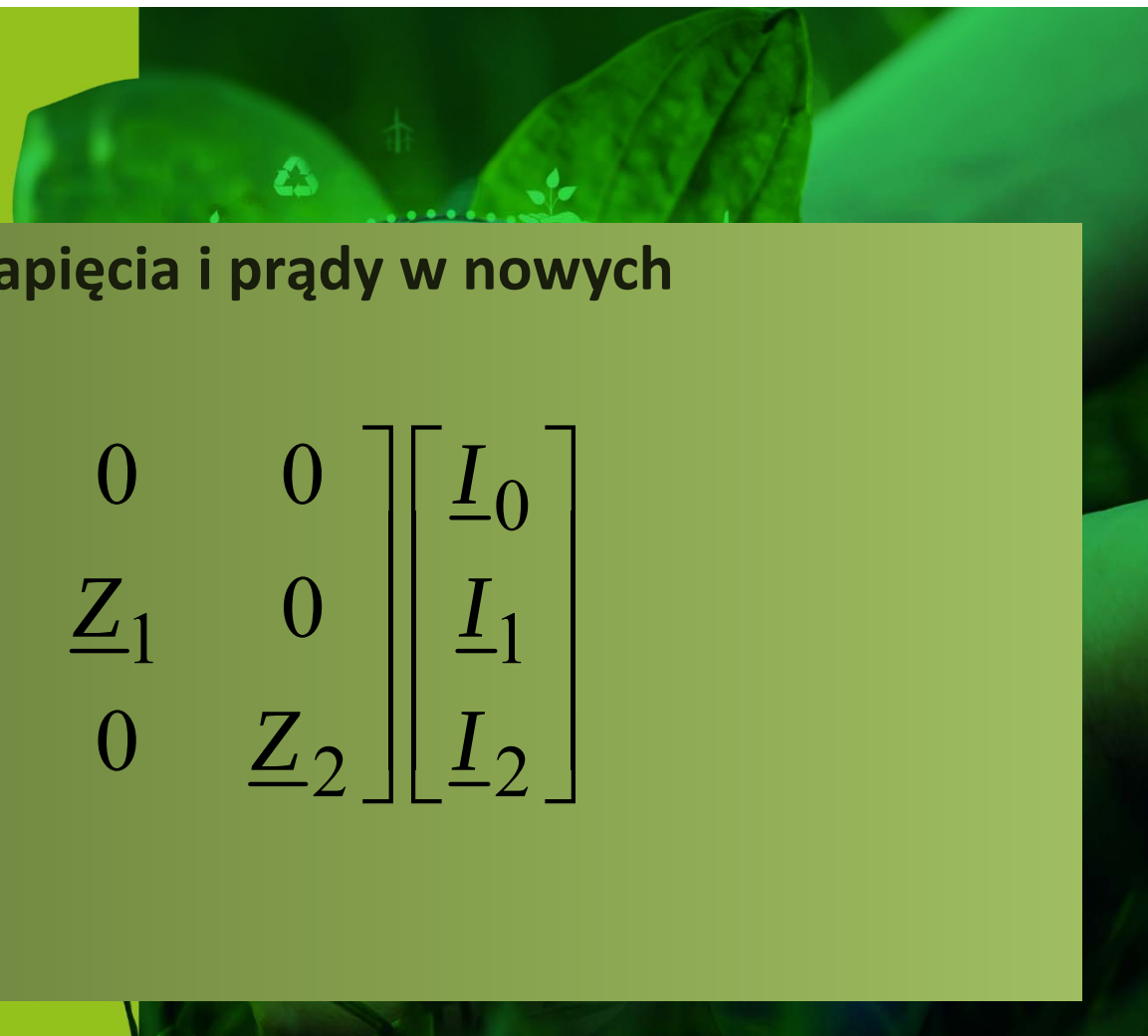


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Natomiast równanie opisujące straty napięcia i prądy w nowych współrzędnych przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_0 \\ \Delta \underline{U}_1 \\ \Delta \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Można łatwo wykazać, że impedancje elementów diagonalnej macierzy przedstawionej na poprzednim slajdzie mają następującą postać:

$$\underline{Z}_0 = (\underline{W}_m + 2\underline{M}_m), \quad \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = (\underline{W}_m - \underline{M}_m)$$



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

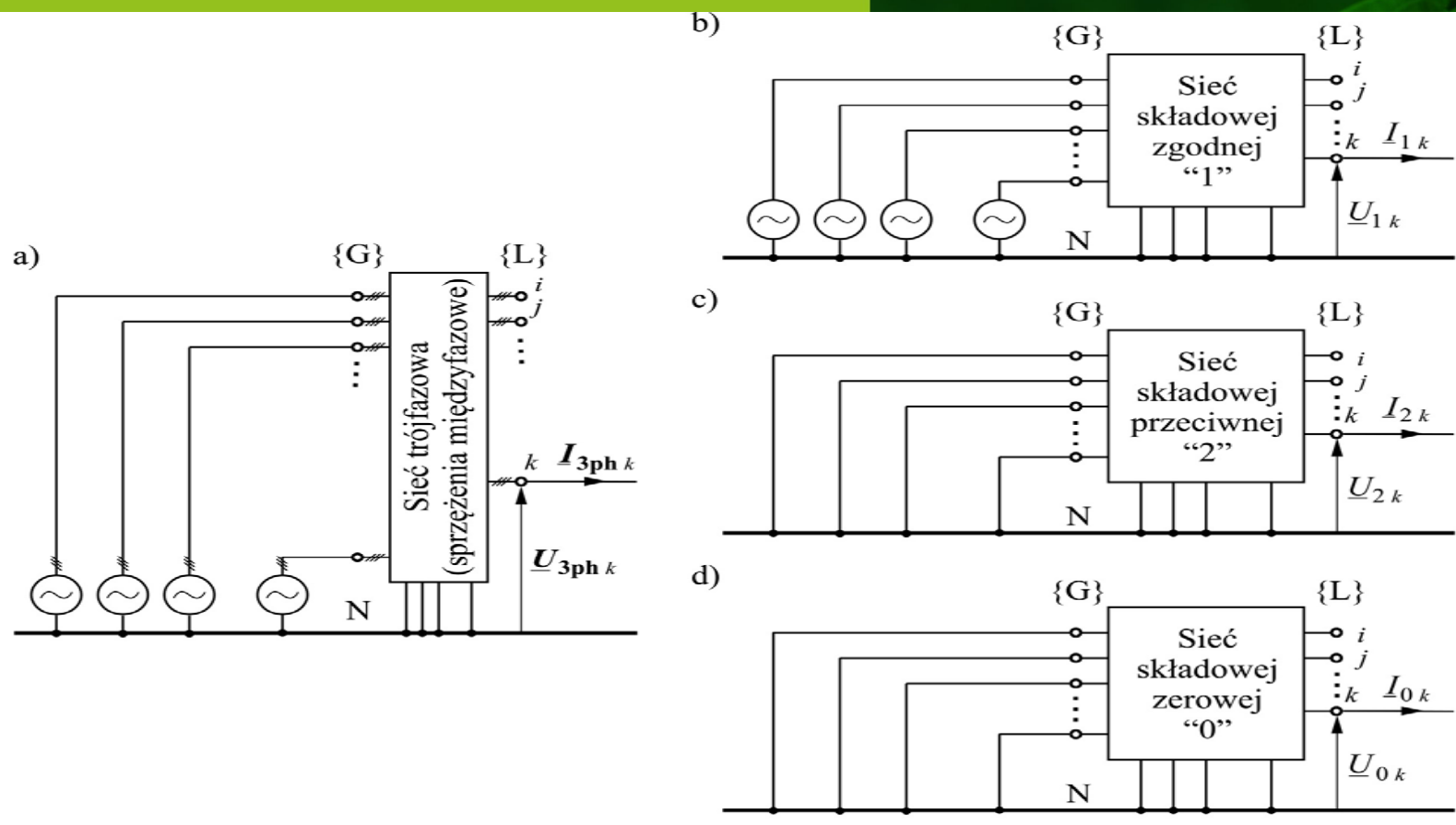


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 32. Ilustracje zastępowania sieci trójfazowej sieciami składowymi symetrycznymi [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Urządzenia wytwórcze - źródła



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

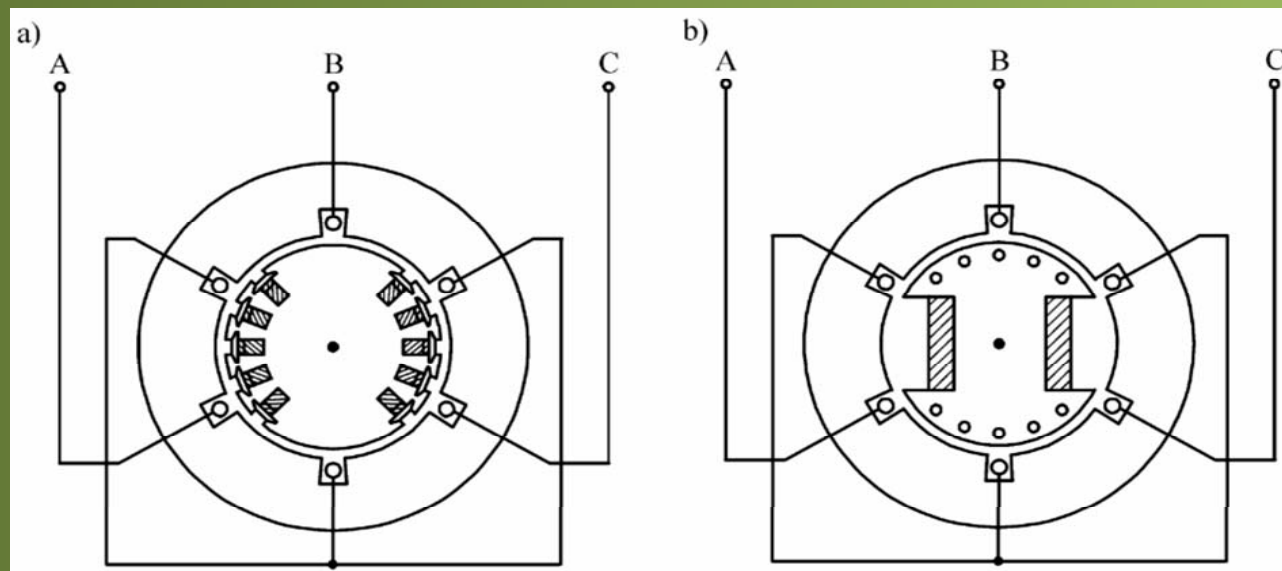
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Głównymi elementami generatora synchronicznego są twornik, czyli stojan oraz magneśnica czyli wirnik. Wyróżnia się dwa rodzaje generatorów synchronicznych:

- z biegunami utajonymi,
- z biegunami wydatnymi.



Rys 33. Rodzaje generatorów synchronicznych: a) z biegunami utajonymi, b) z biegunami wydatnymi [10,11]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



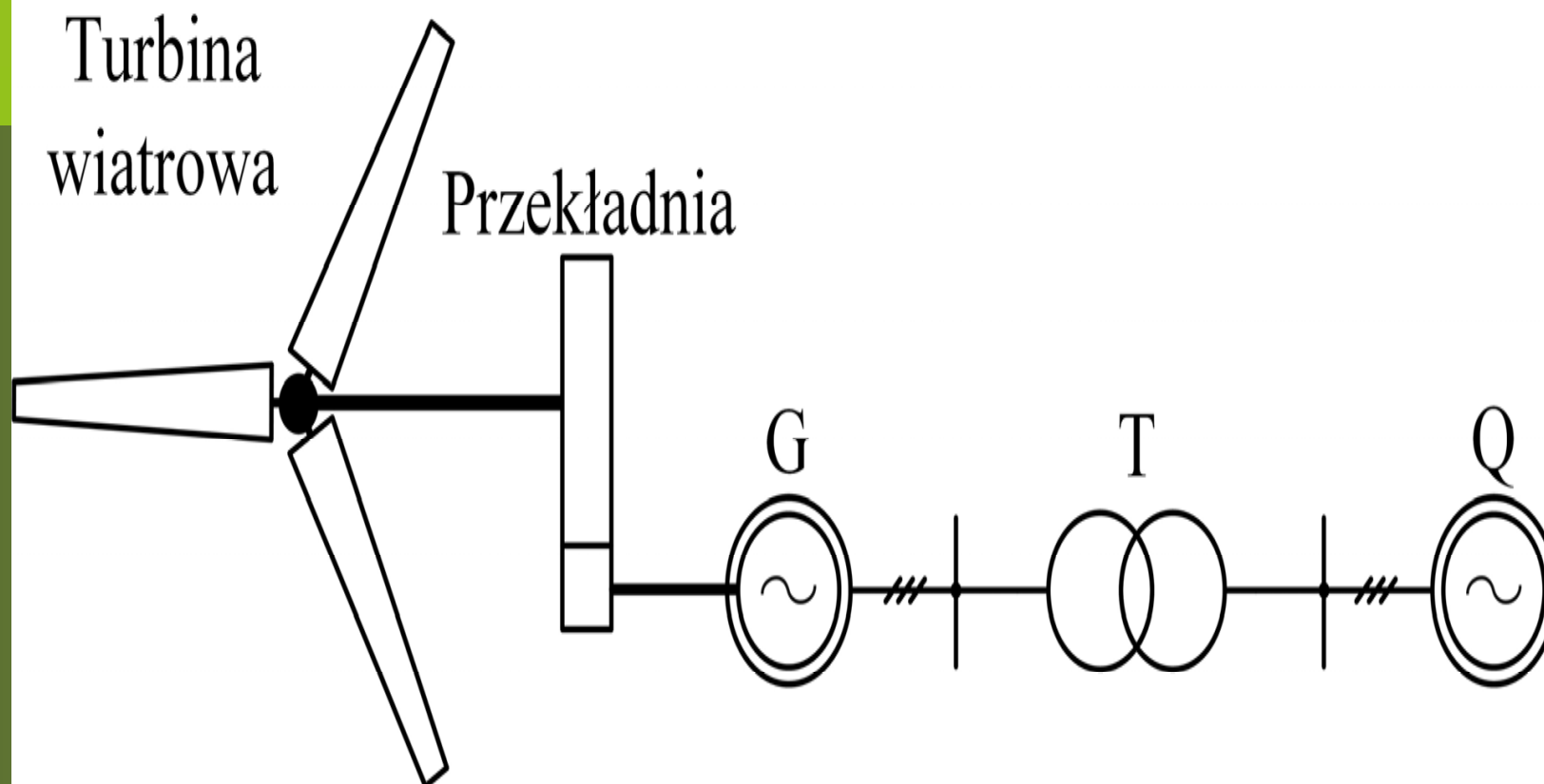
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Generatory asynchroniczne (indukcyjne) stosowane są m.in. w małych elektrowniach wodnych oraz w elektrowniach wiatrowych starego typu. W przypadku elektrowni wiatrowych były to zazwyczaj maszyny z wirnikiem klatkowym lub też z regulowaną rezystancją w obwodzie wirnika. Często była to konstrukcja dwuklatkowa. W klasyfikacji elektrowni wiatrowych określa się je jako typ I oraz typ II.



Rys 34. Elektrownia wiatrowa – typ I – z generatorem indukcyjnym [12]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

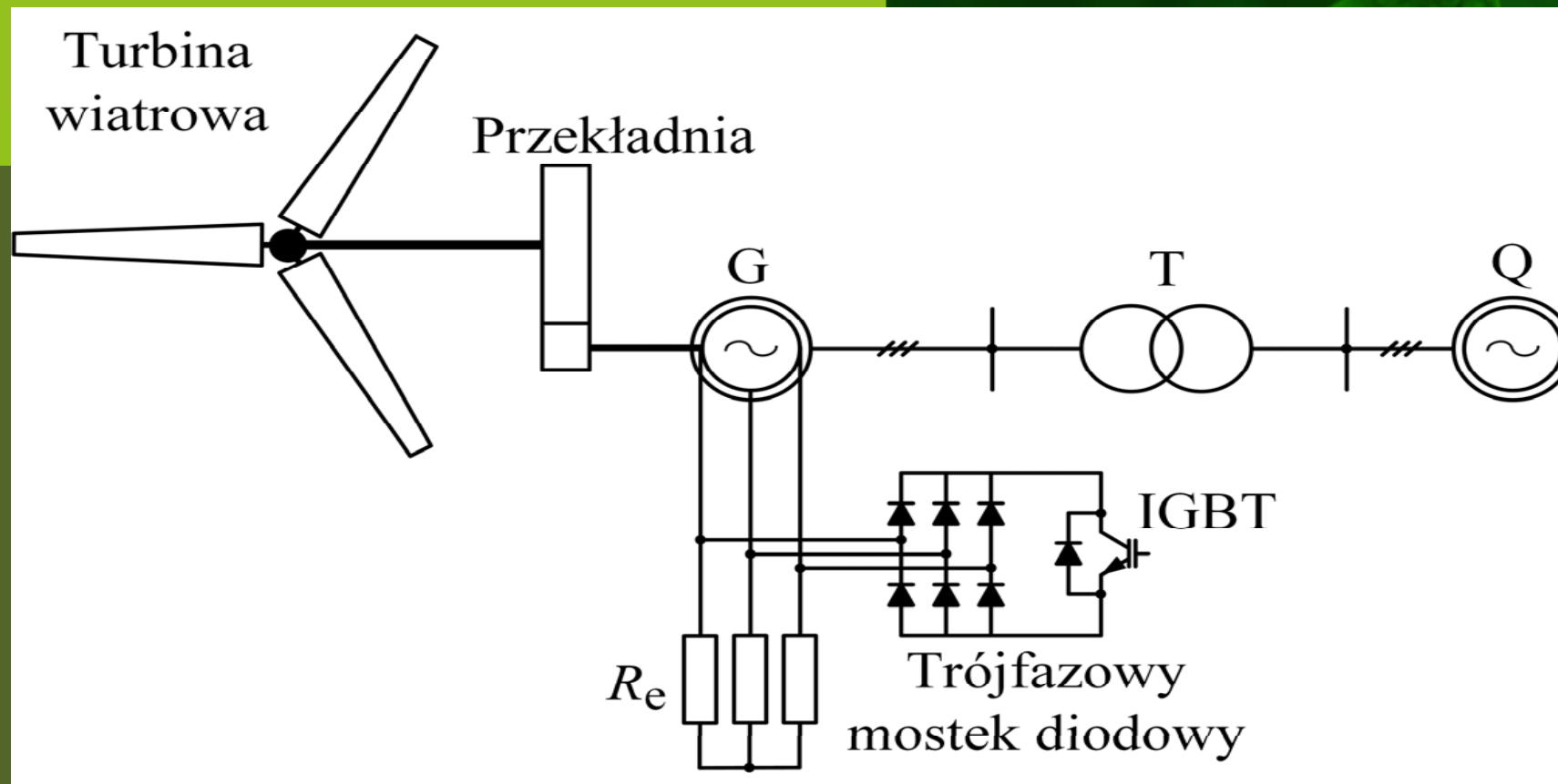


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 35. Elektrownia wiatrowa – typ II – z generatorem indukcyjnym oraz z dodatkową rezystancją w obwodzie wirnika [12]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



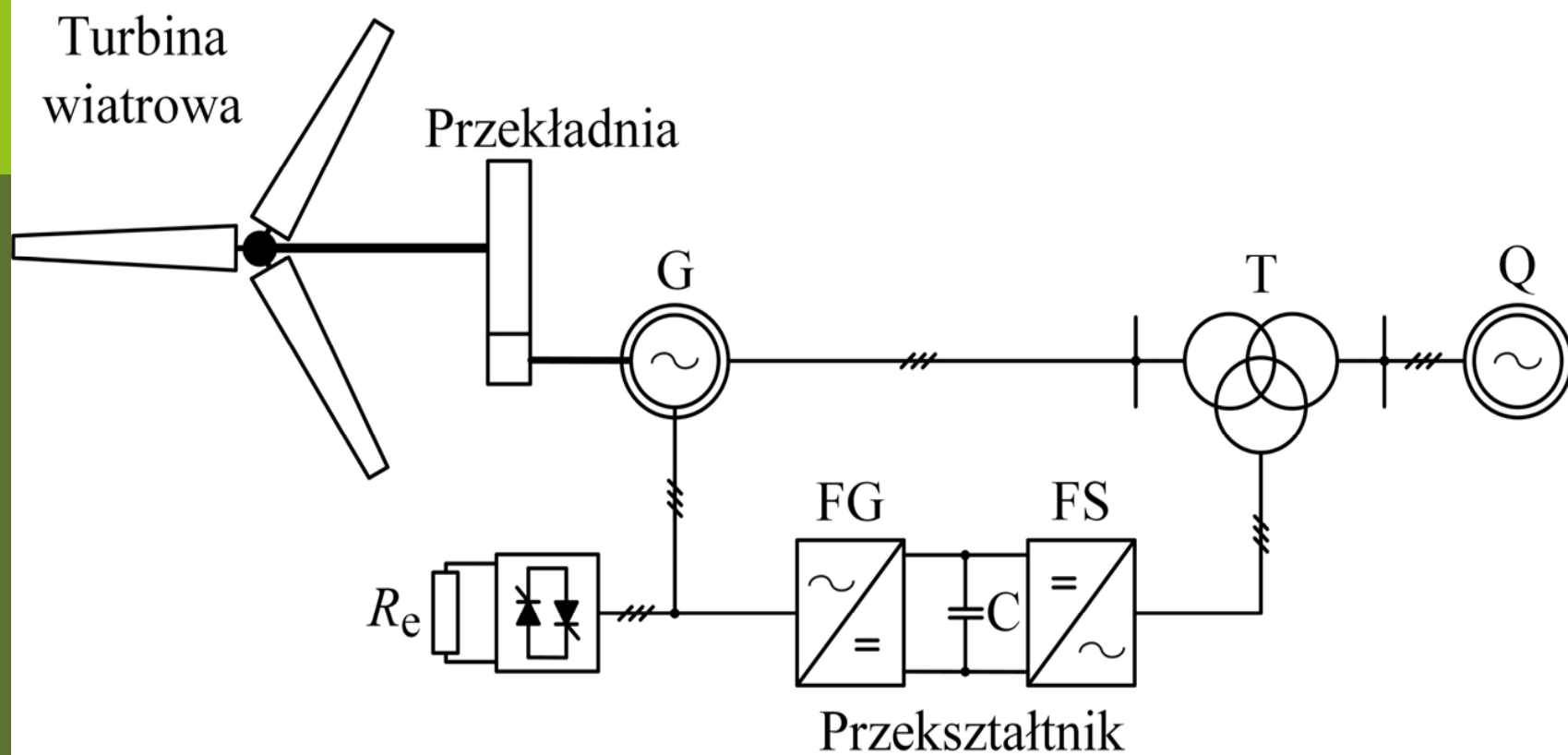
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Jeszcze około 10 lat temu szeroko rozpowszechnione były (i wciąż są eksploatowane) elektrownie wiatrowe typu III z generatorami asynchronicznymi dwustronnie zasilanymi, znane jako DFIG (*ang. Double Fed Induction Generator*). Obwód wirnika poprzez przekształtnik jest włączony do trzeciego uzwojenia transformatora. Różnica w porównaniu z elektrownią wiatrową typu II jest taka, że w obwodzie wirnika generatora zastosowano dwa przekształtniki energoelektroniczne z kondensatorem, które tworzą układ oznaczony jako VSC (*ang. Voltage Source Converter*).



Rys 36. Elektrownia wiatrowa typu III – z generatorem indukcyjnym dwustronnie zasilanym [12]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



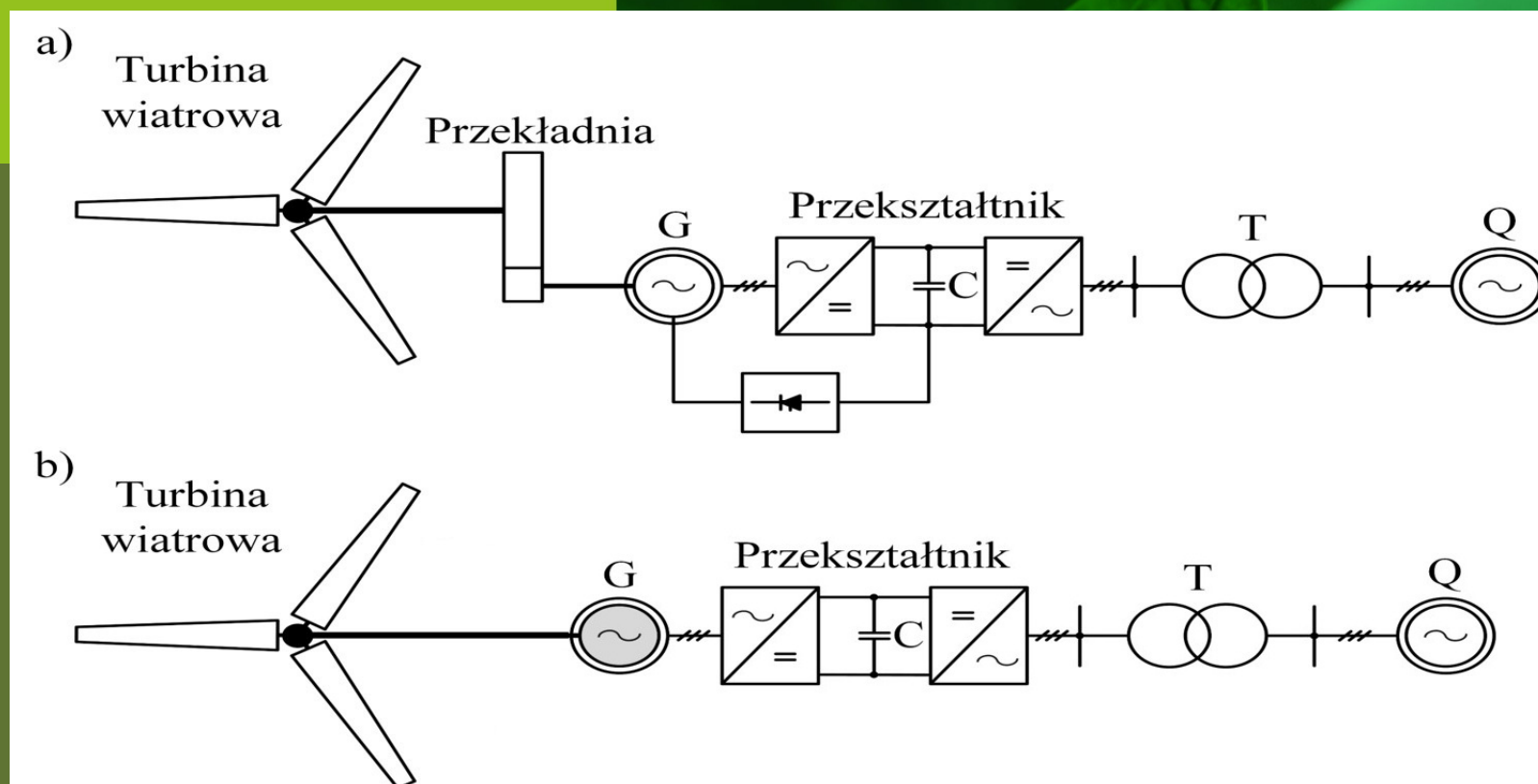
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Obecnie w elektrowniach wiatrowych najczęściej jest spotykane rozwiązanie z generatorem synchronicznym połączonym z siecią poprzez przekształtnik. Są one oznaczone jako FC (*ang. Full Converter*). Generator synchroniczny posiada tradycyjny układ wzbudzenia lub też pole magnetyczne wytwarzane jest za pomocą magnesów stałych. Rozwiązanie z magnesami stałymi pozwala na eliminację przekładni, ponieważ obroty generatora są dostosowane do obrotów turbiny (między 13 a 20 obrotów na minutę). Takie rozwiązanie przedstawiane jest jako typ IV elektrowni wiatrowej.



Rys 37. Elektrownia wiatrowa typu IV : a) z maszyną synchroniczną z uzwojeniem wzbudzenia, b) z maszyną synchroniczną z magnesami trwałymi [11, 13]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



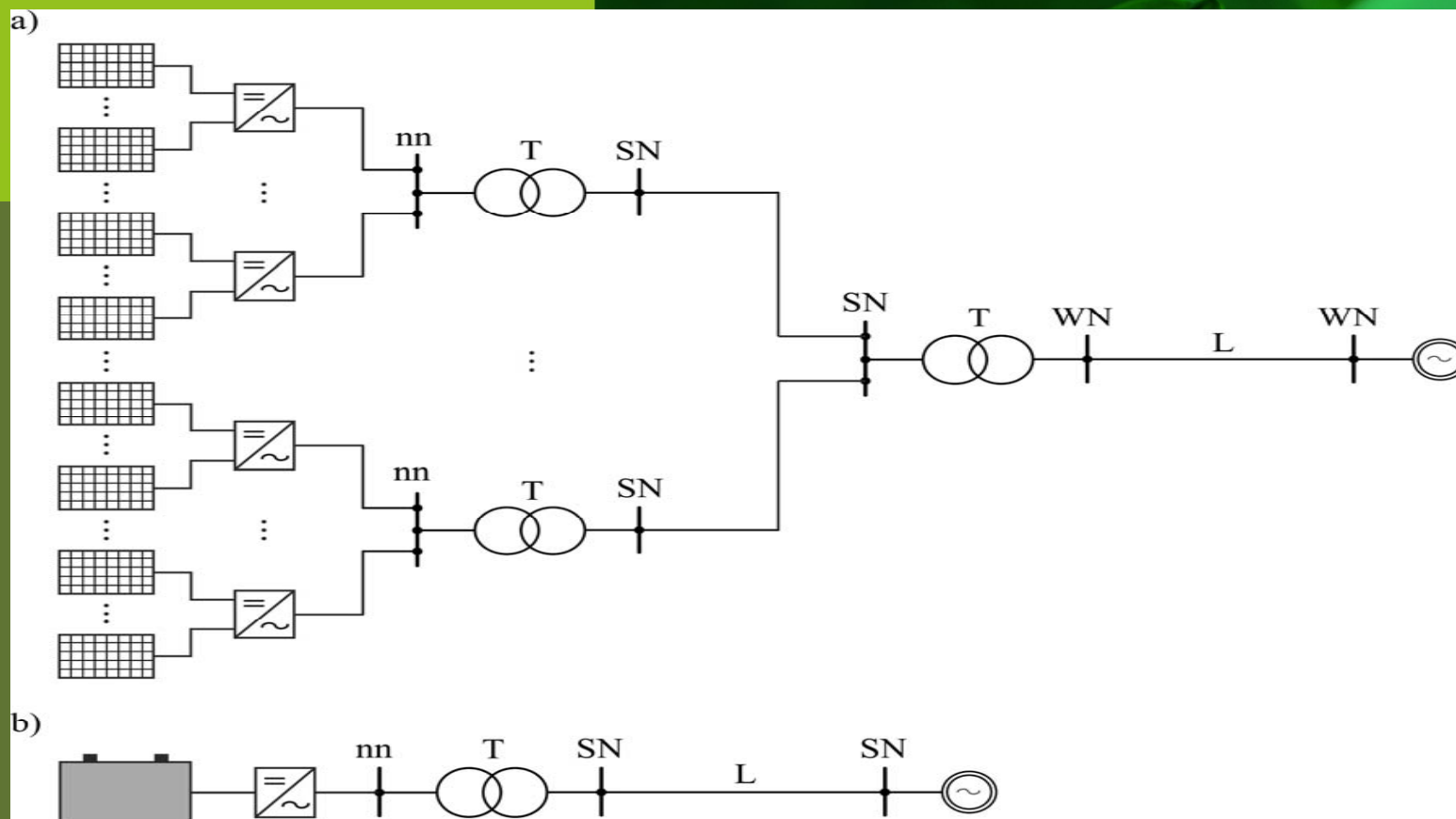
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Farmy fotowoltaiczne składają się z części stałoprądowej DC oraz zmiennoprądowej AC. Głównymi elementami elektrowni fotowoltaicznej są panele fotowoltaiczne, inwertery, transformatory, sieć wewnętrzna oraz linia (najczęściej kablowa) umożliwiająca połączenie z systemem elektroenergetycznym. Na Rys. 38 przedstawiono uproszczony schemat przyłączenia do sieci farmy fotowoltaicznej oraz magazynu energii. Magazyny energii składają się z elementu magazynującego energię elektryczną (np. baterii), inwertera, transformatora i linii łączącej go z siecią elektroenergetyczną.



Rys 38. Poglądowy schemat przyłączenia a) farmy fotowoltaicznej do sieci elektroenergetycznej WN, b) magazynu energii do sieci elektroenergetycznej SN



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Linie elektroenergetyczne



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

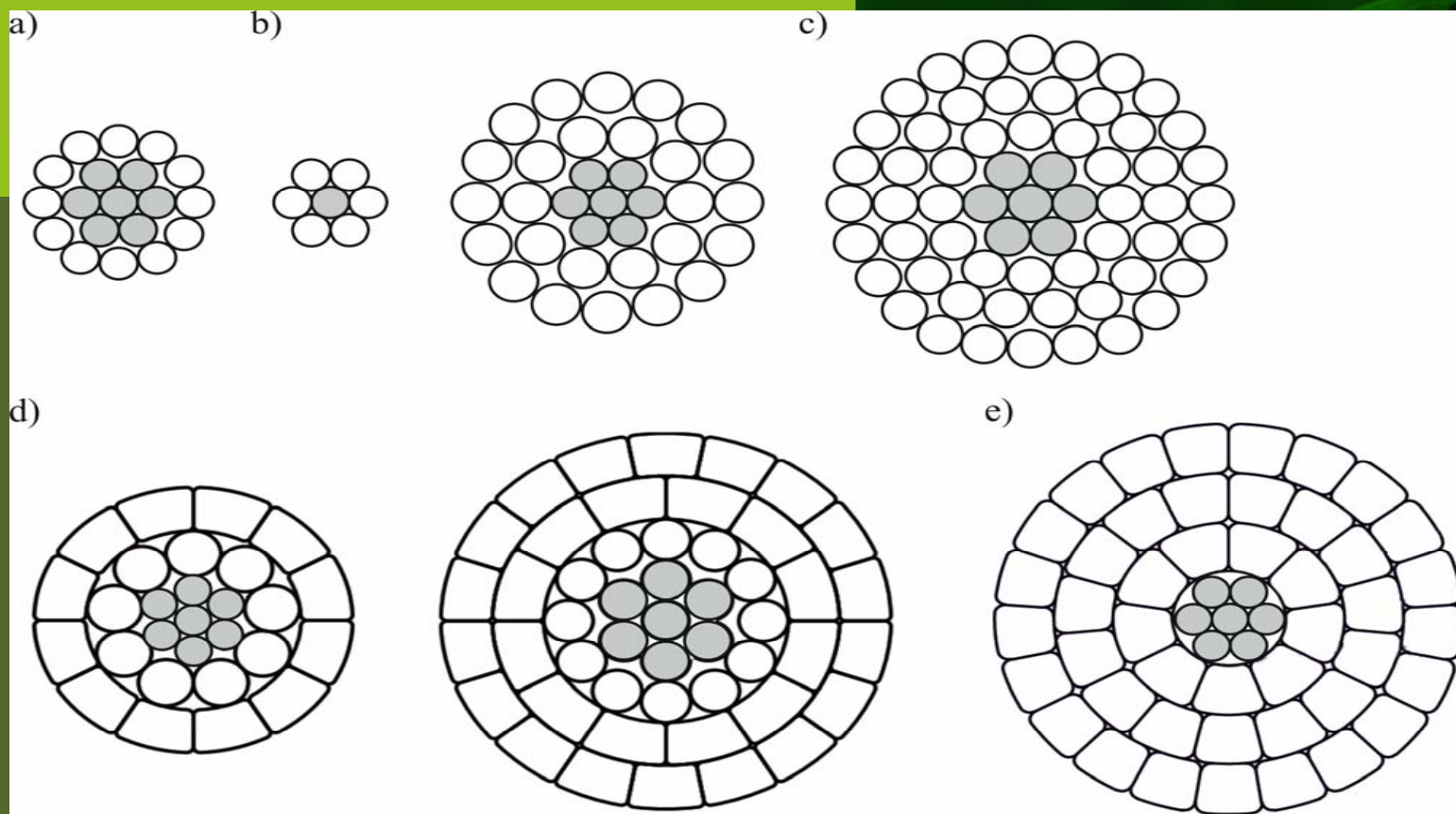


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 39. Przewody stalowo – aluminiowe a) AFL-1,7, b) AFL-6, c) AFL-8, d) przewody segmentowe AFLs-10, e) przewody segmentowe 468/24-A1F/UHST-261 [14,15]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



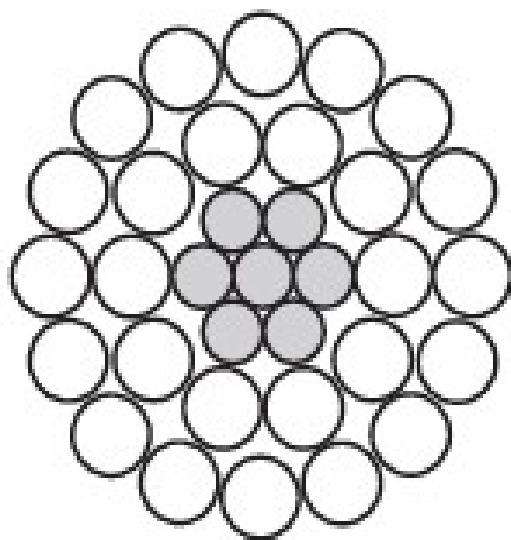
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

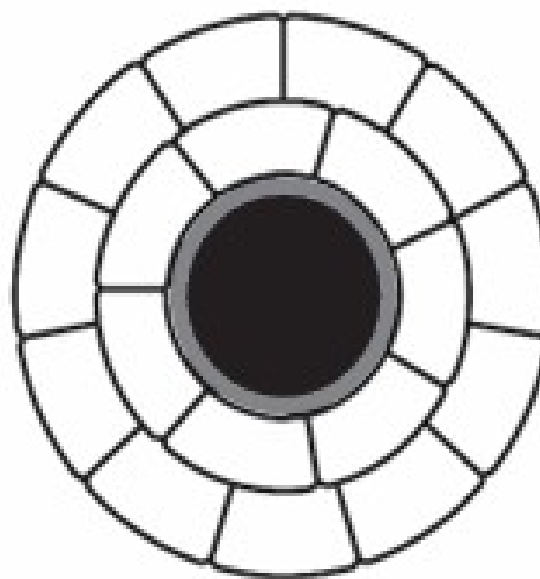


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

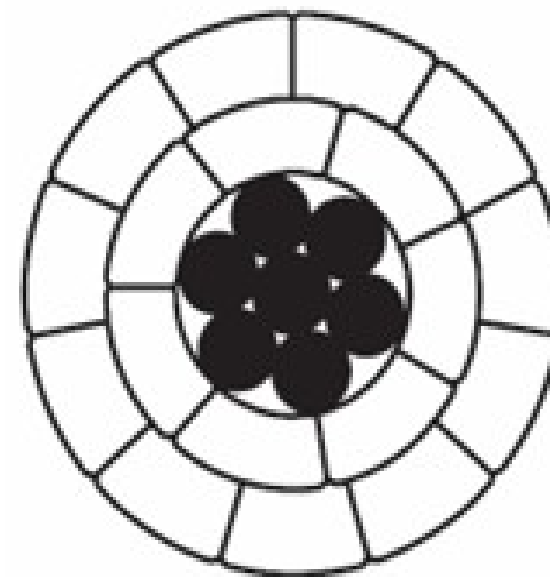
a)



b)



c)



Rys 40. Przewody wysokotemperaturowe HTLS – a) przewody ACSS, b) przewody ACCC, c) przewody ACMCC [16,17]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

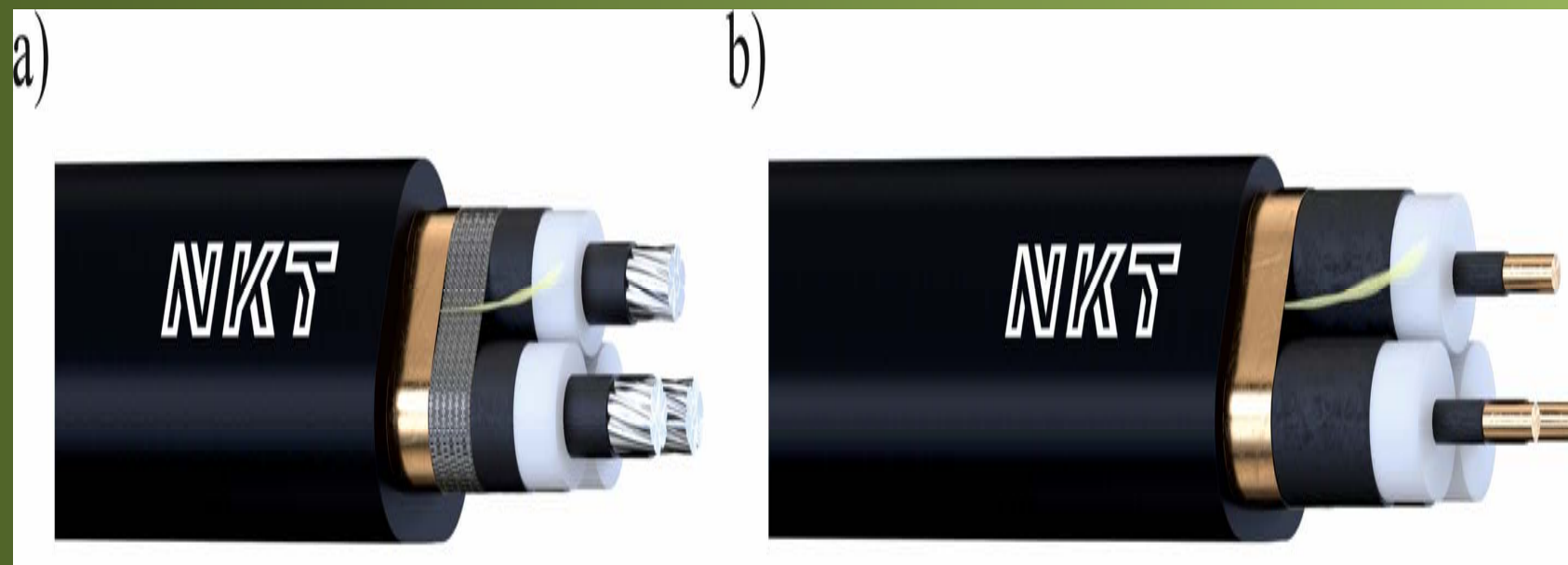


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 41. Kable uniwersalne: a) AXCES, b) EXCEL [18]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

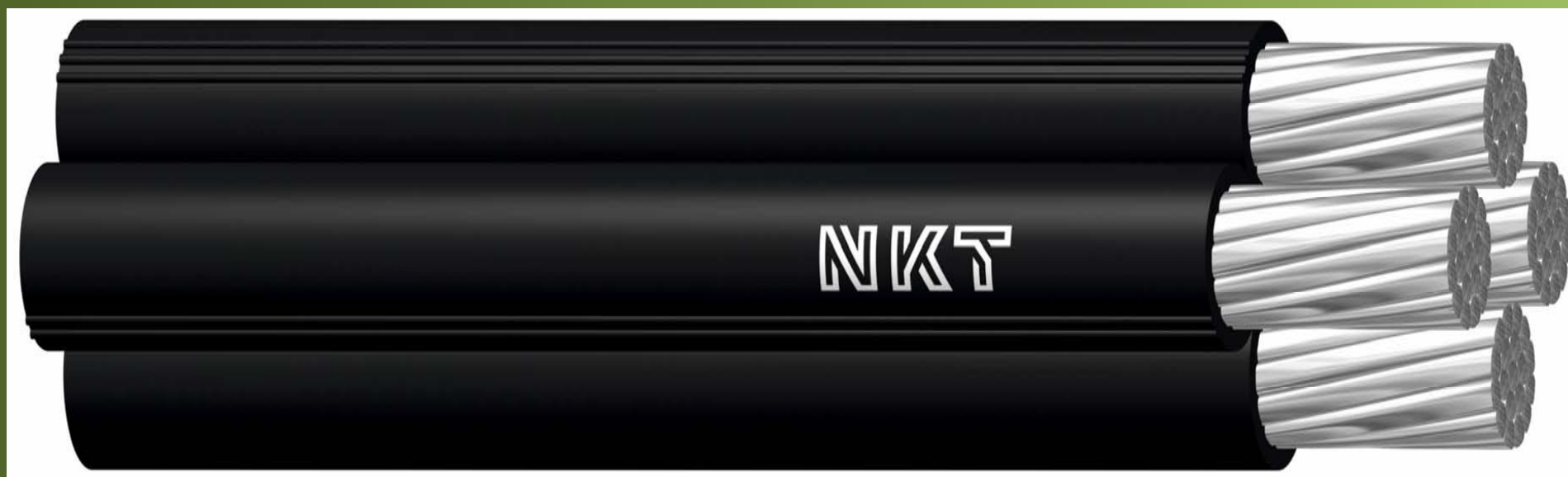


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 42. Przewód samonośny AsXSb [19] stosowany obecnie w liniach niskiego napięcia



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Stosowane do budowy linii napowietrznych konstrukcje wsporcze (słupy) mają różną konstrukcję i wymiary, które zależą m.in. od napięcia znamionowego sieci, warunków terenowych, w których linia przebiega oraz liczby torów. Słupy mogą być wykonane z różnych materiałów takich jak beton czy stal. W wielu krajach (w Polsce w nieznacznym zakresie) stosowane są wciąż słupy drwniane.

Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych możemy podzielić na:

- linie niskiego napięcia – stosuje się żerdzie betonowe żelbetowe oraz strunobetonowe;
- linie średniego napięcia – stosowane są żerdzie betonowe żelbetowe oraz strunobetonowe;
- linie wysokiego napięcia 110 kV – stosowane są słupy kratowe, rurowe oraz strunobetonowe;
- linie najwyższych napięć (220 kV, 400 kV, 750 kV) – stosowane są słupy stalowe kratowe oraz w przypadku linii 220 kV słupy rurowe.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Ze względu na przeznaczenie słupy dzieli się na [20]:

- przelotowe (P), które mają głównie za zadanie podtrzymanie przewodów, bez przejmowania siły ich naciągu;
- narożne (N), które stosowane są tam, gdzie kąt załomu linii przekracza 5° utrzymują przewody i przejmują siłę ich naciągu;
- odporowe (O), których zadaniem jest utrzymanie przewodów i przejmowanie siły ich naciągu, stosowane są tam, gdzie kąt załomu linii nie przekracza 5° ;
- odporowo – narożne (ON), stosowane na załomach linii, pełnią jednocześnie funkcję słupa odporowego i narożnego;
- krańcowe (K), stosowane na początku i na końcu linii, służą do przejmowania siły jednostronnego naciągu przewodów;
- rozgałęźne (R), stosowane w miejscach rozgałęzienia linii, spełniają rolę różnych rodzajów słupów.

Ze względu na liczbę torów słupy dzieli się na :

- jednotorowe, służące do zawieszenia trzech przewodów fazowych i jednego lub dwóch przewodów odgromowych;
- dwutorowe, służące do zawieszenia sześciu przewodów fazowych (dwa tory – trzy przewody fazowe na jeden tor) i zazwyczaj dwóch przewodów odgromowych;
- wielotorowych, służących do zawieszania n przewodów fazowych i zazwyczaj dwóch przewodów odgromowych.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

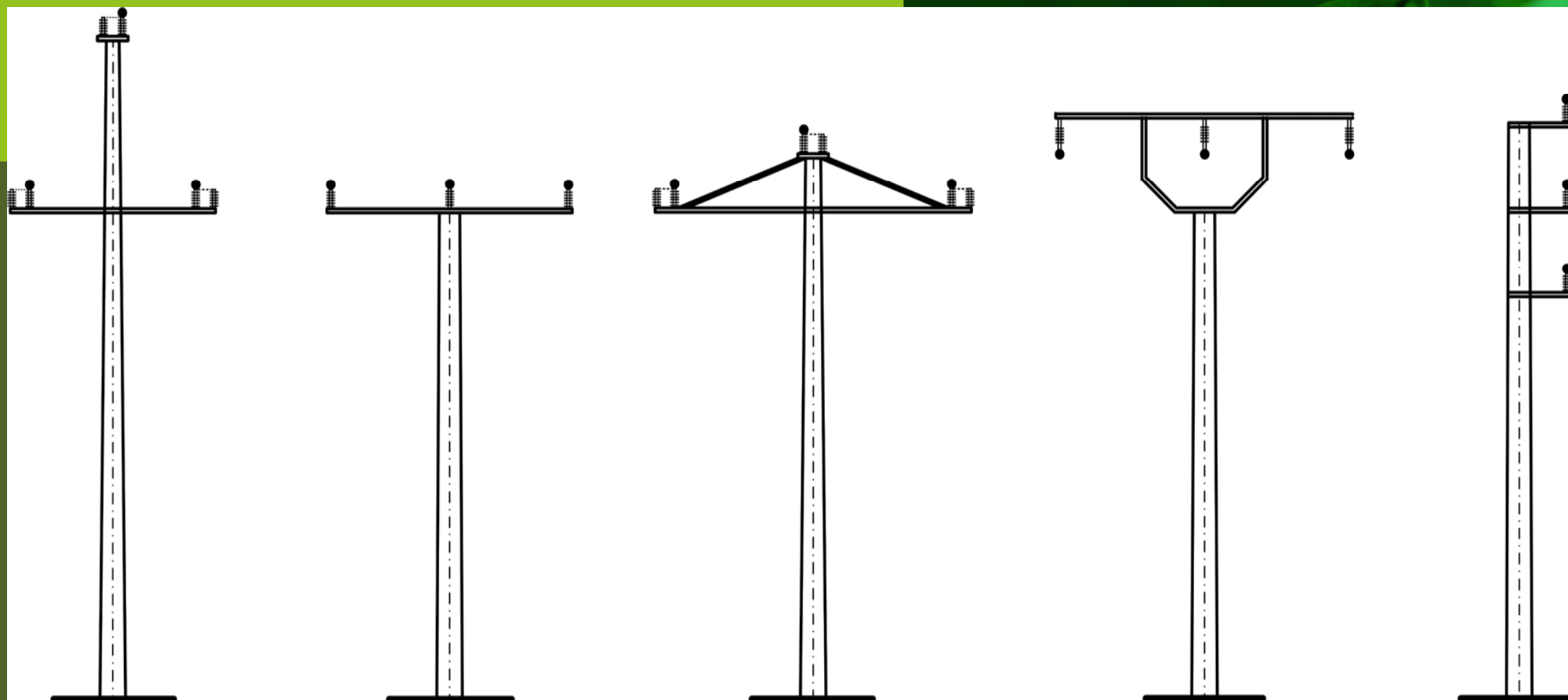


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 43. Sylwetki przykładowych słupów linii elektroenergetycznych SN [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

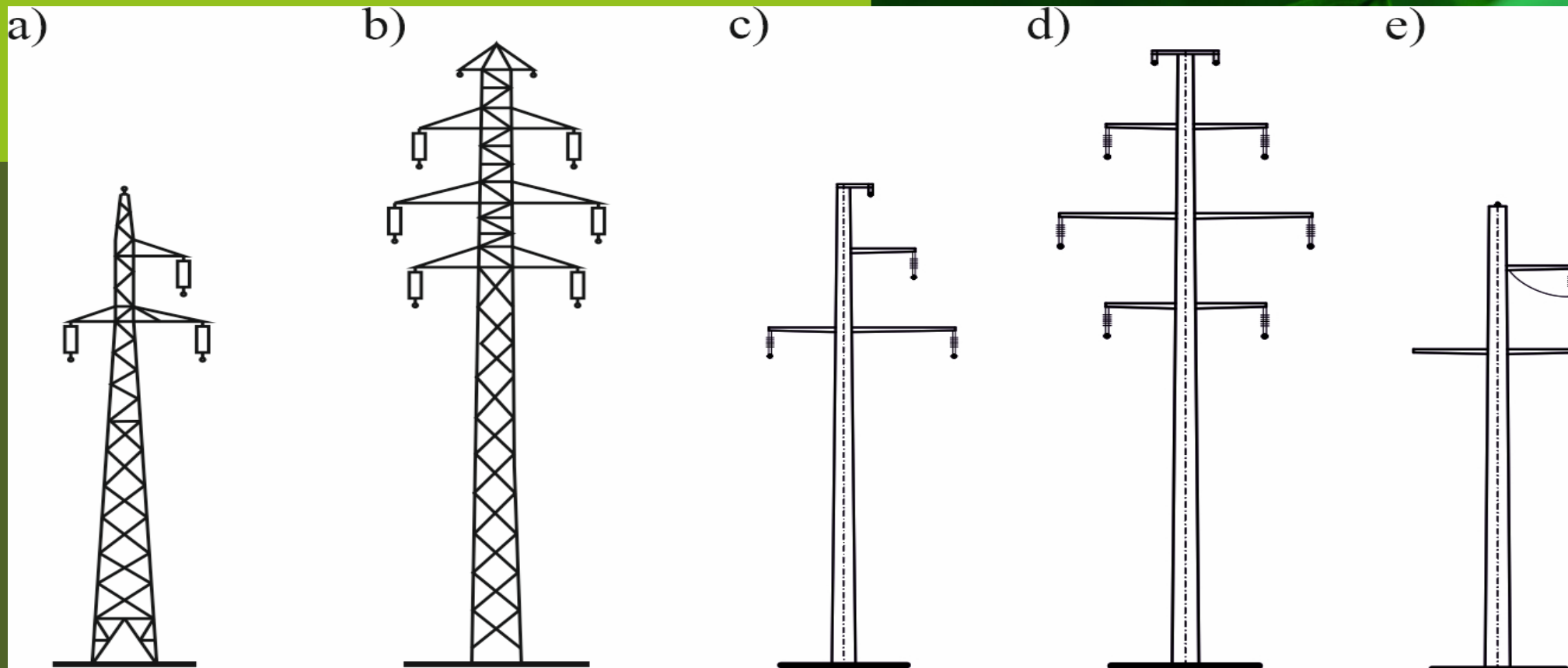


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 44. Sylwetki przykładowych słupów linii elektroenergetycznych 110 kV, a) i b) słupy kratowe c), d) oraz e) słupy strunobetonowe wąskotrzonowe [9,21]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

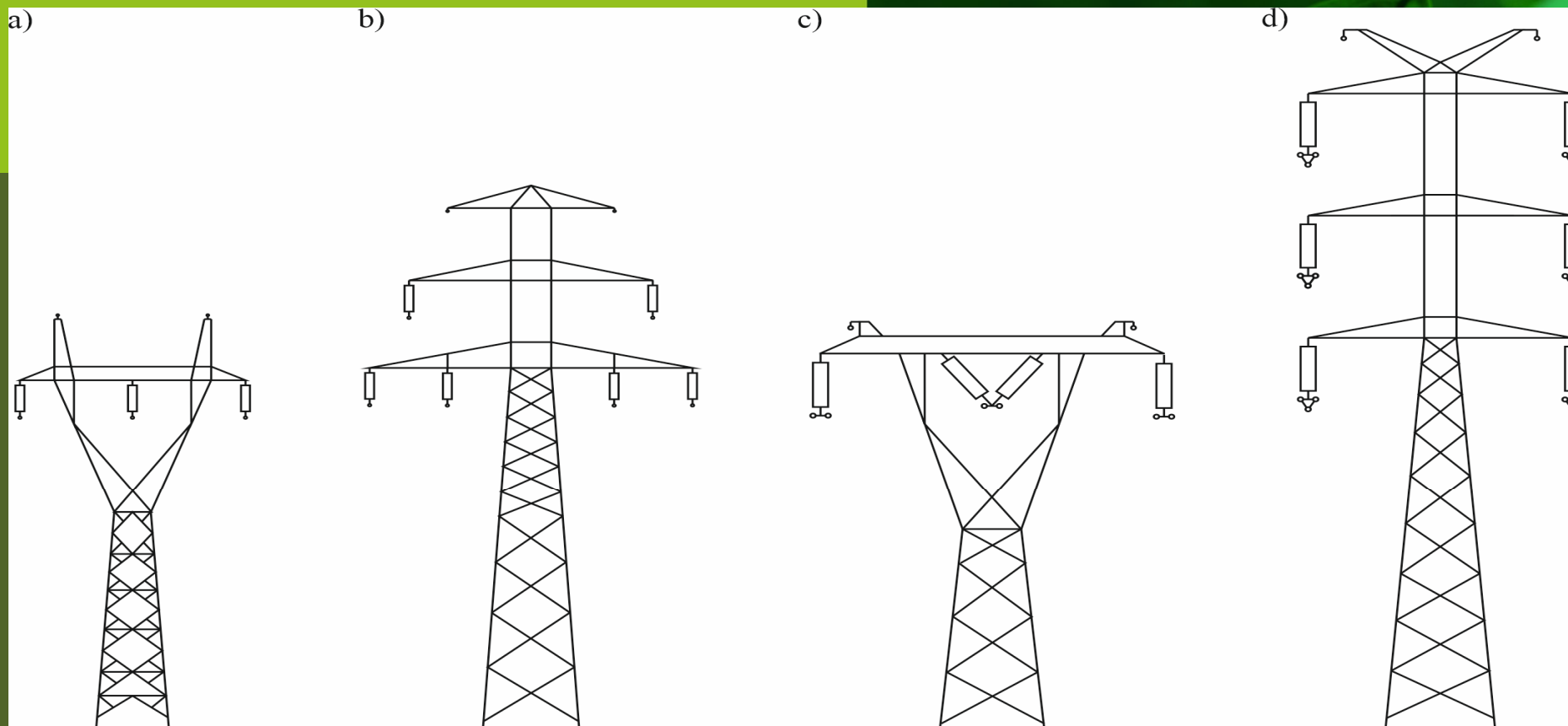


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 45. Sylwetki przykładowych słupów linii elektroenergetycznych a) i b) 220 kV, c) i d) 400 kV [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



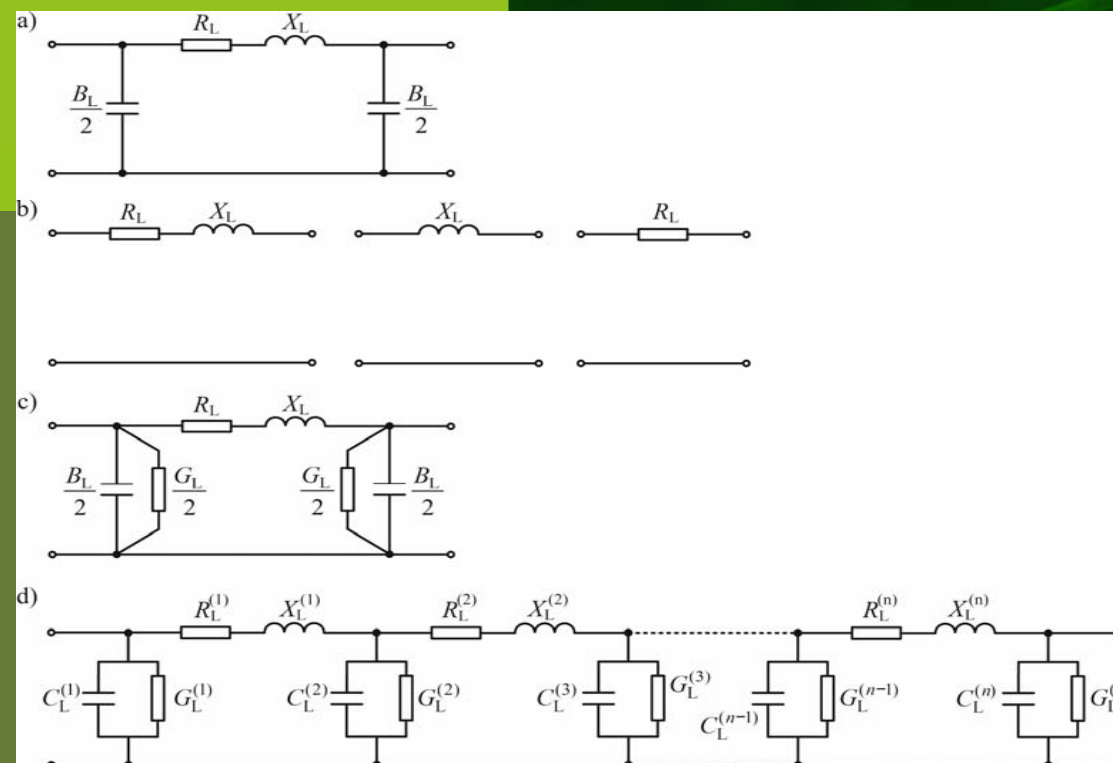
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W obliczeniach sieciowych, w wyniku zastosowanych uproszczeń i przekształceń, podstawowy model linii ma postać czwórnik π o skupionych parametrach podłużnych (rezystancja oraz reaktancja) i parametrze poprzecznym (susceptancja), którego wartość jest rozdzielona po połowie na poszczególne końce modelu (Rys. 46a). W praktyce często stosowane są uproszczenia schematu zastępczego polegające na pominięciu niektórych jego elementów jako mało istotnych. Postać modelu zależy od napięcia znamionowego linii oraz rodzaju prowadzonych obliczeń.



Rys 46. Schematy zastępcze linii elektroenergetycznych: a) podstawowy schemat stosowany w obliczeniach rozptylowych, b) schematy uproszczone stosowane w uproszczonych obliczeniach inżynierskich, c) schemat uwzględniający konduktancję linii, d) schemat linii długiej z zastosowaniem n czwórników elementarnych



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

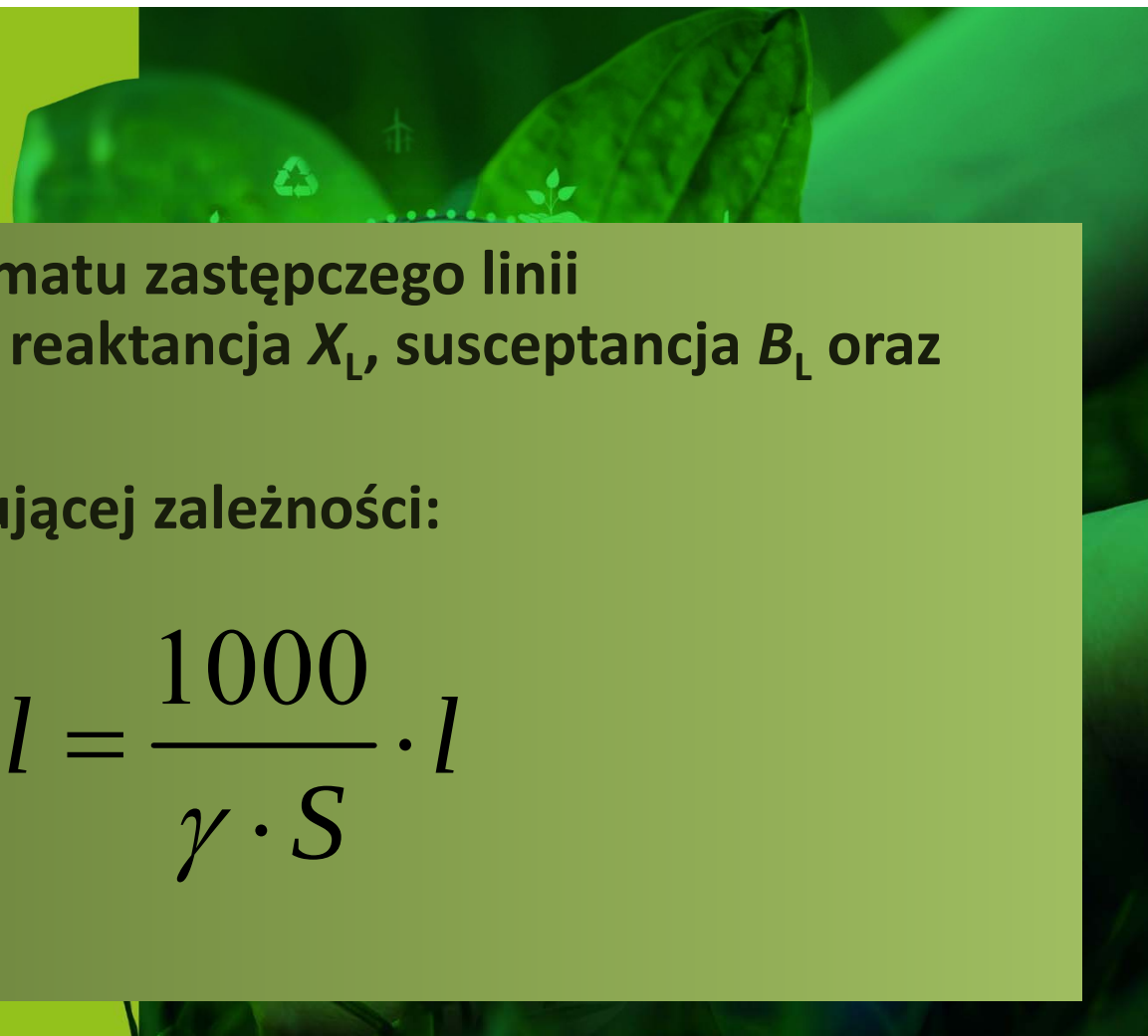


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Z Rys. 46 wynika, że parametrami schematu zastępczego linii elektroenergetycznej są rezystancja R_L , reaktancja X_L , susceptancja B_L oraz konduktancja G_L .

Rezystancję linii wyznacza się z następującej zależności:

$$R_L = R' \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

gdzie:

$R' = \frac{1000}{\gamma \cdot S}$ – rezystancja jednostkowa linii, Ω/km ,

l – długość linii, km,

γ – konduktywność materiału przewodowego, $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$ (dla miedzi, średnio przyjmuje się $55 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$ natomiast dla aluminium $34 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$),

S – przekrój części czynnej przewodów, mm^2 .



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Reaktancję linii wyznacza się z następującej zależności:

$$X_L = X' \cdot l = \omega \cdot L' \cdot l = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \left(\frac{b_{sr}}{r_o} \right) \cdot l$$

gdzie:

X' – reaktancja jednostkowa linii, Ω/km (dla linii napowietrznych średniego i wysokiego napięcia z przewodami gołymi przyjmuje się średnio $0,4 \Omega/\text{km}$, dla linii napowietrznych najwyższych napięć z przewodami gołymi wiązkowymi, średnio przyjmuje się $0,3 \div 0,33 \Omega/\text{km}$, dla linii napowietrznych niskiego napięcia z przewodami gołymi średnio przyjmuje się $0,35 \Omega/\text{km}$, dla linii napowietrznych niskiego napięcia z przewodami izolowanymi średnio przyjmuje się $0,15 \Omega/\text{km}$),



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

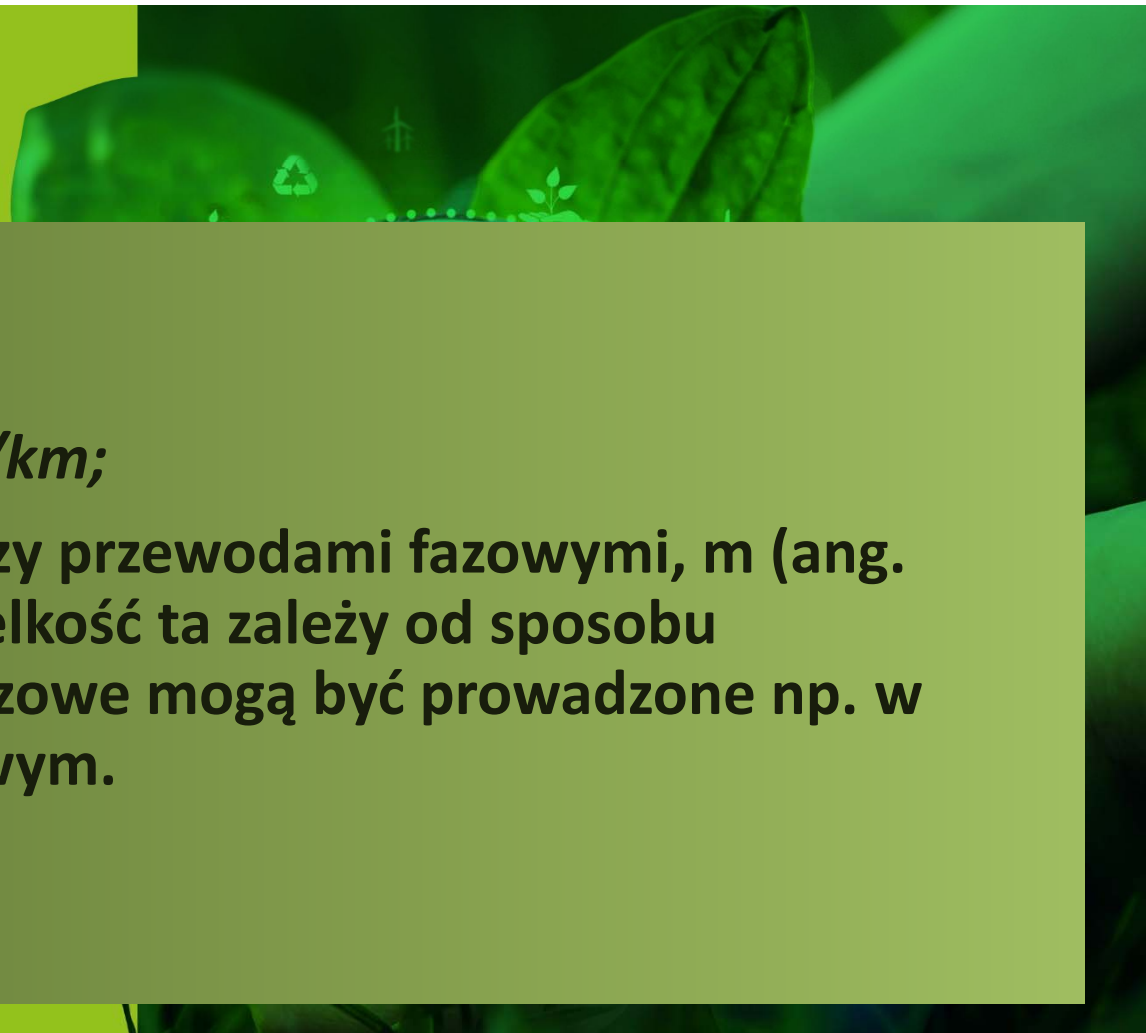


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



l – długość linii, km;

ω – pulsacja prądu przemiennego, 1/s;

L' - indukcyjność robocza jednej fazy, H/km;

b_{sr} – średni geometryczny odstęp między przewodami fazowymi, m (ang. *Geometric Mean Distance – GMD*). Wielkość ta zależy od sposobu prowadzenia przewodów; przewody fazowe mogą być prowadzone np. w układzie płaskim, pionowym, trójkątowym.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



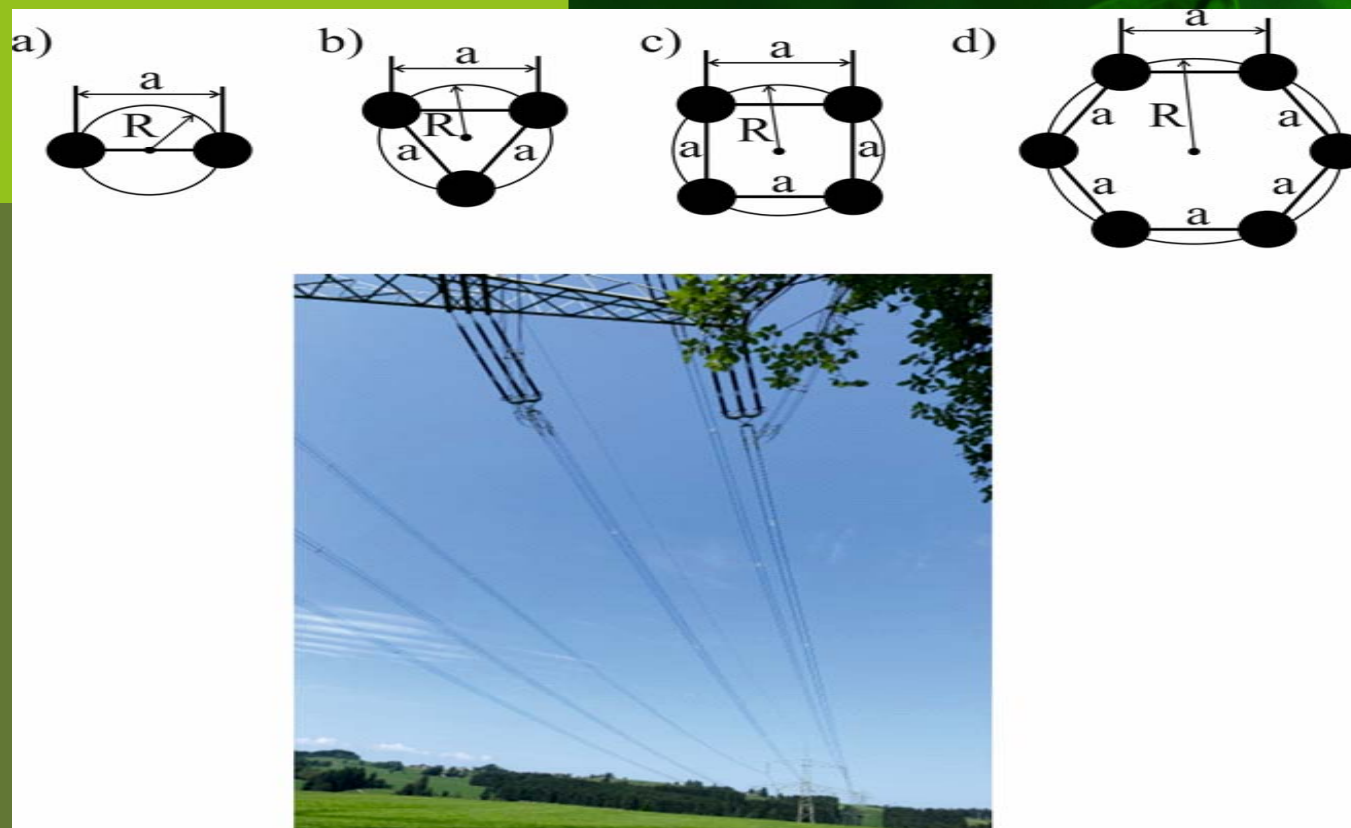
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przewody wiązkowe wpływają na zwiększenie obciążalności prądowej, zmniejszenie ulotu oraz reaktancji jednostkowej linii. Przy wyznaczaniu rezystancji przewodu wiązkowego należy w odpowiedni sposób uwzględnić liczbę przewodów stanowiących wiązkę. Na Rys. 47 przedstawiono przykładowe układy przewodów wiązkowych oraz linię 400 kV z wiązką czteroprzewodową.



Rys 47. Sposoby ułożenia/prowadzenia przewodów w wiązkę oraz przykładowa linia z wiązką czteroprzewodową



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Susceptancję linii wyznacza się z następującej zależności:

$$B_L = B' \cdot l = \omega \cdot C' \cdot l = \omega \cdot \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{b_{sr}}{r_c}} \cdot 10^{-6} \cdot l$$

gdzie:

B' – susceptancja jednostkowa, S/km,

C' – pojemność jednostkowa, F/km,

l – długość linii, km,

b_{sr} – średnia odległość między przewodami,

r_c – całkowity promień przewodu.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



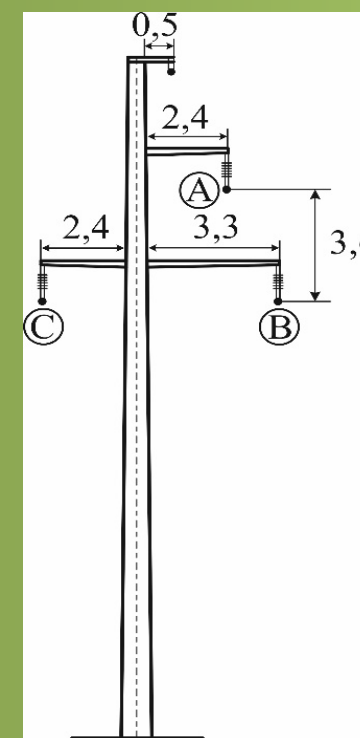
NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 4.

Należy wyznaczyć parametry (R_L , X_L , B_L , G_L) schematu zastępczego linii 110 kV o następujących danych:

- długość linii $l=40$ km,
- przewody linii AFL 6-240,
- $\gamma=34$ m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$),
- $d=21,7$ mm,
- $f=50$ Hz,
- $m_a=0,8$, $m_p=0,83$, $\delta=1$.

Konstrukcja wsporcza (słup), wraz z odpowiednimi wymiarami, została przedstawiona dołączonym rysunku.





Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Rezystancja linii:

$$R' = \frac{1000}{\gamma \cdot S} = \frac{1000}{34 \cdot 240} = 0,123 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_L = R' \cdot l = 0,123 \cdot 40 = 4,92 \Omega$$

Susceptancja linii:

$$B' = \omega \cdot \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{b_{sr}}{r}} \cdot 10^{-6} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{5,025}{10,85 \cdot 10^{-3}}} \cdot 10^{-6} = 2,847 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

$$B = B' \cdot l = 2,847 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 113,9 \mu\text{S}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Reaktancja linii:

$$X' = \omega \cdot L' = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{b_{sr}}{0,8116 \cdot r_c} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{b_{sr}}{0,8116 \cdot r_c}$$

$$b_{AB} = \sqrt{3,6^2 + (3,3 - 2,4)^2} = 3,711 \text{ m},$$

$$b_{BC} = 2,4 + 3,3 = 5,7 \text{ m},$$

$$b_{CA} = \sqrt{3,6^2 + (2,4 + 2,4)^2} = 6 \text{ m}$$

$$b_{sr} = \sqrt[3]{b_{AB} \cdot b_{BC} \cdot b_{CA}} = \sqrt[3]{3,711 \cdot 5,7 \cdot 6} = 5,025 \text{ m}$$

$$r_c = \frac{d}{2} = \frac{21,7 \cdot 10^{-3}}{2} = 10,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$X' = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{5,025}{0,8116 \cdot 10,85 \cdot 10^{-3}} = 0,399 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$X_L = X' \cdot l = 0,399 \cdot 40 = 15,951 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Konduktancja linii:

$$G_L = G' \cdot l = \frac{\Delta P'}{U_f^2} \cdot l, \text{ S}$$

Napięcie krytyczne ulotu:

$$U_{fkr} = 48,9 \cdot m_a \cdot m_p \cdot \delta \cdot r_c \cdot \log \frac{b_{sr}}{r_c}$$

$$U_{fkr} = 48,9 \cdot 0,8 \cdot 0,83 \cdot 1 \cdot 1,085 \cdot \log \frac{502,5}{1,085} = 93,91 \text{ kV}$$

$$U_{fkr} = 93,91 \text{ kV} > U_f = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,51 \text{ kV} \Rightarrow G_L = 0$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

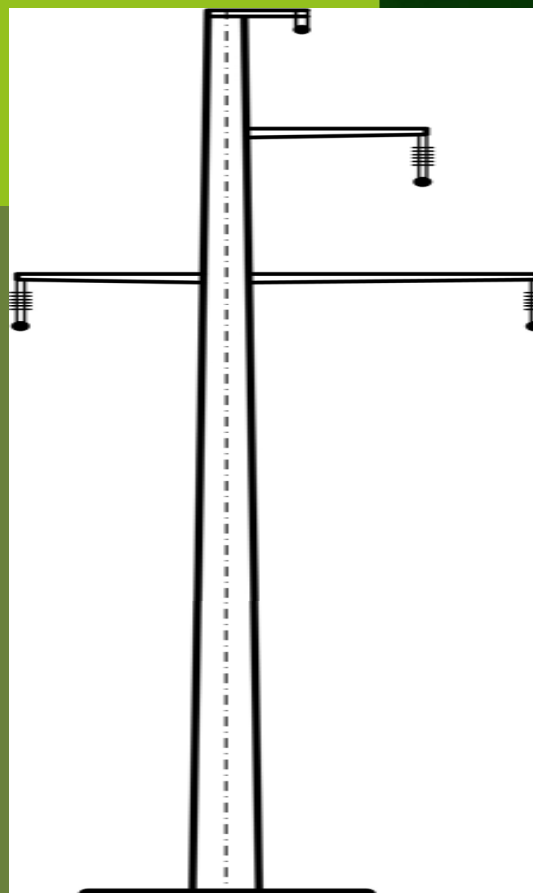


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 48. Słup przelotowy strunobetonowy linii 110 kV [22,23]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

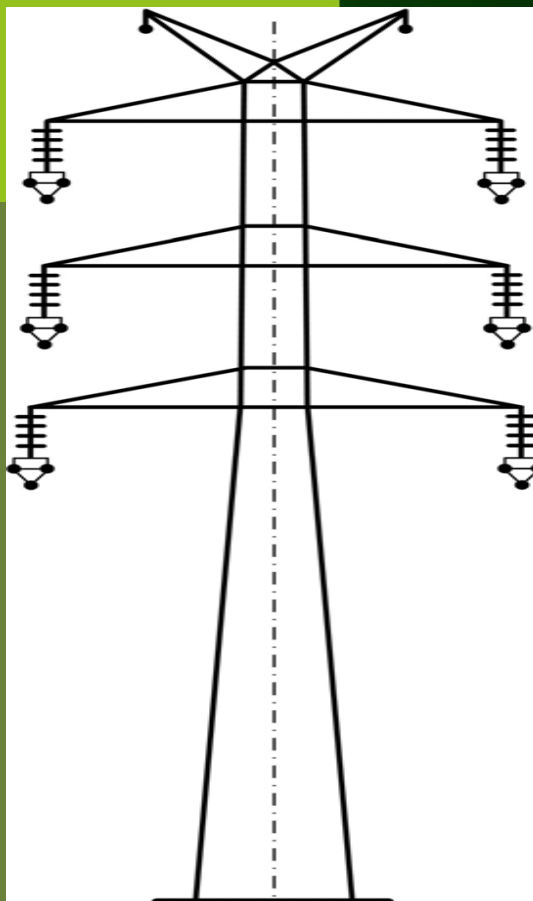


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 49. Słup linii dwutorowej 400 kV [24,25]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

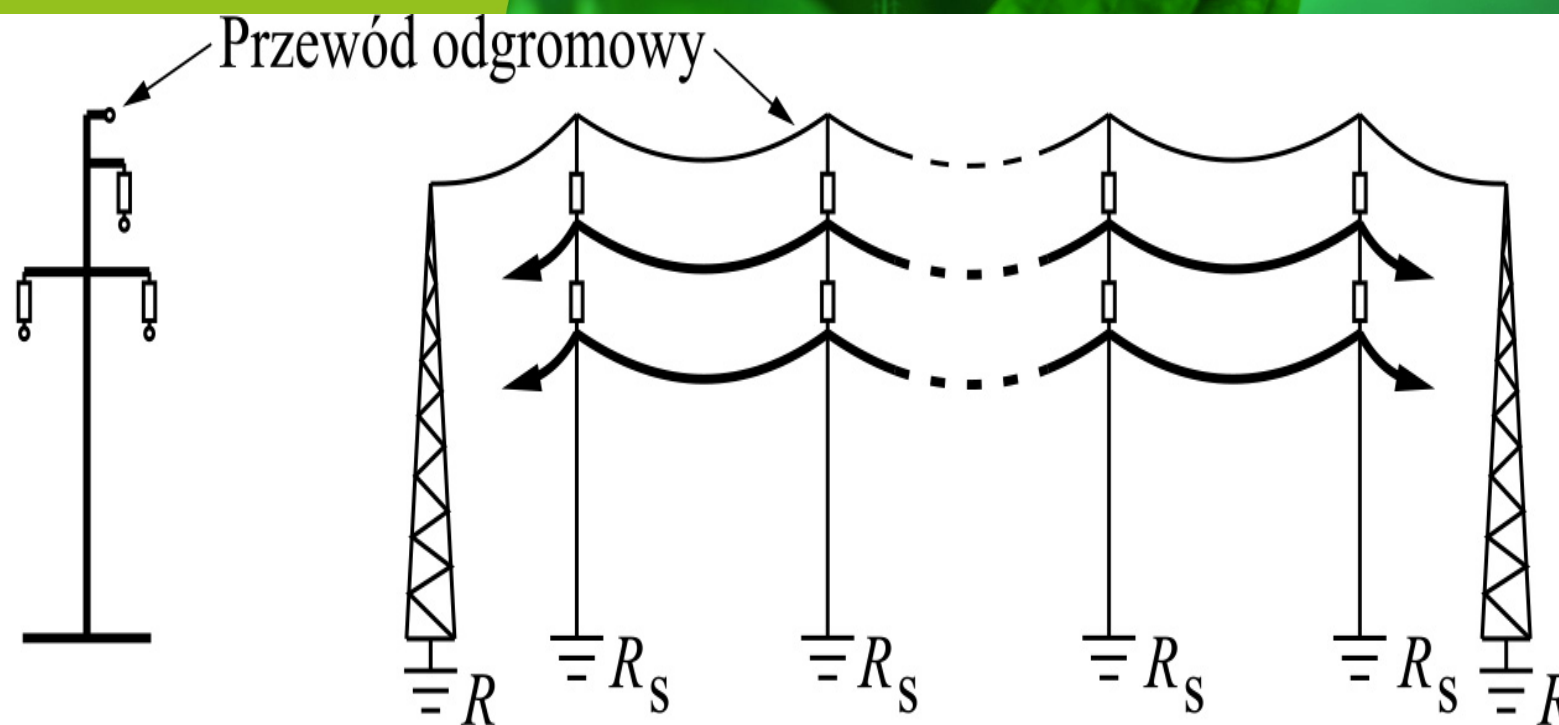


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 50. Usytuowanie i sposób uziemienia przewodu odgromowego napowietrznej linii elektroenergetycznej [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Impedancja jednostkowa własna obwodu ziemnopowrotnego w Ω/km :

$$\underline{W}_j = \rho_p + 10^{-3} f + j4\pi \cdot 10^{-4} f \ln \frac{D_n}{r_0}$$

Impedancja jednostkowa wzajemna dwóch obwodów ziemnopowrotnych w Ω/km :

$$\underline{M}_j = 10^{-3} f + j4\pi \cdot 10^{-4} f \ln \frac{D_n}{D}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

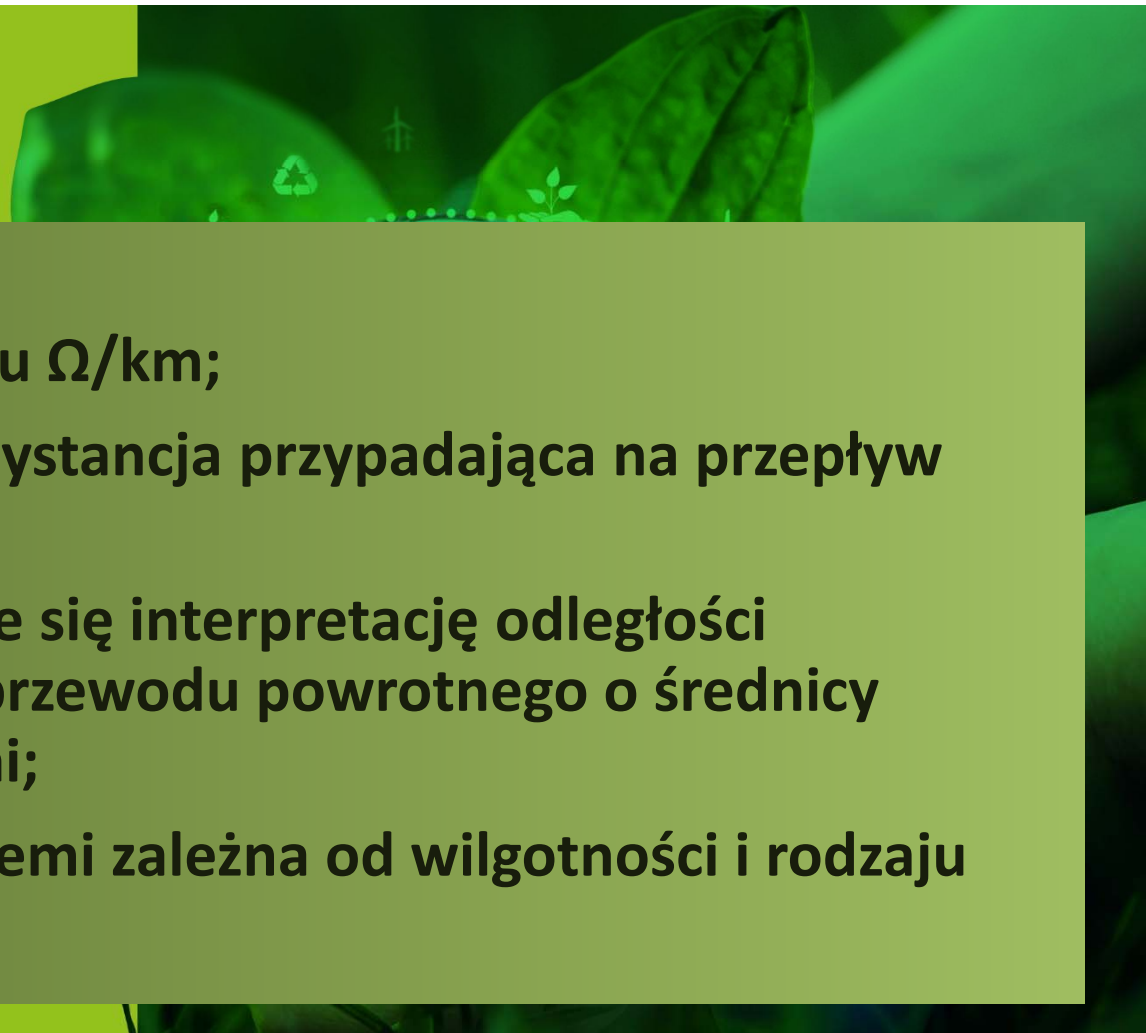


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Gdzie:

ρ_p - rezystancja jednostkowa przewodu Ω/km ;

$10^{-3}f$ - składnik interpretowany jako rezystancja przypadająca na przepływ prądu w ziemi Ω/km ;

$D_n = 660\sqrt{\rho_n / f}$ - składnik, któremu nadaje się interpretację odległości rozważanego przewodu od fikcyjnego przewodu powrotnego o średnicy jednego metra znajdującego się w ziemi;

$\rho_n = 100 \div 1500 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ - rezystywność ziemi zależna od wilgotności i rodzaju gruntu.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 5.

Dla obwodu ziemnopowrotnego wykonanego przewodem AFL6 240 należy wyznaczyć jednostkową impedancję własną dla trzech przypadków rezystywności gruntu $\rho_n = 100, 500, 1000 \Omega \cdot m$, oraz jednostkową impedancję wzajemną z obwodem przebiegającym w odległości $D = 2,5, 5$ oraz 10 metrów.

$$D_n = 660 \cdot \sqrt{\frac{500}{50}} = 2087 \text{ m}$$

$$r = \sqrt{\frac{240 \cdot (1 + 1/6)}{\pi}} = 9,44 \text{ mm}$$

$$\underline{W}_j = \frac{1000}{35 \cdot 240} + 10^{-3} \cdot 50 + j4\pi \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot \ln \frac{2087}{0,81 \cdot 9,44 \cdot 10^{-3}} = 0,169 + j0,786 \Omega/km$$

$$\underline{M}_j = 10^{-3} \cdot 50 + j4\pi \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot \ln \frac{2087}{5} = 0,050 + j0,379 \Omega/km$$

Tabela 1. Wartości jednostkowej impedancji własnej i wzajemnej obwodów ziemnopowrotnych wykonanych przewodem AFL6 240 dla różnych rezystywności gruntu i odległości między przewodami, wyrażone w Ω/km

Rezystywność, $\Omega \cdot m$	Odległość między przewodami, m		
	2,5	5	10
100	0,169 + j0,735	0,169 + j0,735	0,169 + j0,735
	0,050 + j0,372	0,050 + j0,328	0,050 + j0,285
500	0,169 + j0,786	0,169 + j0,786	0,169 + j0,786
	0,050 + j0,422	0,050 + j0,379	0,050 + j0,335
1000	0,169 + j0,808	0,169 + j0,808	0,169 + j0,808
	0,050 + j0,444	0,050 + j0,400	0,050 + j0,357



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

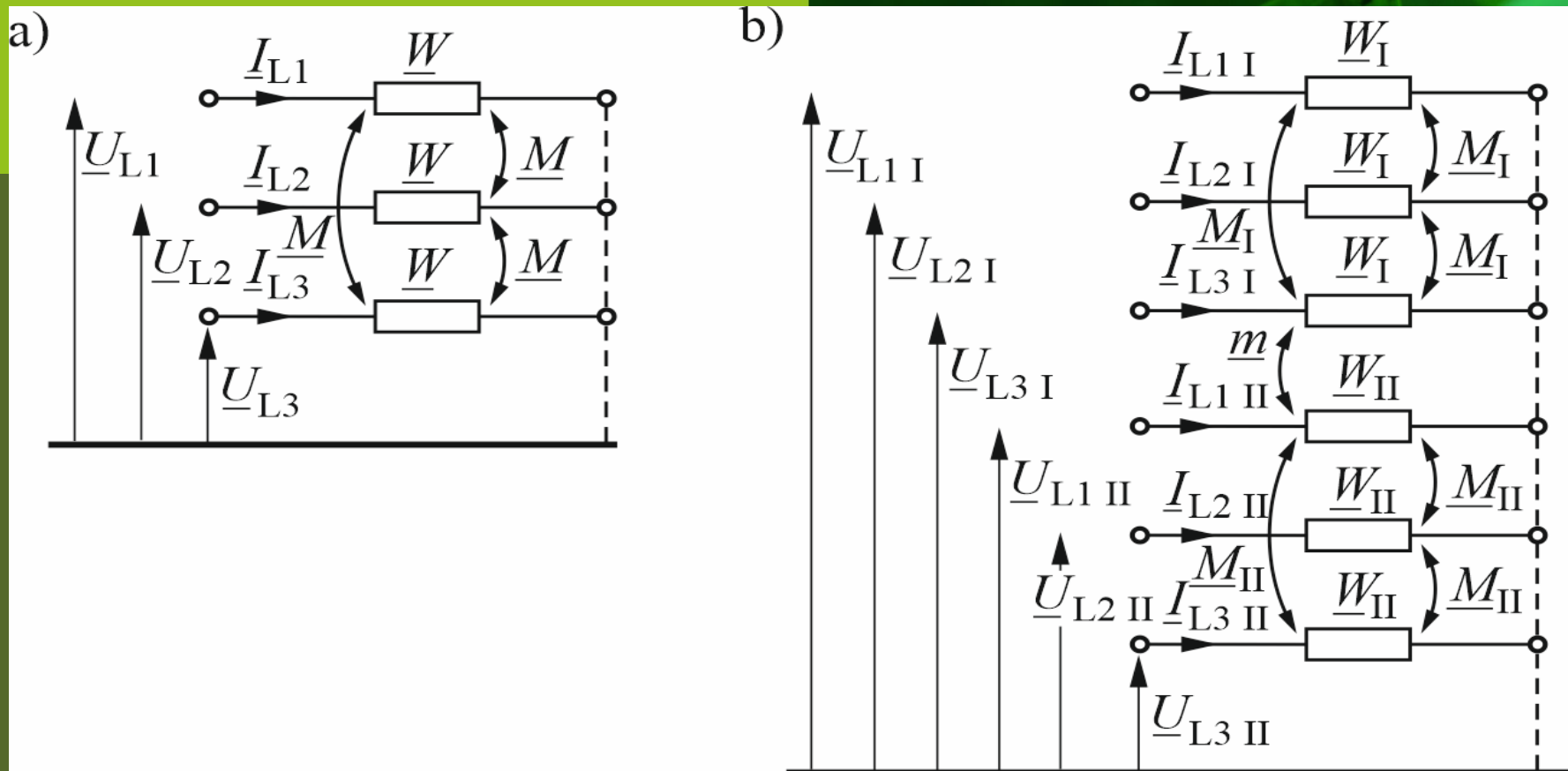


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 51. Układy do analizy parametrów linii: a) jednotorowej, b) dwutorowej [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Linie dwutorowe opisane są równaniem:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1I} \\ \underline{U}_{L2I} \\ \underline{U}_{L3I} \\ \underline{U}_{L1II} \\ \underline{U}_{L2II} \\ \underline{U}_{L3II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_I & \underline{M}_I & \underline{M}_I & \underline{m} & \underline{m} & \underline{m} \\ \underline{M}_I & \underline{W}_I & \underline{M}_I & \underline{m} & \underline{m} & \underline{m} \\ \underline{M}_I & \underline{M}_I & \underline{W}_I & \underline{m} & \underline{m} & \underline{m} \\ \underline{m} & \underline{m} & \underline{m} & \underline{W}_{II} & \underline{M}_{II} & \underline{M}_{II} \\ \underline{m} & \underline{m} & \underline{m} & \underline{M}_{II} & \underline{W}_{II} & \underline{M}_{II} \\ \underline{m} & \underline{m} & \underline{m} & \underline{M}_{II} & \underline{M}_{II} & \underline{W}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1I} \\ \underline{I}_{L2I} \\ \underline{I}_{L3I} \\ \underline{I}_{L1II} \\ \underline{I}_{L2II} \\ \underline{I}_{L3II} \end{bmatrix}$$

przy czym $\underline{m}$ jest średnią impedancją wzajemną pomiędzy obwodami ziemnopowrotnymi należącymi do obydwu torów



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na impedancję linii napowietrznej otrzymuje się następujące wzory:

- Impedancja zgodna:

$$\underline{Z}_1 = \left(\rho_p + j4\pi \cdot 10^{-4} f \ln \frac{D}{r_0} \right) l$$

- Impedancja zerowa:

$$\underline{Z}_0 = \left(\rho_p + 3 \cdot 10^{-3} f + j4\pi \cdot 10^{-4} f \ln \frac{D_n^3}{r_0 D^2} \right) l$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- Impedancja zerowa wzajemna torów:

$$\underline{Z}_{0M} = \left(3 \cdot 10^{-3} f + j4\pi \cdot 10^{-4} f \ln \frac{D_n^3}{D_M^3} \right) l$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 6.

Należy wyznaczyć impedancję zgodną i zerową linii wykonanej przewodami AFL6 240 mm² przy założeniu, że średnia odległość pomiędzy przewodami fazowymi wynosi 5 m, a rezystywność gruntu wynosi $\rho_n = 100 \Omega \cdot \text{m}$. Należy wykorzystać wzory na impedancję własną i wzajemną obwodów ziemnopowrotnych, pominąć wpływ przewodów odgromowych. Długość linii wynosi 50 km.

$$D_n = 660 \cdot \sqrt{\frac{100}{50}} = 933 \text{ m}$$

$$\underline{W} = \underline{W}_j \cdot 50 = \left(\frac{1000}{35 \cdot 240} + 10^{-3} \cdot 50 + j4\pi \cdot 50 \cdot 10^{-4} \ln \frac{933}{7,65 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 50 = 8,45 + j36,80 \Omega$$

$$\underline{M} = \underline{M}_j \cdot 50 = \left(10^{-3} \cdot 50 + j4\pi \cdot 50 \cdot 10^{-4} \ln \frac{933}{5} \right) \cdot 50 = 2,5 + j16,42 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

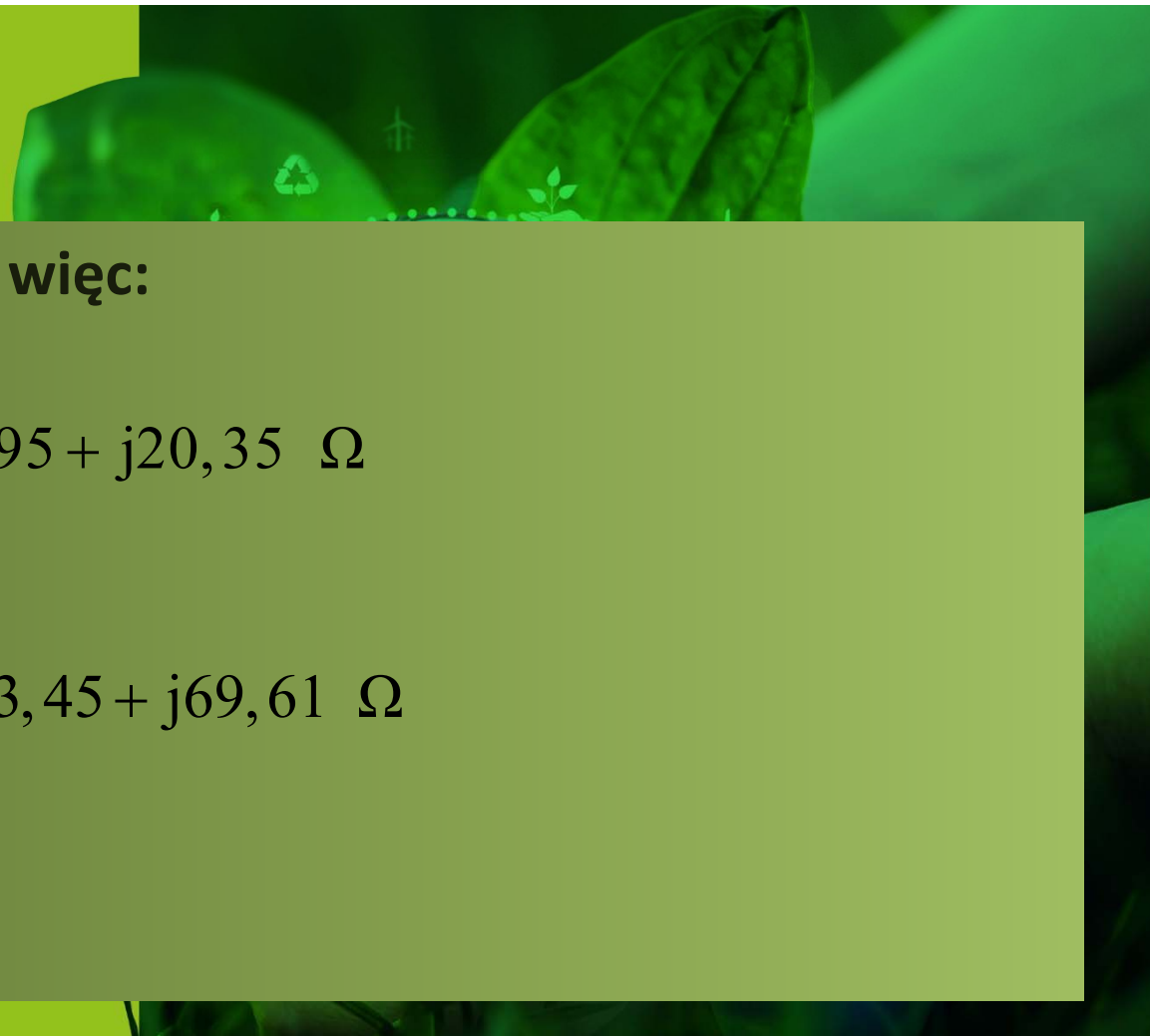


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Poszukiwane impedancje linii wynoszą więc:

- zgodna:

$$\underline{Z}_1 = \underline{W} - \underline{M} = 5,95 + j20,35 \ \Omega$$

- zerowa:

$$\underline{Z}_0 = \underline{W} + 2\underline{M} = 13,45 + j69,61 \ \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

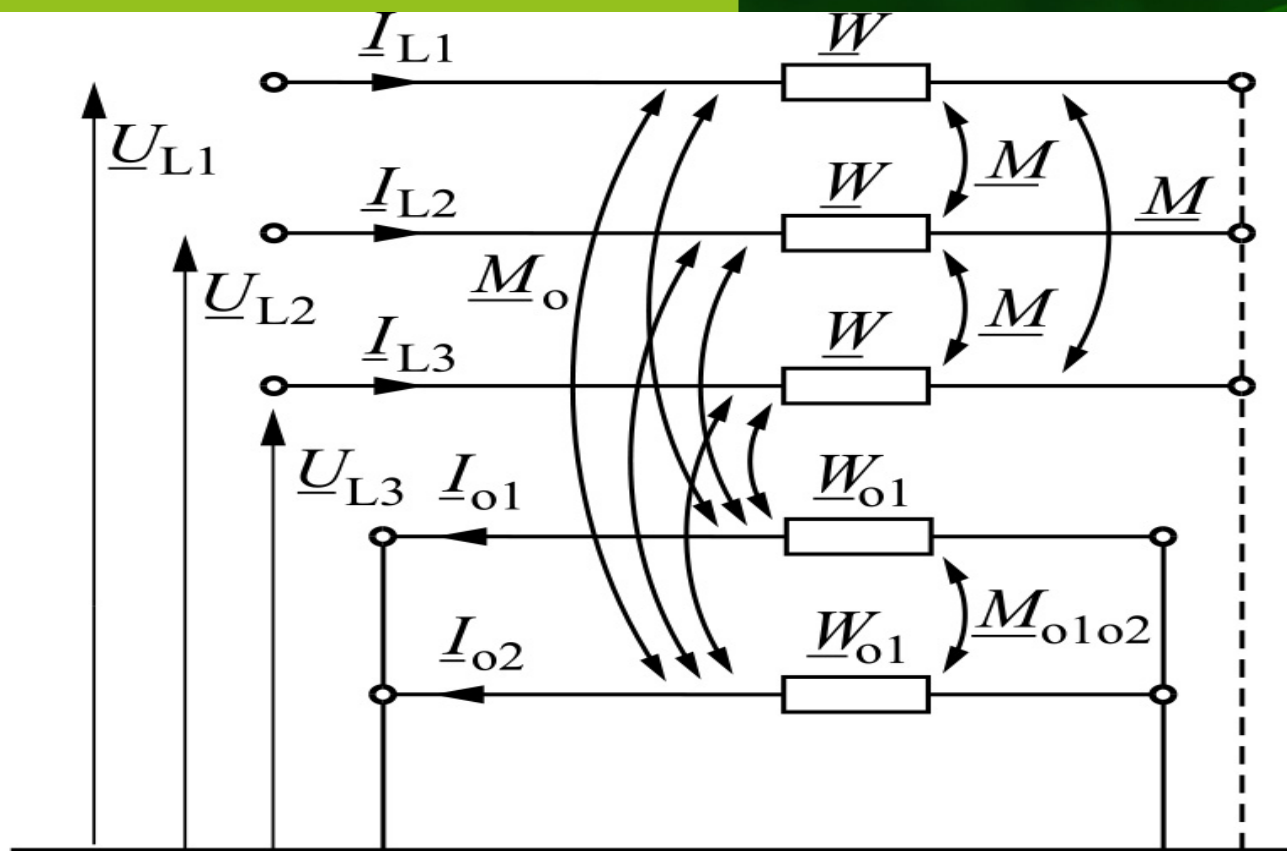


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 52. Układy do analizy parametrów linii z przewodami odgromowymi [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Prądy w przewodach odgromowych, a dokładniej prądy indukowane w utworzonych przez nie zamkniętych pętlach ziemnopowrotnych wpływają na zmniejszenie impedancji obwodów ziemnopowrotnych przewodów roboczych. Należy wówczas uwzględnić poprawkę, przy czym:

$$\Delta \underline{Z}_0 = \frac{6 \underline{M}_0^2}{\underline{W}_0 + \underline{M}_{00}}$$

$$\Delta \underline{W} = \Delta \underline{M} = \frac{2 \underline{M}_0^2}{\underline{W}_0 + \underline{M}_{00}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W przypadku linii z jednym przewodem odgromowym poprawka ΔZ_0 ma wówczas postać:

$$\Delta Z_0 = \frac{3 \underline{M}_0^2}{\underline{W}_0}$$

Oczywiście w liniach dwutorowych przewody odgromowe także wpływają na zmniejszenie impedancji zerowych, a impedancje zgodna i przeciwna pozostają bez zmian.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



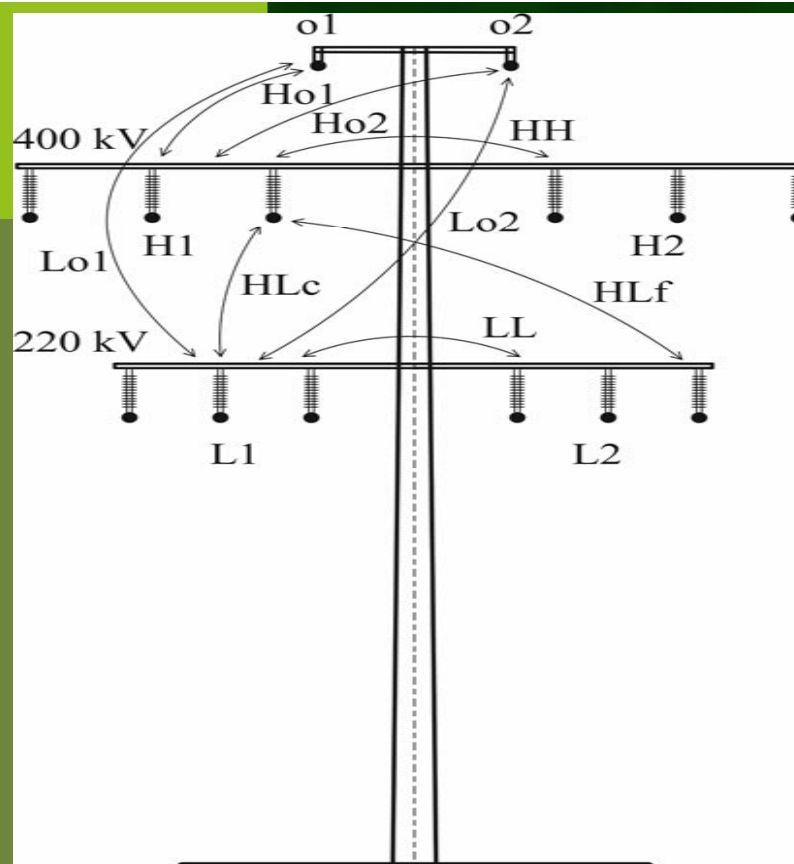
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Z uwagi na brak terenów pozwalających na budowę nowych linii napowietrznych obserwuje się tendencję umieszczania na jednej konstrukcji wsporczej więcej niż jednego toru. Linie dwutorowe są szeroko rozpowszechnione, ale spotyka się również rozwiązania o większej liczbie torów (3,4,5 lub 6). Najczęściej tory te nie należą do linii o tym samym napięciu znamionowym. Jedną z bardziej znanych linii wielotorowych w Polsce jest czterotorowa linia Kromolice – Plewiska składająca się z dwóch torów o napięciu 400 kV i dwóch torów o napięciu 220 kV.



Rys 53. Uproszczona sylwetka słupa linii czterotorowej (2x 400 kV i 2x 220 kV z zaznaczonymi oddziaływaniami wzajemnymi [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Mając na uwadze analizę czułości zabezpieczeń i wymagania ochrony przeciwporażeniowej, w sieciach nn rozpatrywane jest najczęściej zwarcie między przewodem fazowym a przewodem PEN (rys. 54), jest to oczywiście zwarcie niesymetryczne, a dla pętli, w której przepływa prąd zwarcia zasilanej napięciem $U_f = U_n / \sqrt{3}$ można zapisać równanie pomijające uziemienia (rys.54a):

$$U_f = (\underline{Z}_W - \underline{Z}_M) \cdot \underline{I}_P + (\underline{Z}_N - \underline{Z}_M) \cdot \underline{I}_P \approx 2\underline{Z}_{1L} \cdot \underline{I}_P$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



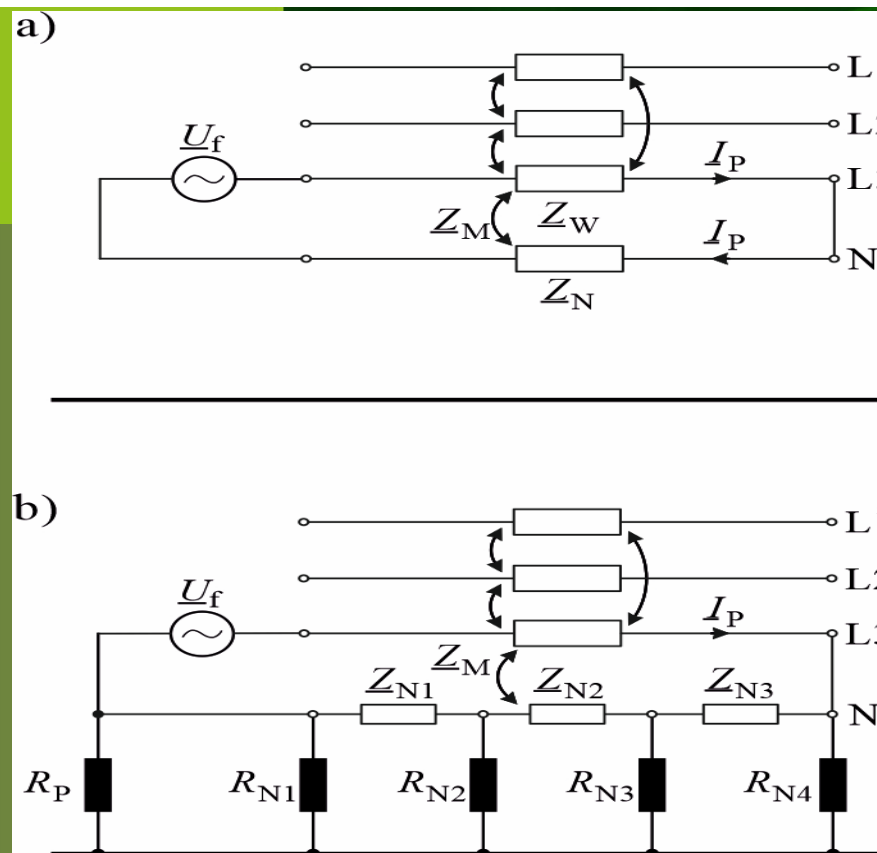
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W liniach napowietrznych niskiego napięcia spotykanych głównie poza miastami występują cztery przewody. Oprócz przewodów fazowych zawierają one przewód ochronno – neutralny, oznaczany jako PEN. Z uwagi na wymagania ochrony przeciwporażeniowej przewód ten jest wielokrotnie uziemiany m.in. w miejscach rozgałęzień, w stacji SN/nN oraz w złączach.



Rys 54. Zwarcie w linii czteroprzewodowej niskiego napięcia między przewodem fazowym a przewodem PEN: a) przewód PEN nieziemiony, b) przewód PEN uziemiony w kilku miejscach [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

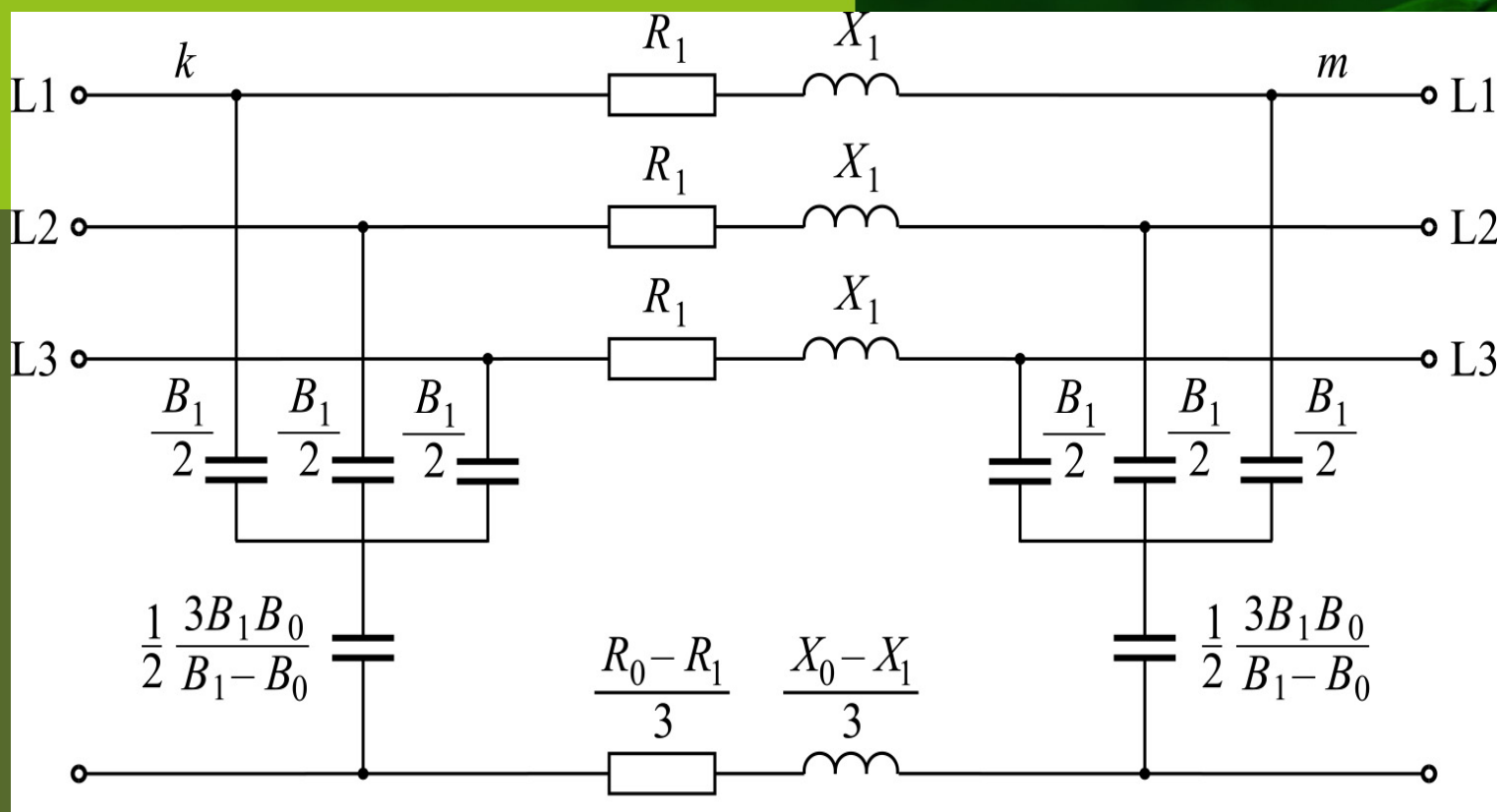


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 55. Model trójfazowy linii elektroenergetycznej (poprzez zastosowanie fikcyjnego przewodu powrotnego i parametrów dla składowych symetrycznych wyeliminowane są sprzężenia elektromagnetyczne pomiędzy przewodami fazowymi) [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Do celów obliczeniowych można wykorzystać następujące wzory na pojemność linii:

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{\frac{10^{-3}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2hD}{rH}} \approx \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{D}{r}}$$

$$C_0 = \frac{1}{\frac{10^{-3}}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2hH^2}{rD^2}} \approx \frac{1}{18 \cdot \ln \frac{8h^3}{rD^2}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

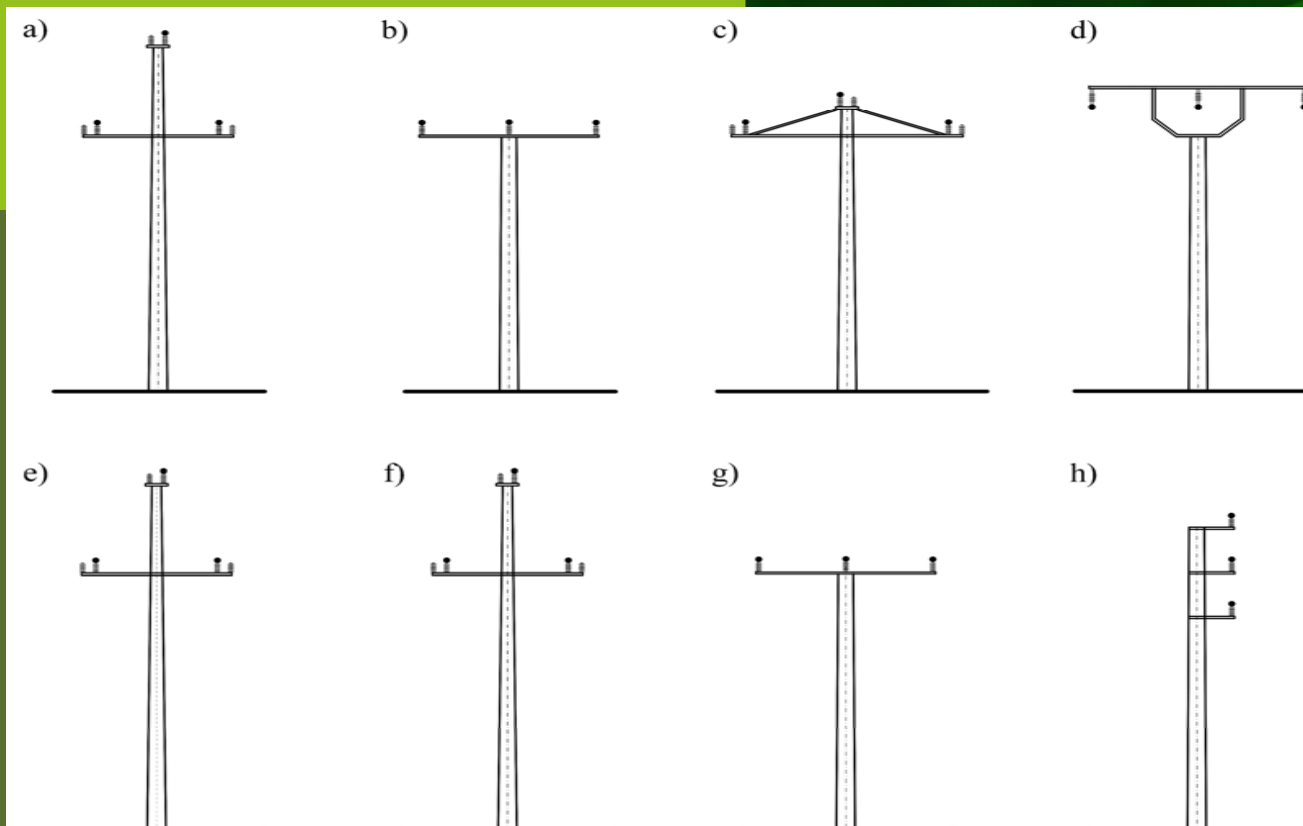


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 56. Sylwetki typowych słupów linii napowietrznych średniego napięcia wykonanych za pomocą żerdzi wirowanych. Słupy oznaczone jako g) oraz h) przeznaczone są dla linii wykonanych przewodami izolowanymi w systemie PAS [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Linie kablowe stosowane są w sieciach o różnych poziomach napięć. Składają się z kabli zawierających żyły robocze (miedziane lub aluminiowe), muf, głowic, a także złączy kablowych. Izolacja stosowana obecnie do budowy kabli wykonywana jest głównie z tworzyw sztucznych, takich jak:

- Polietylen (PE);
- Polichlorek winylu (polwinit – PVC);
- Guma etylenowo – propylenowa (EPR);
- Polietylen sieciowany (XLPE);

Widok przykładowych kabli nN, SN oraz WN wraz z oznaczeniami ich najważniejszych elementów przedstawiają Rys. 57, Rys. 58 oraz Rys. 59.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

1 – żyła przewodząca
aluminiowa;
2 – izolacja żył;
3 – powłoka
zewnętrzna.



Rys 57. Widok przykładowego kabla niskiego napięcia o oznaczeniu YAKY [19]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



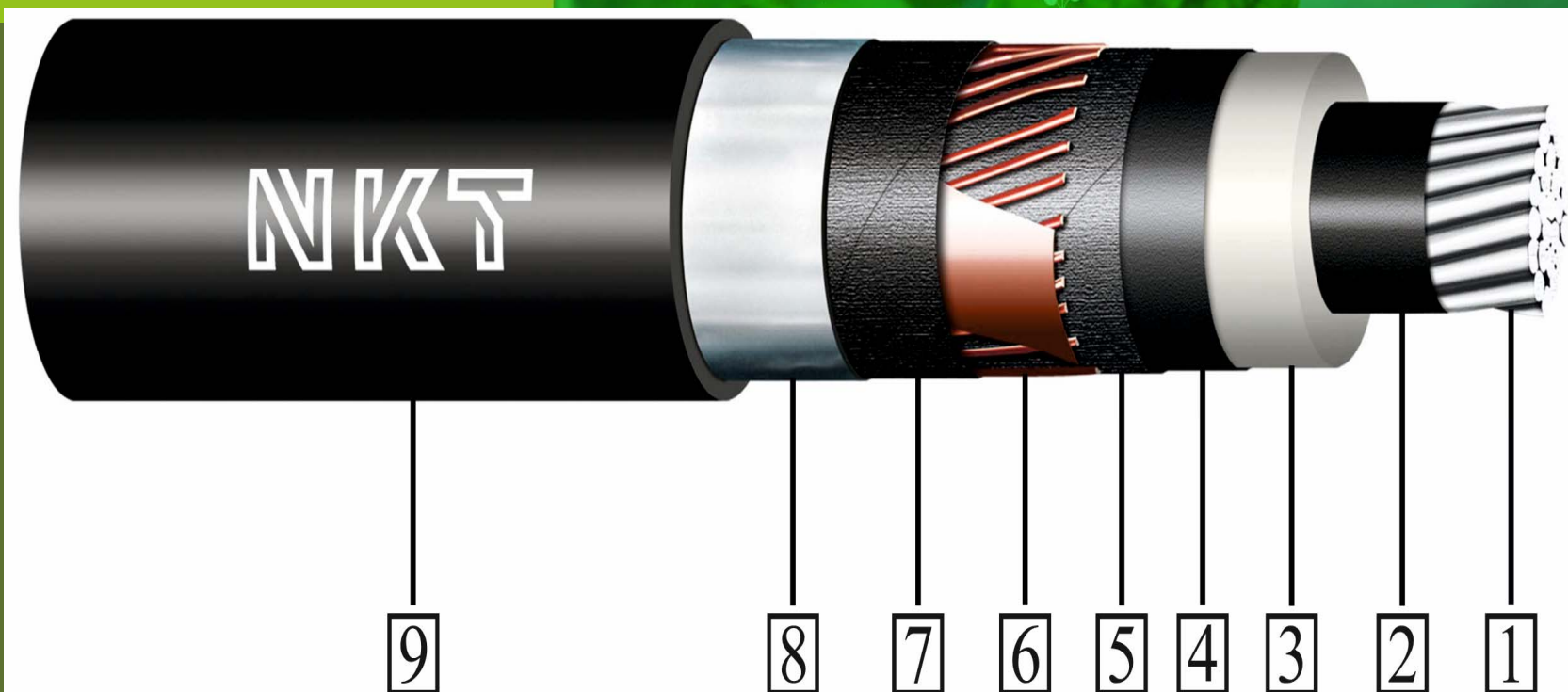
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- 1 – żyła przewodząca
alumiiniowa;
- 2 – warstwa półprzewodząca
wewnętrzna;
- 3 – izolacja z polietylenu
sieciowanego (XLPE);
- 4 – warstwa półprzewodząca
zewnętrzna;
- 5 – taśma półprzewodząca;
- 6 – żyła powrotna z drutów
miedzianych oraz taśmy
miedzianej;
- 7 – taśma nieprzewodząca;
- 8 – folia aluminiowa;
- 9 – zewnętrzna powłoka
polietylenowa PVC



Rys 58. Widok przykładowego kabla SN o oznaczeniu HRUHAKXS [26]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

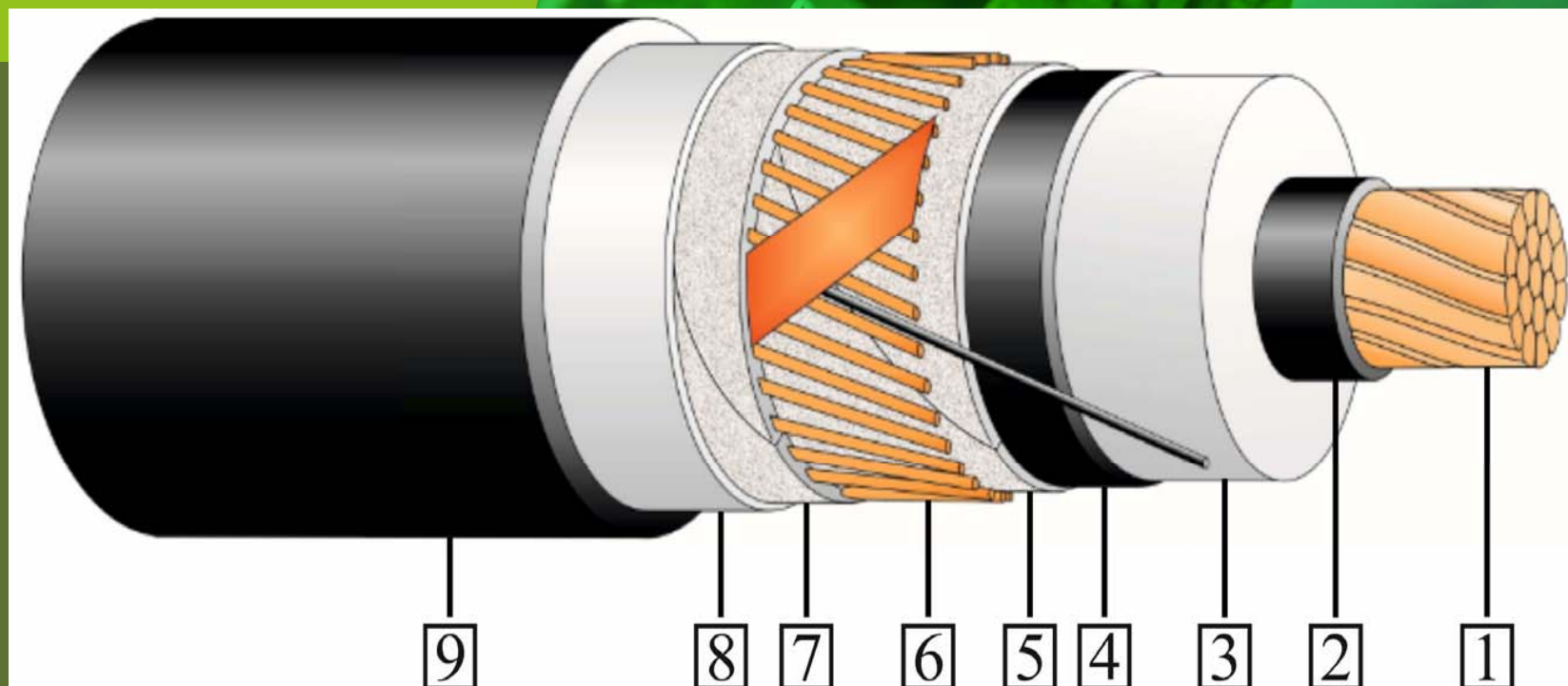


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 59. Widok przykładowego kabla 110 kV o oznaczeniu 2XS(FL)2Y-2T4FS [27]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Rezystancję linii kablowej wyznacza się z następującej zależności:

$$R_L = R' \cdot l = \left(\rho_L + \rho_P \frac{X_P^2}{\rho_P^2 + X_P^2} \right) \cdot l$$

Gdzie:

$\rho_L = \frac{1000}{\gamma \cdot S_L}$ - rezystancja jednostkowa żyły roboczej Ω/km ;

$\rho_P = \frac{1000}{\gamma \cdot S_P}$ - rezystancja jednostkowa żyły powrotnej Ω/km ;

$X_P = 0,0628 \ln \frac{b}{r_P}$ - reaktancja żył powrotnych;

r_P – promień żyły powrotnej;

b – odległość pomiędzy środkami geometrycznymi żył roboczych (powrotnych);

l – długość kabla, km.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Reaktancję linii kablowej wyznacza się z następującej zależności:

$$X_L = X' \cdot l = \left(X_L - X_P \frac{X_P^2}{\rho_p^2 + X_P^2} \right) \cdot l$$

Gdzie:

$X_L = 0,0628 \ln \frac{b}{r_{L0}}$ - reaktancja żył roboczych;

$X_P = 0,0628 \ln \frac{b}{r_p}$ - reaktancja żył powrotnych;

r_{L0} – promień zastępczy żyły roboczej;

r_p – promień żyły powrotnej;

b – odległość pomiędzy środkami geometrycznymi żył powrotnych.

Z zależności na składową zgodną reaktancji wynika, że obecność żył powrotnych powoduje zmniejszenie jej wartości, natomiast obecność żył powrotnych zwiększa wartość rezystancji.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

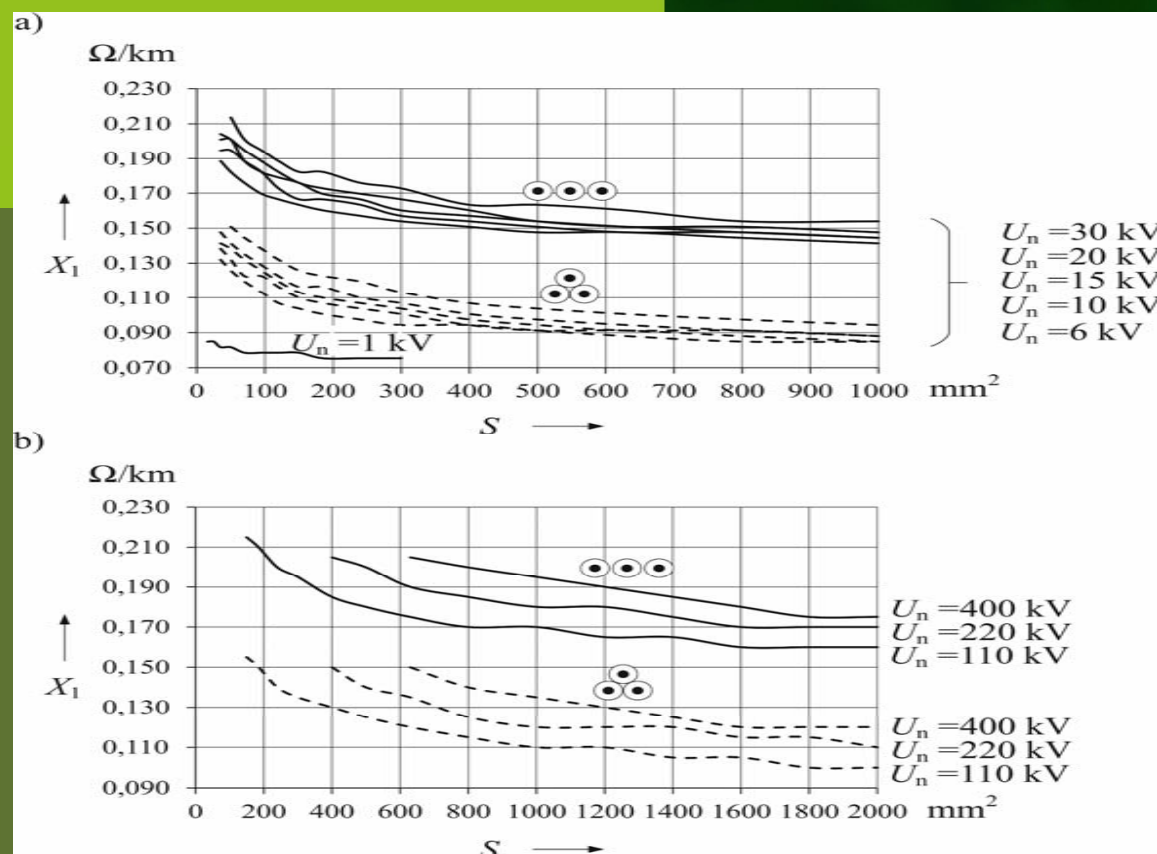


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 60. Wartości reaktancji zgodnej kabli elektroenergetycznych według danych katalogowych: a) kable niskiego i średniego napięcia, b) kable wysokiego napięcia [24]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Impedancja kabli dla składowej zerowej:

$$\underline{Z}_0 = \rho_L + 0,15 + j0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_{L0} \cdot b^2} - \frac{\left(0,15 + j0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P \cdot b^2} \right)^2}{\rho_P + 0,15 + j0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P \cdot b^2}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Jak widać, bardzo istotne znaczenie w wielkości redukcyjnego oddziaływania żył powrotnych ma ich rezystancja. Na podstawie parametrów zerowych linii kablowych można określić, jaka część prądu zerowego żył roboczych popłynie do ziemi za pośrednictwem układu uziemiającego żył powrotnych. Wielkość ta nosi nazwę współczynnika redukcyjnego i może być wyznaczona ze wzoru:

$$r_P = \frac{\rho_P}{\sqrt{\rho_P^2 + \left(0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P \cdot b^2} \right)^2}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 7.

Dla kabla SN o przekroju aluminiowej żyły roboczej 240 mm², z żyłą powrotną miedzianą o przekroju 50 mm² należy wyznaczyć jednostkowe parametry podłużne dla składowej zgodnej i zerowej oraz współczynnik redukcyjny. Należy przyjąć następujące wymiary (odpowiadają w przybliżeniu kablom typu XRUHAKXS na napięcie 15 kV): średnica zewnętrzna kabla $b = 80$ mm, promień żyły roboczej $r_L = 8,8$ mm, promień żyły powrotnej $r_P = 15,2$ mm. Kable ułożone są w układzie trójkątnym, ich średnia odległość wzajemna jest większa od średnicy pojedynczego kabla o 5%. Rezystywność gruntu $\rho_n = 100 \Omega \cdot m$.

Parametry rezystancyjne wyznaczono wariantowo – dla temperatury 20°C oraz dla maksymalnej temperatury żył roboczych wynoszącej 90°C. Tę samą temperaturę przyjęto dla żył powrotnych, co do których przyjęto także brak wykonania cross bondingu.

- żyła robocza

$$\rho_L = \frac{1000}{35 \cdot 240} = 0,119 \Omega/km \text{ (dla } 20^\circ C), \quad \rho_{Lt} = 0,165 \Omega / km \text{ (dla } 90^\circ C),$$

- żyła powrotna

$$\rho_P = \frac{1000}{55 \cdot 240} = 0,364 \Omega/km \text{ (dla } 20^\circ C), \quad \rho_{Pt} = 0,496 \Omega / km \text{ (dla } 90^\circ C).$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Reaktancje żył roboczych i powrotnych przyjmują wartości:

$$X_L = 0,0628 \ln \frac{84}{0,78 \cdot 8,8} = 0,1137 \Omega/\text{km}$$

$$X_p = 0,0628 \ln \frac{84}{15,2} = 0,0638 \Omega/\text{km}$$

Impedancję jednostkową zgodną rozważanej linii kablowej z uwzględnieniem wpływu żył powrotnych wyznacza się z zależności:

$$\underline{Z}_1 = 0,119 + 0,364 \frac{0,0638^2}{0,364^2 + 0,0638^2} + j \left(0,1152 - 0,638 \frac{0,0638^2}{0,364^2 + 0,0638^2} \right) = 0,130 + j0,112 \Omega/\text{km}$$

Dla opcji temperatury żył 90°C otrzymuje się:

$$\underline{Z}_{1t} = 0,173 + j0,113 \Omega/\text{km}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Niezbędna do obliczeń impedancji zerowej odległość umowna $D_n = 933$. Wyrażenia z logarytmami przyjmują następujące wartości:

$$0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_{L0} \cdot b^2} = 0,0628 \ln \frac{933^3}{0,78 \cdot 0,0088 \cdot 0,042^2} = 1,999 \Omega/\text{km}$$

$$0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_p \cdot b^2} = 0,0628 \ln \frac{933^3}{0,0152 \cdot 0,042^2} = 1,949 \Omega/\text{km}$$

W rezultacie impedancja zerowa :

$$\underline{Z}_0 = 0,119 + 0,15 + j1,999 - \frac{(0,15 + j1,949)^2}{0,364 + 0,15 + j1,949} = 0,466 + j0,113 \Omega/\text{km}$$

Dla opcji temperatury żył 90°C otrzymuje się:

$$\underline{Z}_{0t} = 0,623 + j0,164 \Omega/\text{km}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Współczynnik redukcyjny linii kablowej wyznacza się w następujący sposób:

$$r_p = \frac{0,364}{\sqrt{0,364^2 + \left(0,0628 \ln \frac{933^3}{0,0152 \cdot 0,042^2}\right)^2}} = 0,181$$

co oznacza że 18,1% prądu zerowego linii popłynie przez ziemię, a reszta żyłami powrotnymi. Dla opcji temperatury żył 90°C prąd płynący ziemią ma wartość 24,2% prądu zerowego. Dla żył powrotnych nieuziemionych, $r_p = 0$, prąd przez ziemię nie płynie.

W przypadku przyjęcia założenia o uziemieniu żył powrotnych przez rezystancję o dużej wartości impedancję zerową wyznacza się z zależności:

$$\widehat{\underline{Z}}_0 = 0,119 + j0,0628 \ln \frac{15,2}{0,78 \cdot 8,8} = 0,119 + j0,050 \Omega/\text{km}$$

Dla opcji temperatury żył 90°C otrzymuje się tę samą wartość reaktancji zerowej

$$\widehat{\underline{Z}}_{0t} = 0,165 + j0,050 \Omega/\text{km}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

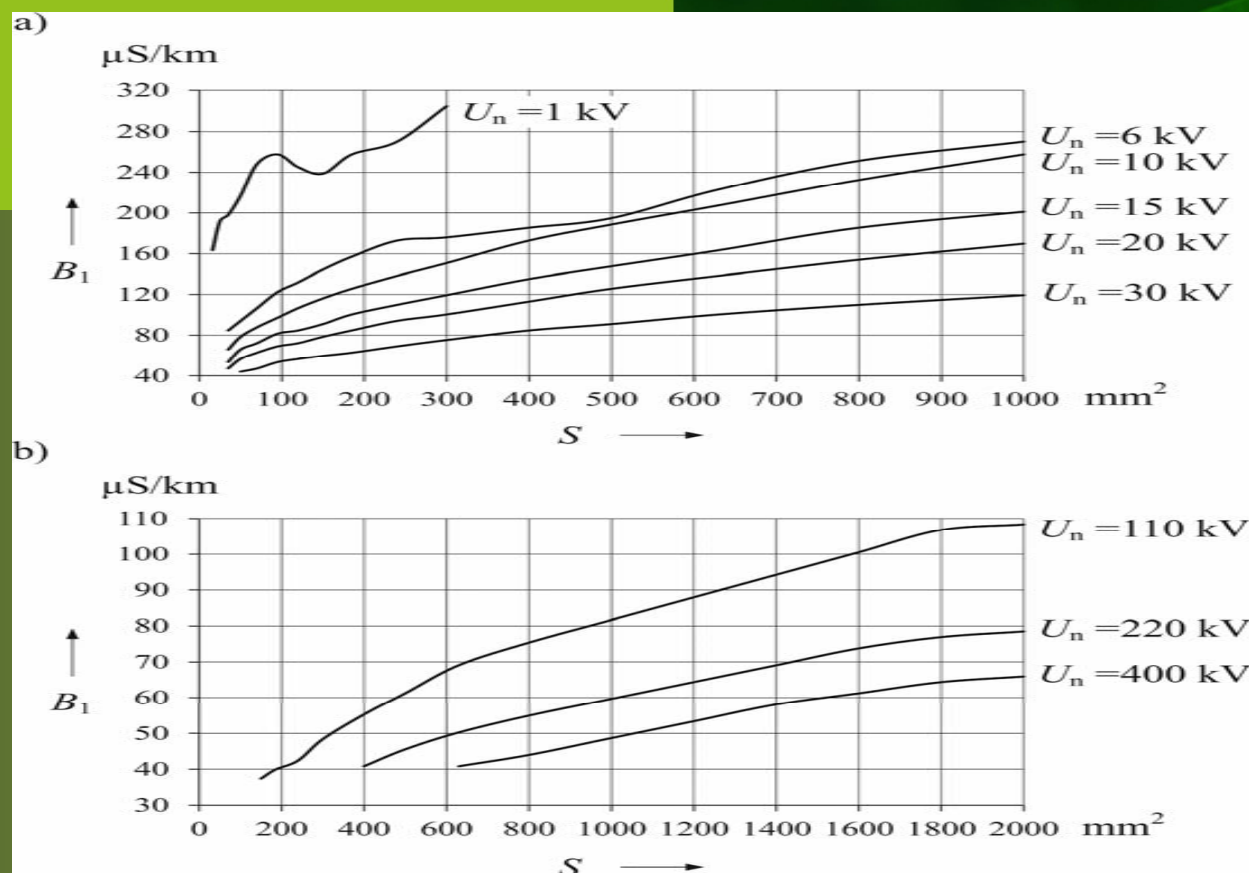


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 61. Susceptancje zgodne kabli elektroenergetycznych [29] : a) kable niskiego i średniego napięcia, b) kable wysokiego napięcia



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

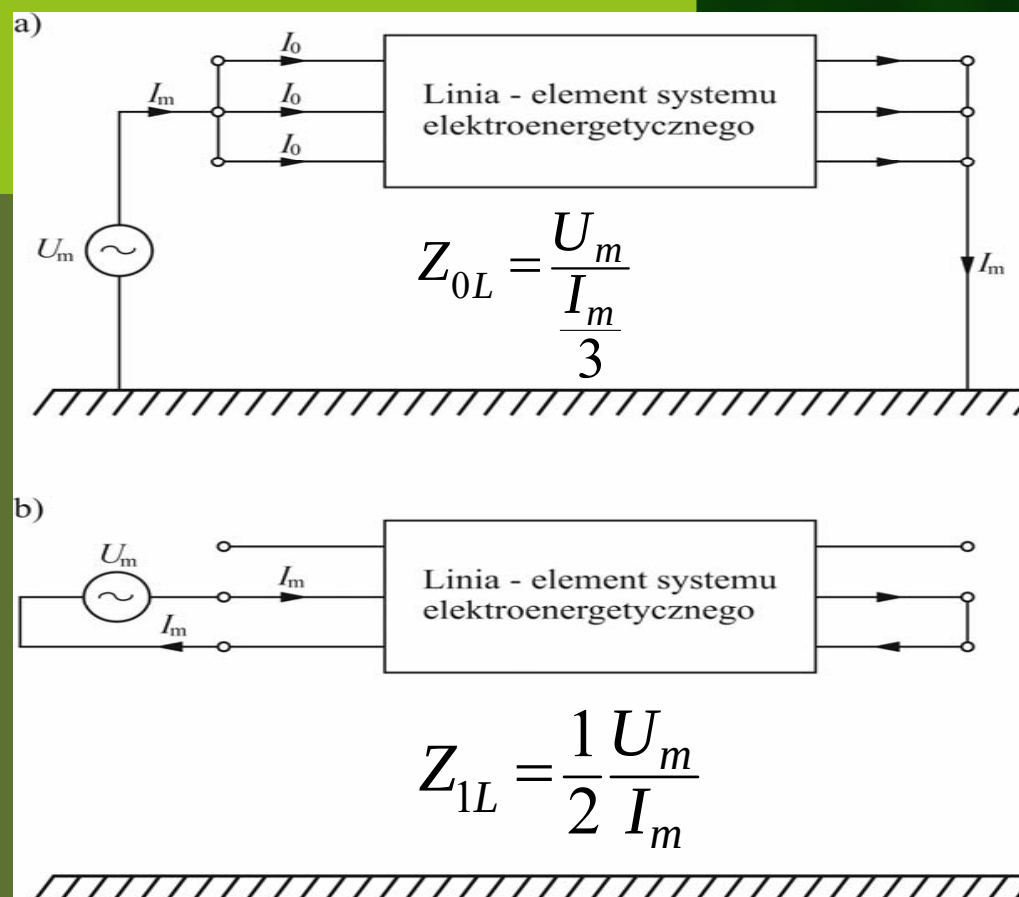


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 62. Układy pomiarowe służące do pomiaru impedancji linii : a) zerowej, b) zgodnej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Transformatory i autotransformatory



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



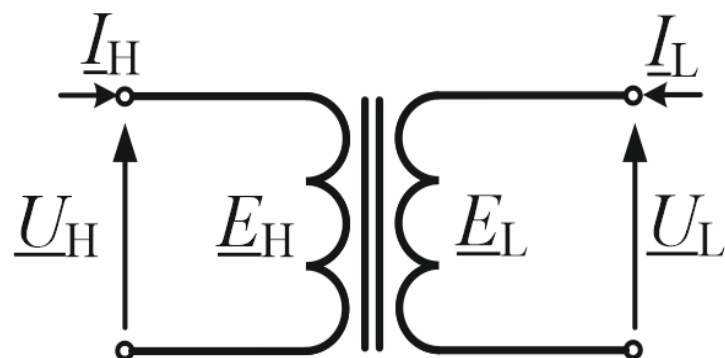
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

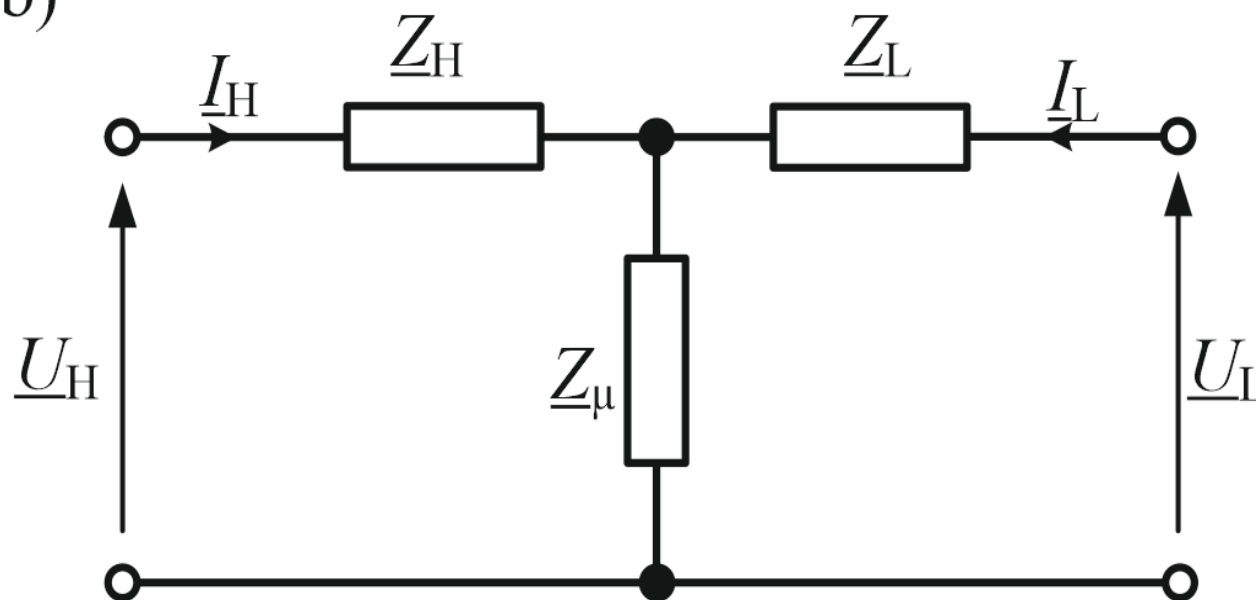


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

a)



b)



Rys 63. Dwa uzwojenia sprzężone magnetycznie (a) oraz ich schemat zastępczy (b) [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

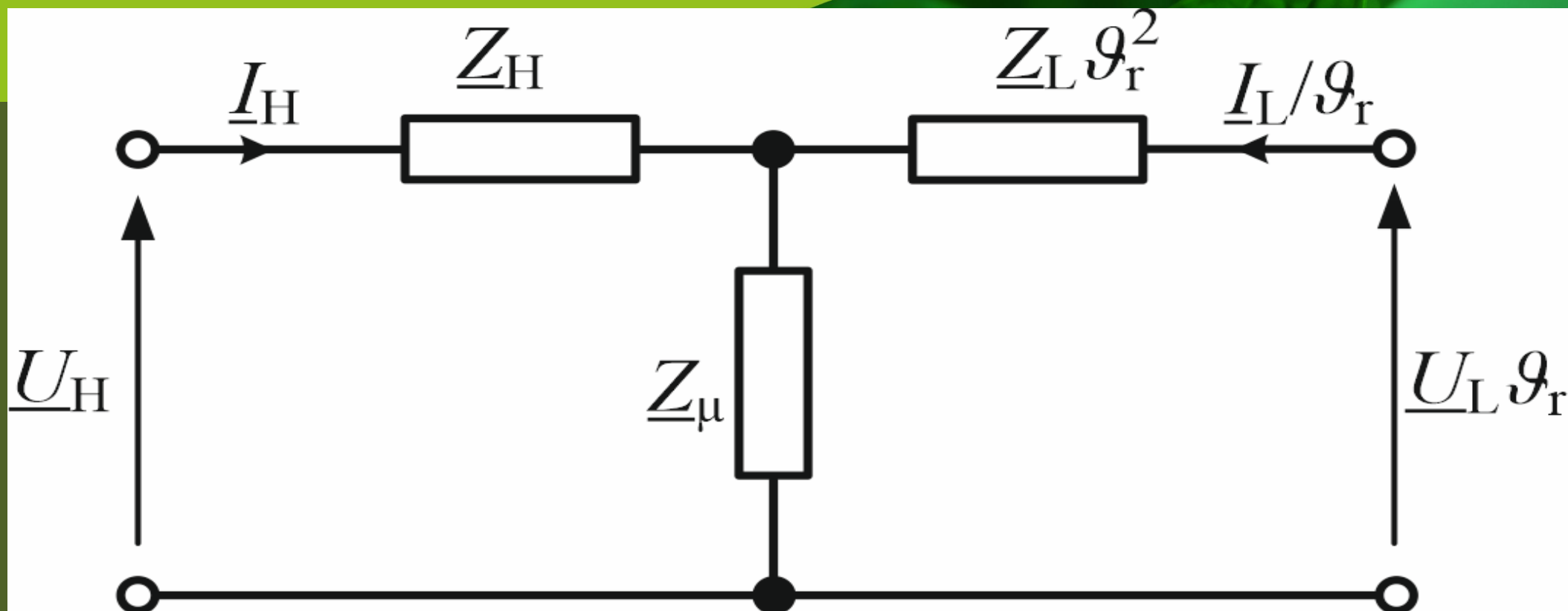


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 64. Schemat zastępczy transformatora po sprowadzeniu poszczególnych wielkości na stronę H [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Uzwojenia transformatorów trójfazowych mogą być łączone w gwiazdę (oznaczenie - Y), trójkąt (oznaczenie - D) lub zygzak (oznaczenie - Z).

- Układ połączeń uzwojeń w gwiazdę (Rys. 65a) jest najprostszym i najtańszym połączeniem z możliwością zmiany sposobu pracy punktu gwiazdowego (wyprowadzony i uziemiony punkt neutralny N lub izolowany). Stosowany jest zarówno po stronie dolnej jak i górnej transformatora.
- Układ połączeń uzwojeń w trójkąt (Rys. 65b) jest układem zamkniętym, umożliwiającym kompensację trzeciej harmonicznej, asymetrii obciążenia, a także zamknięcie drogi przepływu (na zewnątrz) dla składowej zerowej prądu.
- Układ połączeń uzwojeń w zygzak (Rys. 65c) stosowany jest wtedy, gdy wymaga się małej wartości impedancji dla składowej zerowej lub przy obciążeniach niesymetrycznych, w celu ograniczenia negatywnego wpływu tych asymetrii. Podobnie jak w układzie gwiazdy, możliwe jest wyprowadzenie punktu neutralnego i praca z uziemionym lub izolowanym punktem gwiazdowym transformatora, a tym samym korzystanie z napięć fazowych i międzyfazowych.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

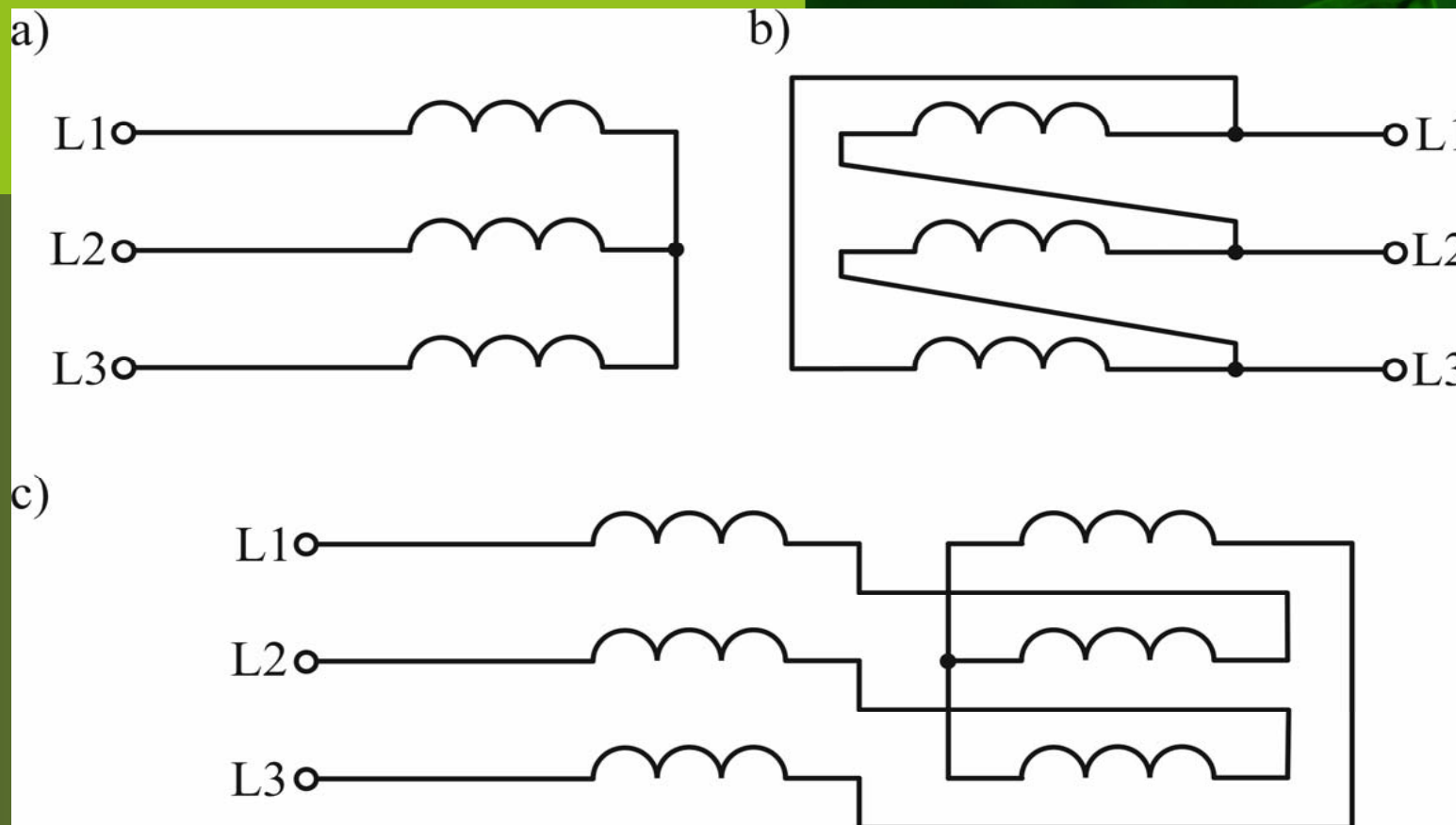


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 65. Układy połączeń transformatorów trójfazowych : a) w gwiazdę (Y), b) w trójkąt (D), c) w zygzak (Z)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Biorąc pod uwagę różne konfiguracje uzwojeń po obydwu stronach transformatora, przekładania napięciowa może być wyznaczona w sposób następujący, w zależności od sposobu połączeń uzwojeń:

$$Y y \quad g = \frac{U_H}{U_L} = \frac{U_{Hf}}{U_{Lf}} = \frac{\sqrt{3}U_{Hf}}{\sqrt{3}U_{Lf}} = \frac{N_H}{N_L} = g_r$$

$$Y d \quad g = \frac{U_H}{U_L} = \frac{\sqrt{3}U_{Hf}}{U_{Lf}} = \frac{\sqrt{3}N_H}{N_L} = \sqrt{3} \cdot g_r$$

$$D y \quad g = \frac{U_H}{U_L} = \frac{U_{Hf}}{\sqrt{3}U_{Lf}} = \frac{N_H}{\sqrt{3}N_L} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot g_r$$

$$Y z \quad g = \frac{U_H}{U_L} = \frac{\sqrt{3}U_{Hf}}{\sqrt{3}\sqrt{3}\frac{1}{2}U_{Lf}} = \frac{2N_H}{\sqrt{3}N_L} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot g_r$$

$$Z y \quad g = \frac{U_H}{U_L} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}\frac{1}{2}U_{Hf}}{\sqrt{3}U_{Lf}} = \frac{\sqrt{3}N_H}{2N_L} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot g_r$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

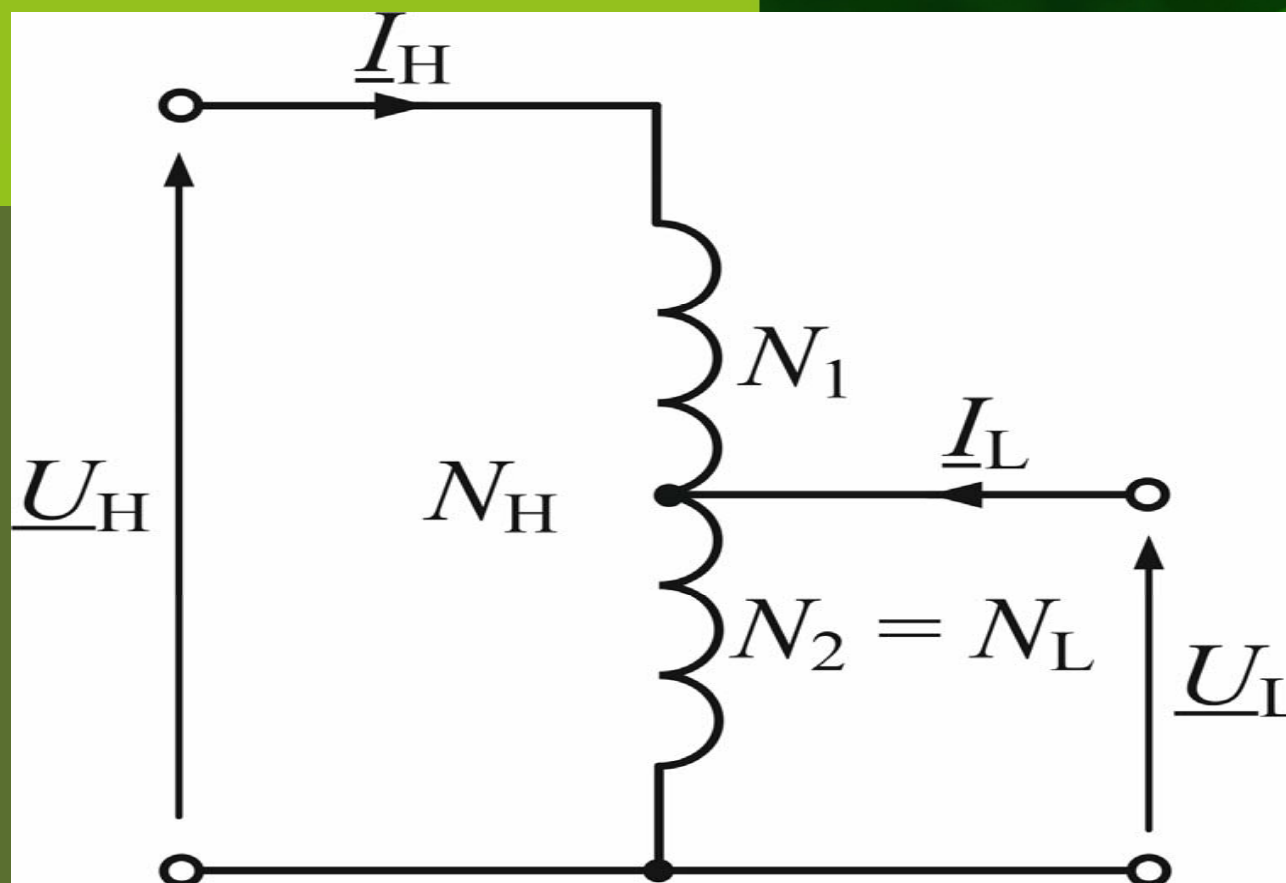


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 66. Schemat połączeń uzwojeń w autotransformatorze



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Transformatory dwuuzwojeniowe, w praktyce stosowane są między innymi jako jednostki:

- rozdzielcze SN/nn o mocach od 25 kVA do nawet 2500 kVA, o grupach połączeń uzwojeń np. Dyn5, Yzn5;
- wyprowadzające moc z elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych o mocach zależnych od mocy elektrowni, o grupach połączeń uzwojeń np. Dyn5;
- odbiorcze/mocy SN/SN o grupach połączeń uzwojeń np. YNyn0, Yy0, YNd11;
- uziemiające/potrzeb własnych w GPZ 110/SN o mocach wynoszącej zazwyczaj około 1000 kVA, na poziomie średniego napięcia i 200 kVA na poziomie niskiego napięcia o grupach połączeń uzwojeń ZNyn11, ZNyn5 (zróznicowanie mocy uzwojeń zostanie wytłumaczone w rozdziale omawiającym sposób uziemienia punktu neutralnego sieci);
- mocy/dystrybucyjne w GPZ 110/SN o mocach od 6,3 MVA do 125 MVA, o grupach połączeń uzwojeń np. YNd11;
- blokowe SN/WN w elektrowniach o mocach zależnych od mocy generatora, o grupie połączeń uzwojeń np. YNd5, YNd11 (w praktyce dla mocy powyżej 400 MVA stosuje się trzy jednostki jednofazowe).

Transformatory energetyczne, w obliczeniach ustalonych i zakłóceniovych, modelowane są za pomocą czwórników (najczęściej typu „T” lub typu „Γ” - Rys. 67).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

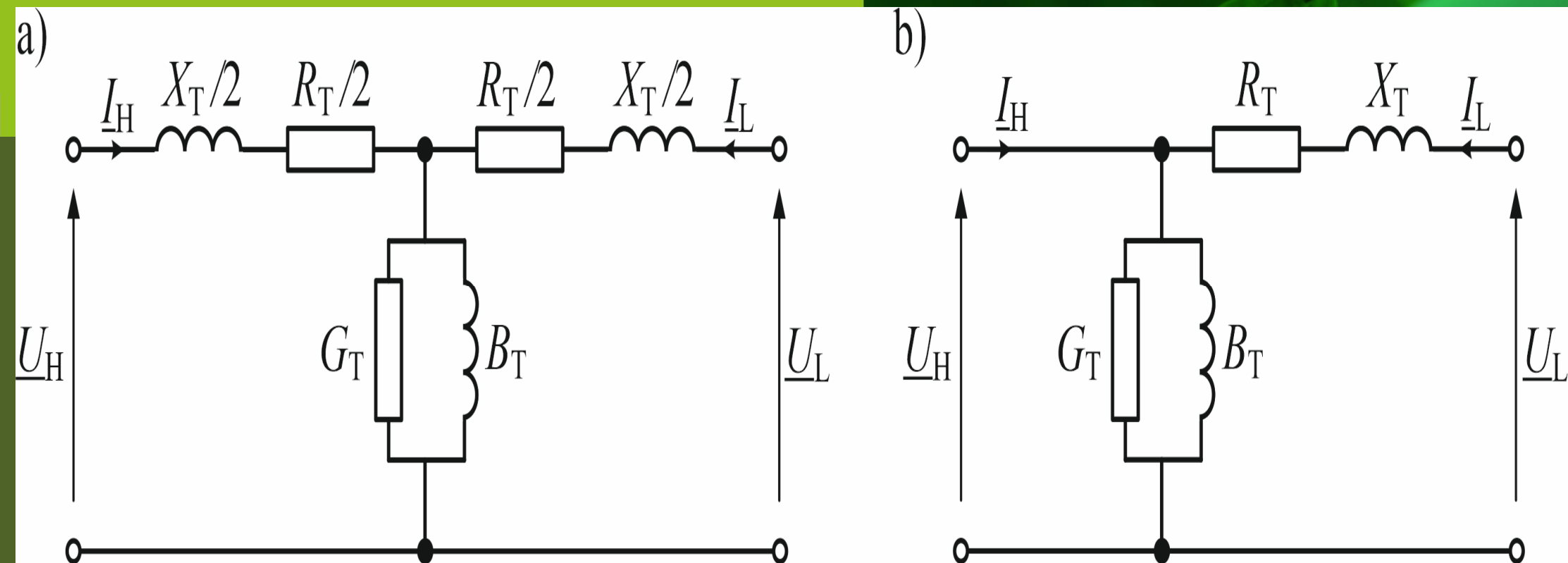


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 67. Schemat zastępczy transformatora dwuuzwojeniowego, a) typu „T”, b) typu „Γ”



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Impedancję transformatora można wyrazić następującą zależnością:

$$Z_T = \frac{U_K}{U_n} \cdot 100 \cdot \frac{U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{u_K \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

Rezystancję transformatora można wyrazić następującą zależnością:

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu}}{3 \cdot I_n^2} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot 100 \cdot S_n}{3 \cdot S_n \cdot 100 \cdot \left(\frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \right)^2} = \frac{\Delta p_{Cu} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Konduktancję transformatora wyraża się następującą zależnością:

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} = \frac{\Delta P_{Fe} \cdot 100 \cdot S_n}{S_r \cdot 100 \cdot U_n^2} = \frac{\Delta p_{Fe} \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2}$$

Admitancję transformatora wyraża się następującą zależnością:

$$Y_T = \frac{I_0 \cdot \sqrt{3}}{U_n} = \frac{I_0 \cdot 100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_b}{I_n \cdot 100 \cdot U_n} = \frac{i_0 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n}{100 \cdot U_n} = \frac{i_0 \cdot \sqrt{3} \cdot S_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot U_n} = \frac{i_0 \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Susceptancję transformatora można wyznaczyć, korzystając z trójkąta admitancji:

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2}$$

Transformator jest urządzeniem, który łączy sieci o dwóch różnych poziomach napięcia. Czasami zachodzi potrzeba wykonywania analiz albo po stronie H albo L. Konieczne staje się wówczas wyznaczenie jego parametrów na rozpatrywanym poziomie napięcia.

Przeliczanie parametrów wzdłużnych i poprzecznych z poziomu napięcia U_H na poziom napięcia U_L odbywa się według następujących zależności:

$$Z_{T(H)} = Z_{T(L)} \cdot \left(\frac{U_H}{U_L} \right)^2 = Z_{T(L)} \cdot g^2$$

$$Y_{T(H)} = Y_{T(L)} \cdot \left(\frac{U_L}{U_H} \right)^2 = Y_{T(L)} \cdot \frac{1}{g^2}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 8.

Należy wyznaczyć parametry (RT, XT, BT, GT) schematu zastępczego transformatora dwuuzwojeniowego o następujących danych:

$$S_n = 16 \text{ MVA}, \quad g = \frac{115 \text{ kV}}{16,5 \text{ kV}}, \quad u_K = 11 \%, \quad \Delta P_{Cu} = 70 \text{ kW},$$

$$\Delta P_{Fe} = 8,8 \text{ kW}, \quad I_{0\%} = 0,08 \%, \quad \text{grupa połączeń uzwojeń: YNd11}$$

Obliczenia należy wykonać na poziomie napięcia górnego a potem przeliczyć poszczególne wielkości na poziom napięcia dolnego.

Przeliczenie strat mocy na procenty (w odniesieniu do mocy znamionowej):

$$\Delta p_{Cu} = \frac{\Delta P_{Cu}}{S_n} \cdot 100 = \frac{70 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,438\%$$

$$\Delta p_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_n} \cdot 100 = \frac{8,8 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,055\%$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Parametry wzdluzne schematu zastepczego:

$$R_T = \frac{\Delta p_{Cu} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{0,438 \cdot (115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 3,616 \, \Omega$$

$$Z_T = \frac{u_K \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{11 \cdot (115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 90,922 \, \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{90,922^2 - 3,616^2} = 90,85 \, \Omega$$

Parametry poprzeczne schematu zastepczego:

$$G_T = \frac{\Delta p_{Fe} \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2} = \frac{0,055 \cdot 16 \cdot 10^6}{100 \cdot (115 \cdot 10^3)^2} = 0,665 \, \mu S$$

$$Y_T = \frac{i_0 \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2} = \frac{0,08 \cdot 16 \cdot 10^6}{100 \cdot (115 \cdot 10^3)^2} = 0,968 \, \mu S$$

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = \sqrt{(0,968)^2 - (0,665)^2} = 0,703 \, \mu S$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przeliczenie na poziom napięcia dolnego:

$$R_{T(15)} = R_{T(110)} \cdot \left(\frac{16,5 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,074 \, \Omega$$

$$X_{T(15)} = X_{T(110)} \cdot \left(\frac{16,5 \cdot 10^3}{115 \cdot 10^3} \right)^2 = 1,87 \, \Omega$$

$$G_{T(15)} = G_{T(110)} \cdot \left(\frac{115 \cdot 10^3}{16,5 \cdot 10^3} \right)^2 = 32,32 \, \mu S$$

$$B_{T(15)} = B_{T(110)} \cdot \left(\frac{115 \cdot 10^3}{16,5 \cdot 10^3} \right)^2 = 34,14 \, \mu S$$

$$Y_{T(15)} = Y_{T(110)} \cdot \left(\frac{115 \cdot 10^3}{16,5 \cdot 10^3} \right)^2 = 47,02 \, \mu S$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 9.

Należy wyznaczyć parametry schematu zastępczego autotransformatora o następujących danych:

$$S_n = 160 / 160 / 16 \text{ MVA}, \quad U_n = 230 / 120 / 15,75 \text{ kV},$$

$$\Delta P_{CuHL} = 290 \text{ kW} - \text{odniesione do mocy } 160 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_{CuHT} = 13 \text{ kW} - \text{odniesione do mocy } 16 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_{CuTL} = 13.8 \text{ kW} - \text{odniesione do mocy } 16 \text{ MVA}$$

$$u_{KHL} = 10 \% - \text{odniesione do mocy } 160 \text{ MVA}$$

$$u_{KHT} = 35 \% - \text{odniesione do mocy } 160 \text{ MVA}$$

$$u_{KTL} = 22 \% - \text{odniesione do mocy } 160 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_{Fe} = 29 \text{ kW}, \quad i_0 = 0,1 \%, \quad \text{grupa połączeń: YNa0d11}$$

Obliczenia należy wykonać na poziomie napięcia górnego.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Straty mocy w procentach (odniesione do mocy znamionowej transformatora) wynoszą:

$$\Delta p_{CuHL} = \frac{\Delta P_{CuHL}}{S_n} \cdot 100 = \frac{290 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,181\%$$

$$\Delta p_{CuHT} = \frac{\Delta P_{CuHT}}{S_n} \cdot 100 = \frac{13 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,081\%$$

$$\Delta p_{CuTL} = \frac{\Delta P_{CuTL}}{S_n} \cdot 100 = \frac{13,8 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,086\%$$

$$\Delta p_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_n} \cdot 100 = \frac{29 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,018\%$$

Parametry wzdluzne schematu zastepczego:

$$R_{HL} = \frac{\Delta p_{CuHL} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{0,181 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 160 \cdot 10^6} = 0,598 \Omega$$

$$R_{HT} = \frac{\Delta p_{CuHT} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{0,081 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 2,678 \Omega$$

$$R_{TL} = \frac{\Delta p_{CuTL} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{0,086 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 2,843 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

$$R_H = \frac{1}{2}(R_{HL} + R_{HT} - R_{TL}) = 0,217 \Omega$$

$$R_L = \frac{1}{2}(R_{HL} + R_{TL} - R_{HT}) = 0,382 \Omega$$

$$R_T = \frac{1}{2}(R_{HT} + R_{TL} - R_{HL}) = 2,469 \Omega$$

$$X_{HL} = \frac{u_{KHL} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{10 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 160 \cdot 10^6} = 33,063 \Omega$$

$$X_{HT} = \frac{u_{KHT} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{35 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 160 \cdot 10^6} = 115,719 \Omega$$

$$X_{TL} = \frac{u_{KTL} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{22 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 160 \cdot 10^6} = 72,737 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

$$X_H = \frac{1}{2}(X_{HL} + X_{HT} - X_{TL}) = 38,022 \Omega$$

$$X_L = \frac{1}{2}(X_{HL} + X_{TL} - X_{HT}) = -4,959 \Omega$$

$$X_T = \frac{1}{2}(X_{HT} + X_{TL} - X_{HL}) = 77,697 \Omega$$

Parametry poprzeczne schematu zastępczego:

$$G_T = \frac{\Delta p_{Fe} \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2} = \frac{0,018 \cdot 160 \cdot 10^6}{100 \cdot (230 \cdot 10^3)^2} = 0,544 \mu S$$

$$Y_T = \frac{i_0 \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2} = \frac{0,1 \cdot 160 \cdot 10^6}{100 \cdot (230 \cdot 10^3)^2} = 3,025 \mu S$$

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = \sqrt{(3,025)^2 - (0,544)^2} = 2,976 \mu S$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



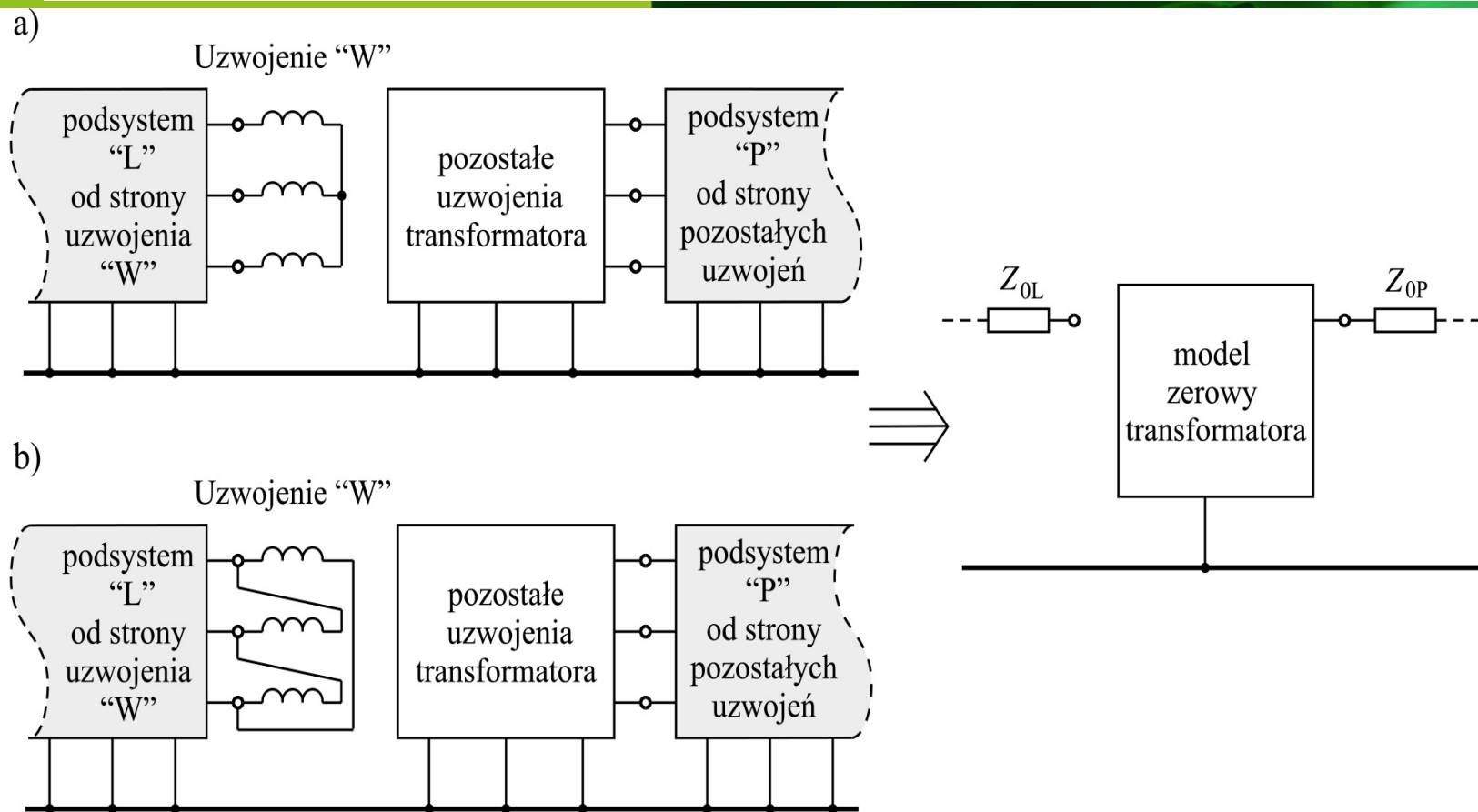
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Niezależnie od konfiguracji pozostałych uzwojeń, w przypadku braku połączenia punktu gwiazdowego uzwojenia W z ziemią (a) lub połączenia go w trójkąt (b) następuje przerwa między modelem zerowym transformatora a modelem zerowym podsystemu L od strony uzwojenia W



Rys 68. Ilustracja właściwości modeli zerowych transformatorów



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



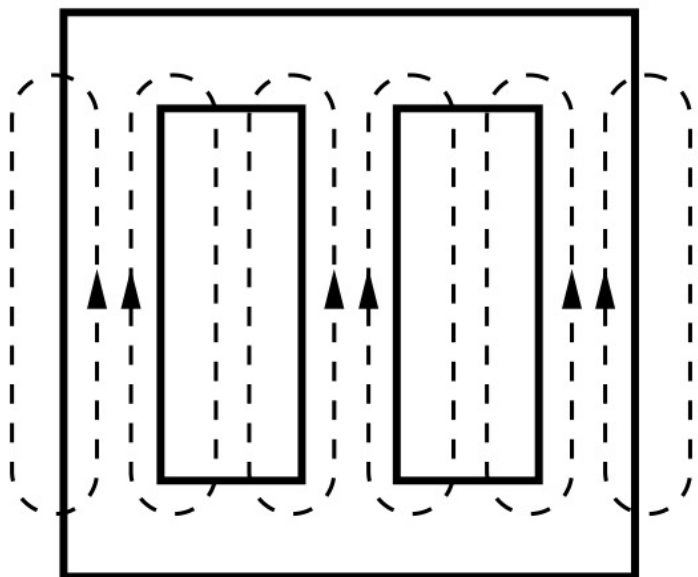
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

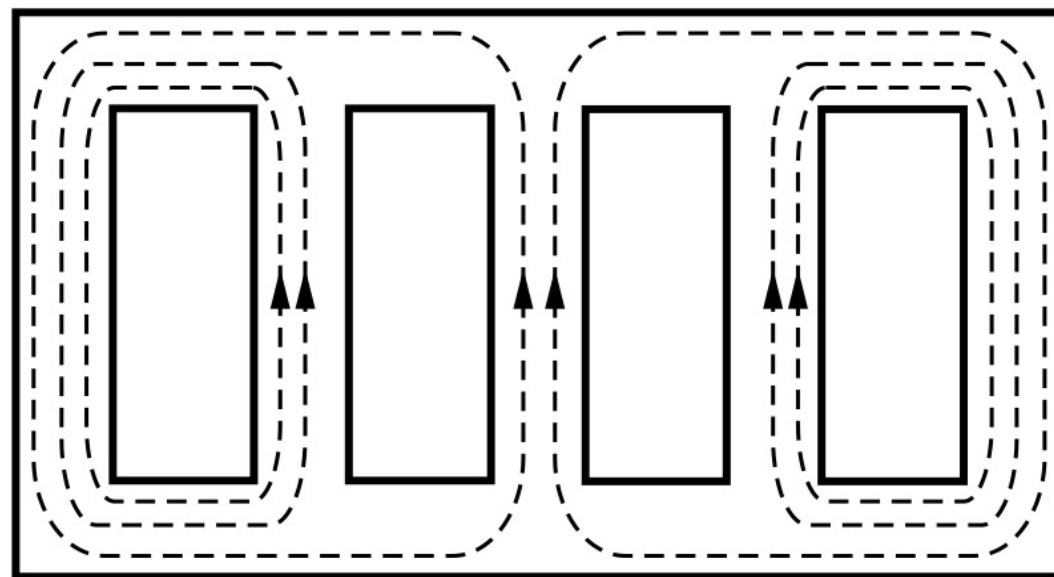


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

a)



b)



Rys 69. Przebieg strumienia pochodzącego od prądu składowej zerowej w rdzeniu transformatora: a) rdzeń trójkolumnowy, b) rdzeń pięciokolumnowy [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

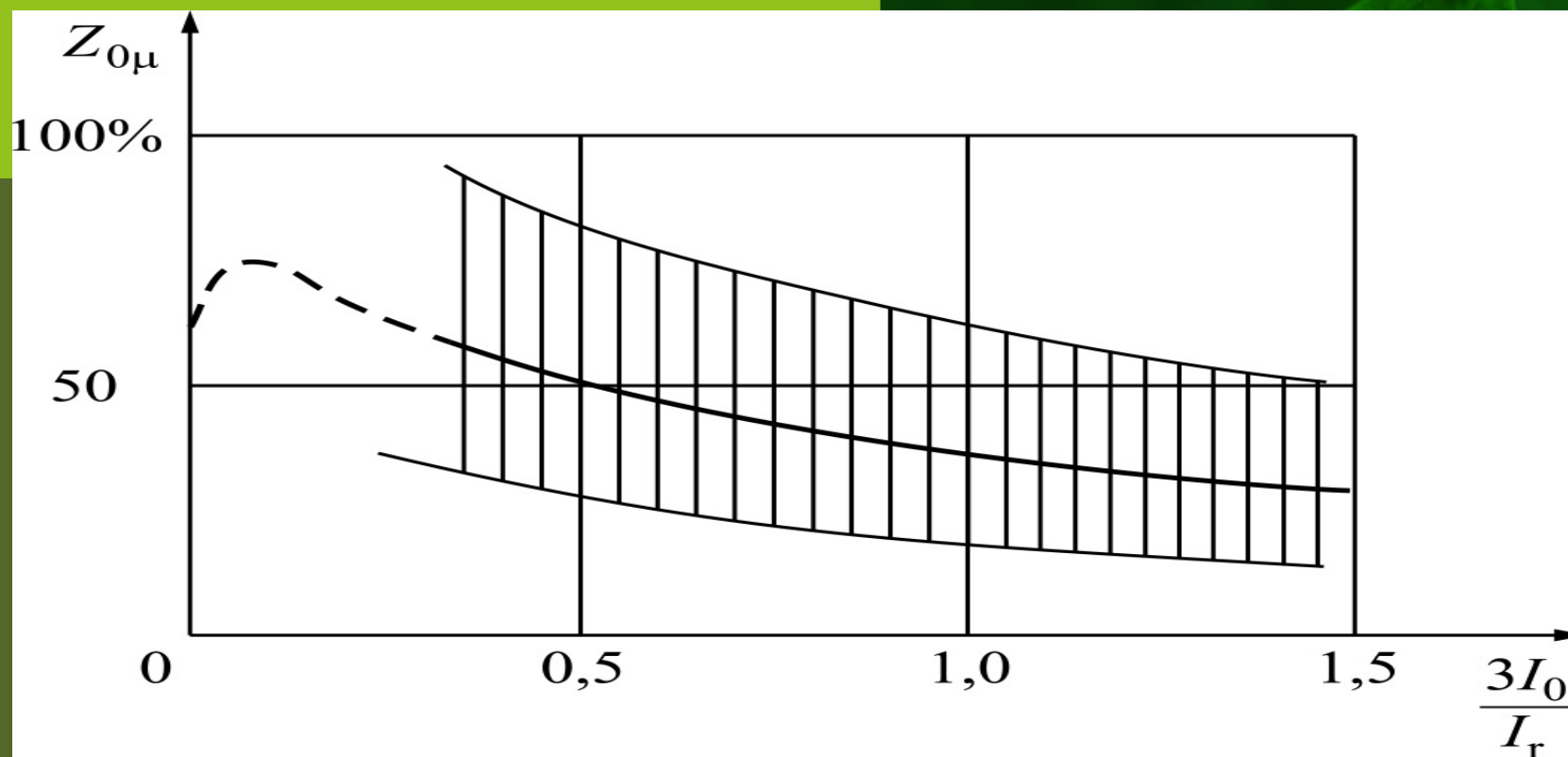


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 70. Zależność wartości impedancji magnesowania rdzenia transformatora dla składowej zerowej od wartości względnej prądu zerowego [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

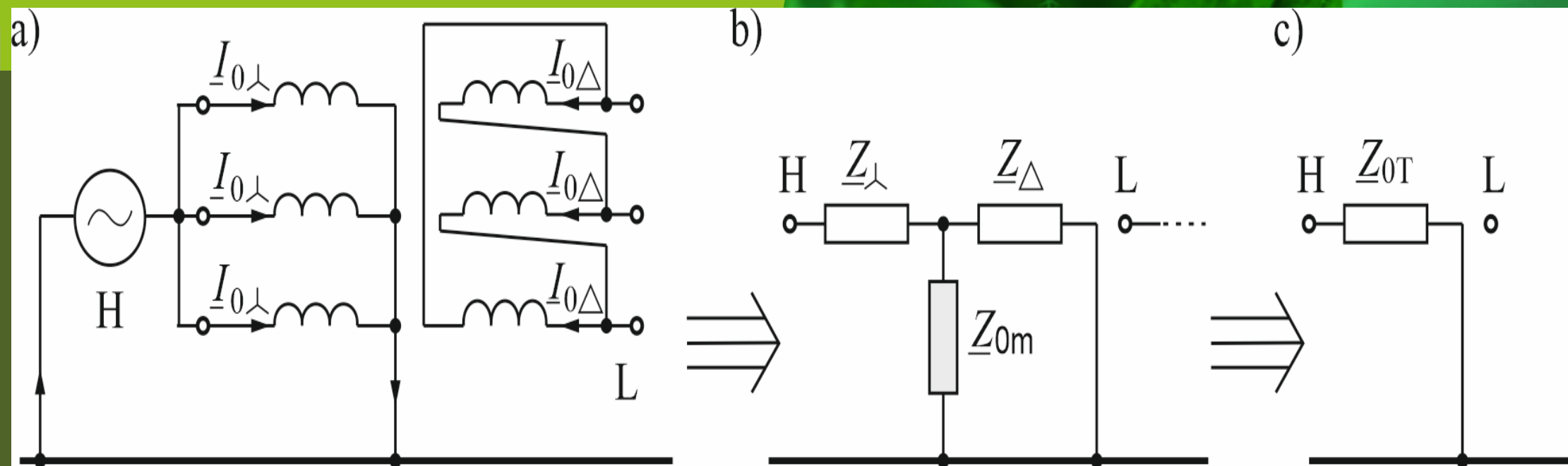


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 71. Wyznaczanie modelu zerowego transformatora w układzie połączeń gwiazda – trójkąt :
a) wymuszony przepływ składowej zerowej prądu od strony gwiazdy, b) charakterystyczne elementy modelu zerowego, c) zastępczy model zerowy [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Impedancję zerową transformatora widzianą od strony uzwojeń połączonych w gwiazdę wyznacza się jako:

$$\underline{Z}_{0T} = \underline{Z}_{\gamma} + \frac{\underline{Z}_{\Delta} \cdot \underline{Z}_{0\mu}}{\underline{Z}_{\Delta} + \underline{Z}_{0\mu}}$$

Jeśli natomiast rozpatrywany jest rdzeń trójkolumnowy, to:

$$\underline{Z}_{0T} = \underline{Z}_{\gamma} + \underline{Z}_{0\mu} \approx \beta \underline{Z}_T$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

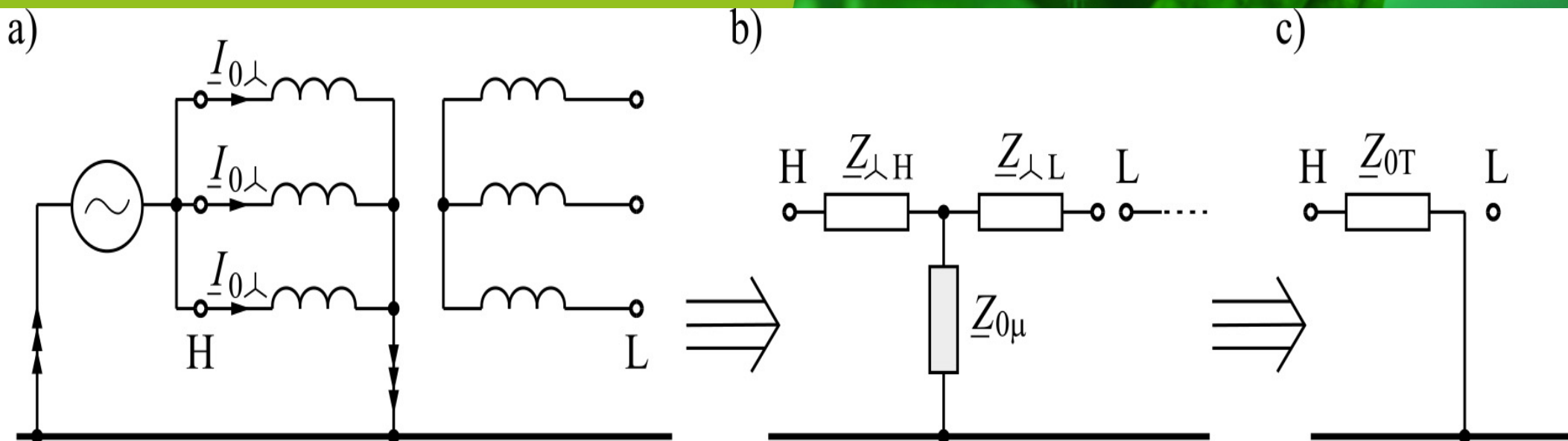


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 72. Wyznaczanie modelu zerowego transformatora w układzie połączeń gwiazda – gwiazda :
a) wymuszony przepływ składowej zerowej prądu od strony gwiazdy, b) charakterystyczne elementy modelu zerowego, c) zastępczy model zerowy [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

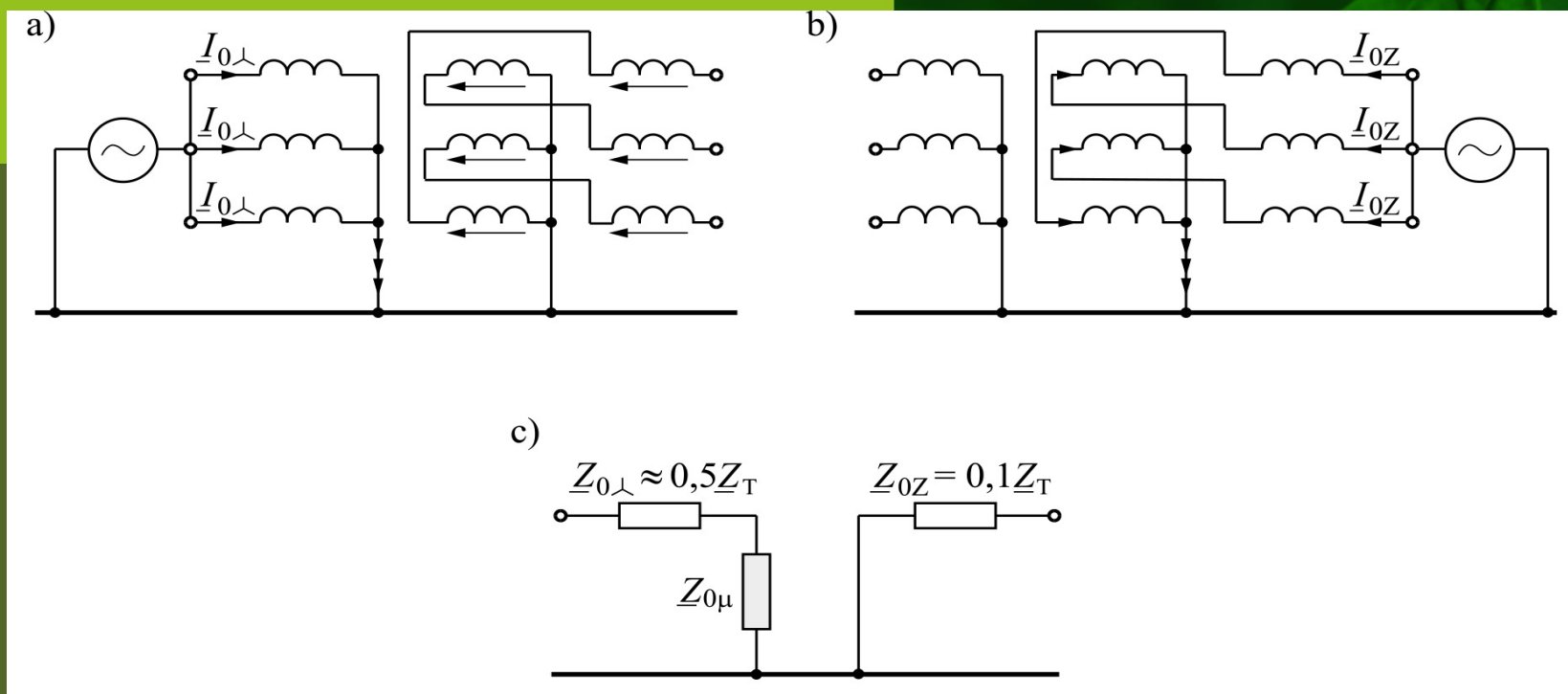


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 73. Transformator o układzie połączeń gwiazda – zygzak : a) wyznaczenie impedancji zerowej od strony uzwojeń połączonych w gwiazdę, b) wyznaczenie impedancji zerowej od strony uzwojeń połączonych w zygzak, c) model zerowy transformatora [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



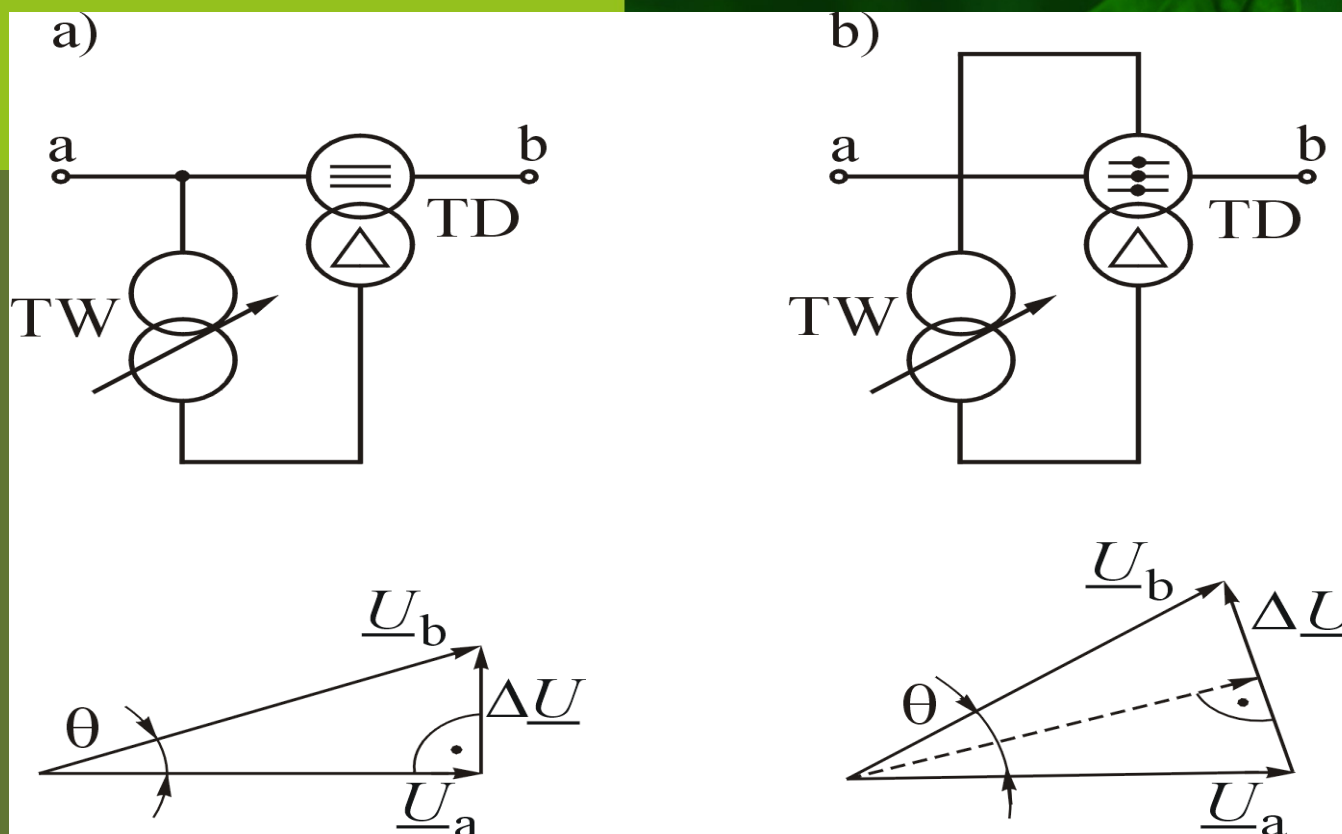
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

TD – transformator
dodawczy;
TW – transformator
wzbudzenia (zasilający).



Rys 74. Przesuwniki fazowe (*Phase Shifter*) dwurdzeniowe: a) asymetryczny, b) symetryczny [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Obciążalność linii i transformatorów



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Równanie bilansu cieplnego przewodu linii napowietrznej, według normy IEEE Std 738 posiada następującą postać:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 \cdot R(T_s)$$

gdzie:

q_c – strata ciepła przez konwekcję,

q_r – strata ciepła przez radiację (promieniowanie),

q_s – ciepło zyskane na skutek promieniowania słonecznego

I – wartość skuteczna prądu przepływającego przewodem linii,

$R(T_s)$ – rezystancja przewodu linii w temperaturze T_s ,

T_s – temperatura przewodu.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Aby określić dopuszczalną obciążalność prądową przewodu w określonych warunkach atmosferycznych, należy założyć maksymalną temperaturę przewodu ze względu na zwis (np. 40°C, 60°C, 80°C), a następnie założyć stałość tej temperatury w czasie (stan ustalony) i wtedy, korzystając z równania bilansu cieplnego przewodu dla stanu ustalonego, po przekształceniu, można obliczyć szukaną obciążalność I

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_s)}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

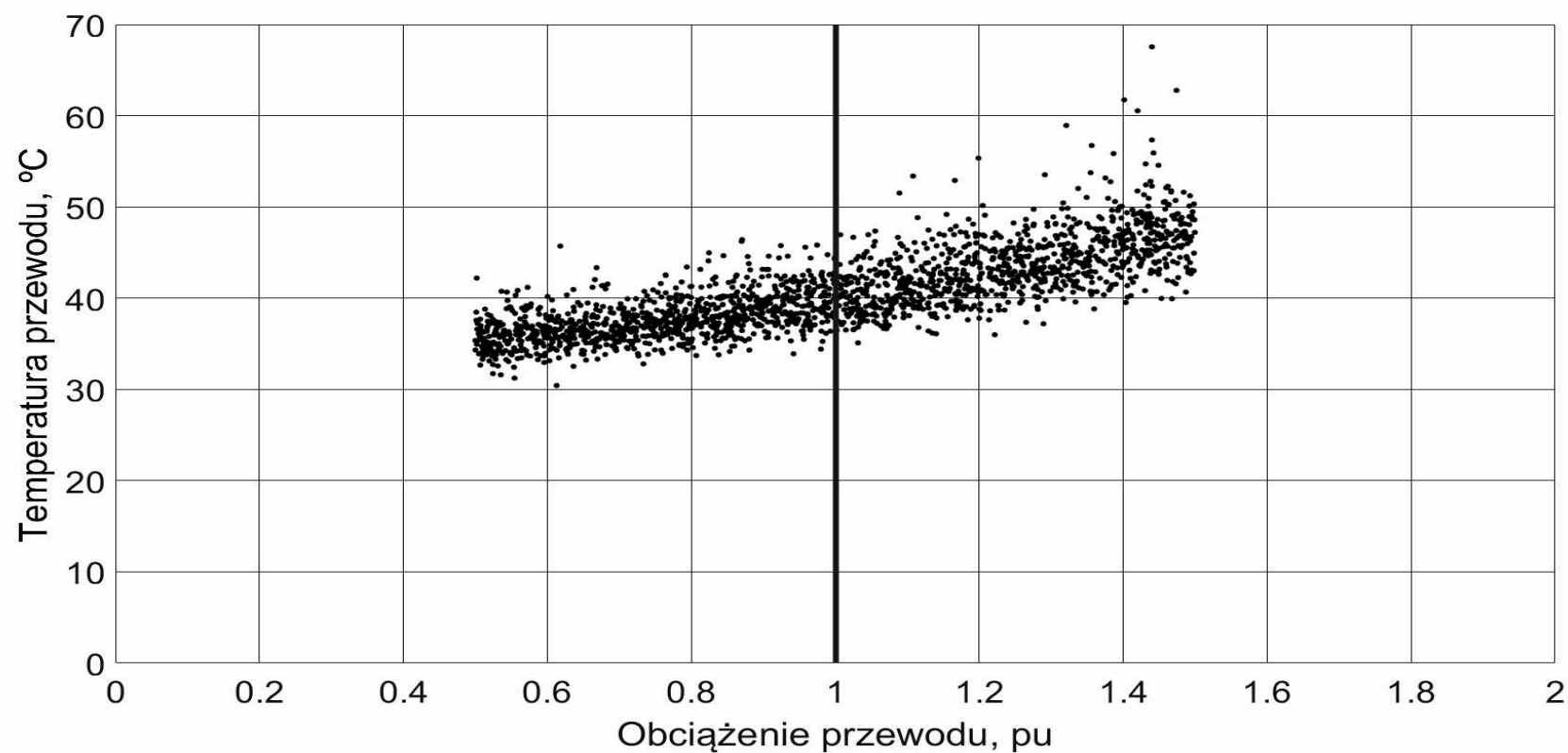


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 75. Zmienność temperatury przewodu AFL-6 240 w zależności od warunków zewnętrznych



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

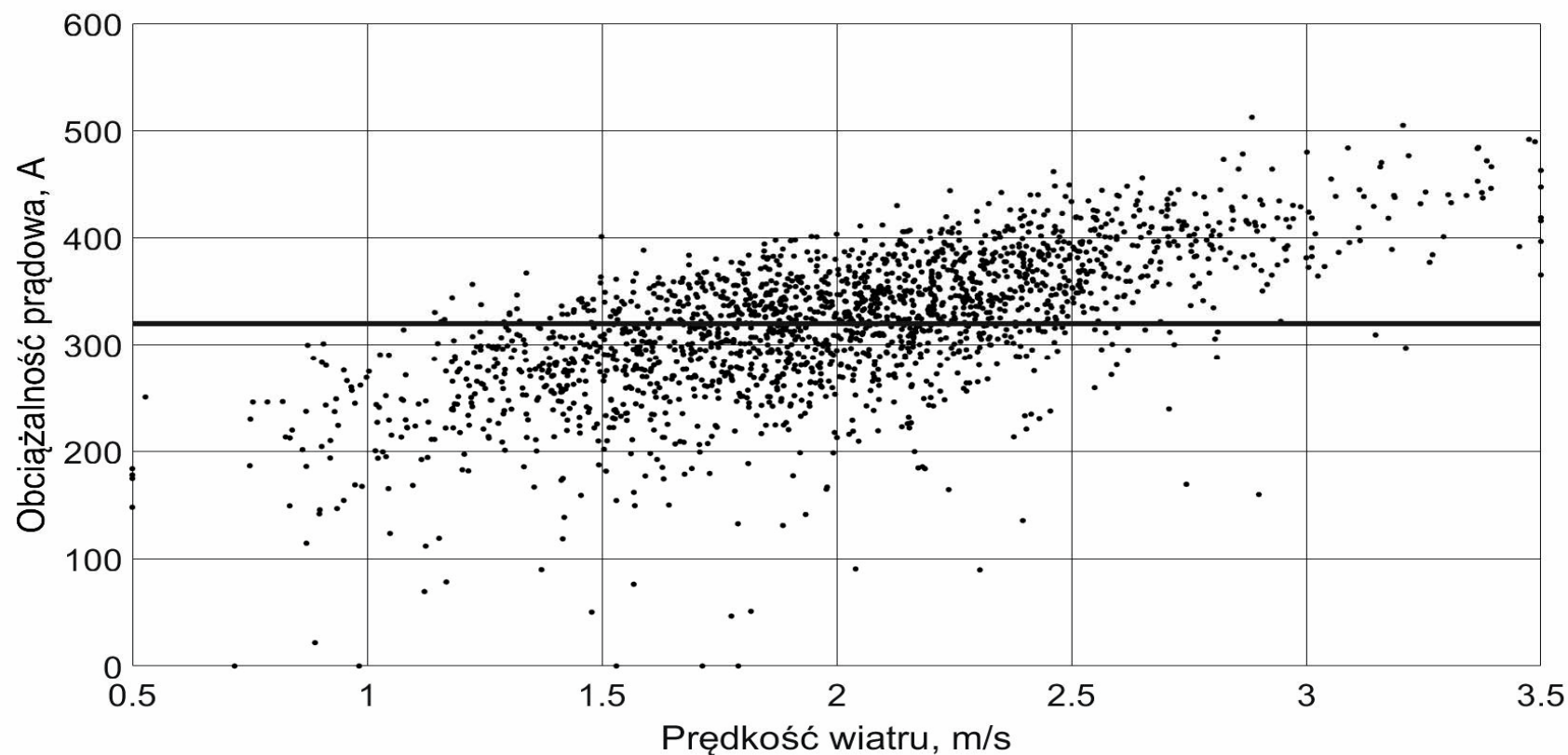


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 76. Zmienność dopuszczalnej obciążalności przewodu AFL-6 240



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zależność na obciążalność kabli umieszczonych w ziemi:

$$I_{\text{dop}} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n_c \cdot (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + n_c \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n_c \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}$$

gdzie:

$\Delta\Theta$ - dopuszczalny wzrost temperatury ponad temperaturę otoczenia,

W_d – jednostkowe straty dielektryczne,

T_1, T_2, T_3, T_4 – rezystancje termiczne otoczenia żyły roboczej i kabla,

R – rezystancja żyły roboczej kabla dla temperatury dopuszczalnej,

n_c - liczba żył kabla.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

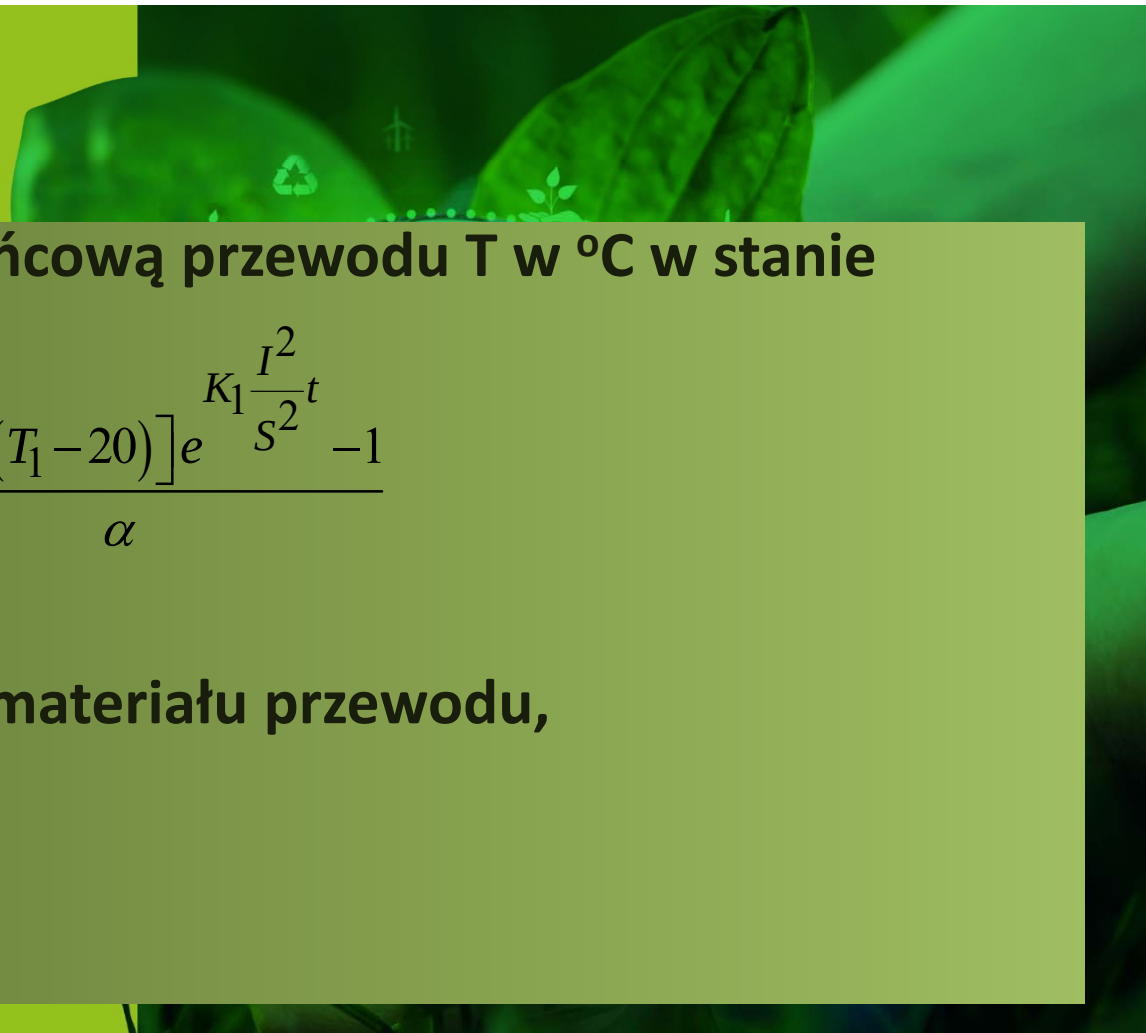


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Wyrażenie określające temperaturę końcową przewodu T w $^{\circ}\text{C}$ w stanie zwarcia:

$$T = 20 + \frac{\left[1 + \alpha \cdot (T_1 - 20)\right] e^{K_1 \frac{I^2}{S^2} t} - 1}{\alpha}$$

Gdzie:

γ - elektryczna przewodność właściwa materiału przewodu,

d – gęstość materiału przewodu,

S – przekrój przewodu,

I - natężenie prądu zwarcia.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 10.

Dla przewodu linii napowietrznej AFL6 70 mm² (najczęściej spotykany przewód w liniach średniego napięcia) należy wyznaczyć temperaturę końcową (Tabela 2), w zależności od czasu trwania zwarcia, dla dwóch przypadków – temperatura początkowa przewodu wynosi 40 °C oraz 80 °C (jest to maksymalna wartość temperatury dopuszczalna dla przewodów aluminiowych AFL w stanie ustalonym), przy założeniu, że prąd zwarcia wynosi 6 kA oraz 8 kA. Uzyskane wyniki należy odnieść do dopuszczalnej krótkotrwale temperatury przewodów aluminiowych wynoszącej 200 °C.

Tabela 2. Wartości końcowej temperatury przewodu AFL6 70 mm² zależności od czasu trwania zwarcia i temperatury początkowej

Czas trwania zwarcia [sek]	6 kA, T ₀ =40 °C	6 kA, T ₀ =80 °C	8 kA, T ₀ =40°C	8 kA, T ₀ =80 °C
0,1	49	90	57	99
0,2	59	102	75	120
0,3	69	113	93	142
0,4	79	125	114	165
0,5	90	137	135	189
0,6	101	150	158	215
0,7	112	163	182	243
0,8	124	177	207	273
0,9	137	191	235	304
1,0	149	205	264	337



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Jak można zauważyć wzrost wartości prądu zwarcia o 2 kA (o 33%) wymaga skrócenia dopuszczalnego czasu trwania zwarcia o połowę (z 1 sek do 0,5 sek). W praktyce, aby uniknąć konieczności prowadzenia obliczeń według wyprowadzonych wyżej wzorów projektanci posługują się pojęciem dopuszczalnej jednosekundowej „gęstości” prądu zwarcia, zdefiniowanej jako:

$$j_{c1} = I_{\text{dop}}(T_{k_dop}; t = 1, 0) / S \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

Dysponując wartością dopuszczalnej gęstości jednosekundowej (w rozpatrywanym przypadku wynosi ona około 6000 A/70 mm², czyli ok. 85 A/mm². Przyjęcie mniejszej wartości prądu początkowego niż 80 °C (np. 40 °C), o ile jest to uzasadnione małym obciążeniem linii, stanowi zabieg „ratunkowy” pozwalający na odłożenie w czasie decyzji o wymianie przewodów na grubsze. Aby uniknąć problemów z wyznaczaniem temperatury początkowej przewodu w stanach niepełnego obciążenia można wykorzystać (szczególnie dla kabli) przybliżoną zależność:

$$T_0 = 20 + \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot (T_{0\text{dop}} - 20)$$

Tym samym, jeśli temperatura dopuszczalna długotrwale wynosi 90 °C (kabel miedziany XLPE), a obciążenie względem obciążenia maksymalnego wynosi 60%, to temperatura początkowa, która może być przyjmowana do obliczania wytrzymałości zwarciowej wynosi 45 °C.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Wykorzystując wartość gęstości jednosekundowej wynoszącej 133 A/mm^2 (kable aluminiowe w izolacji z polietylenu sieciowanego i przekroju żyły 120 mm^2 , stosowane obecnie najczęściej w przebudowie linii SN z napowietrznych na kablowe) otrzymuje się następującą wartość dopuszczalnego prądu zwarcia:

$$I_{\text{th1_dop}} = j_{c1} \cdot S = 141 \cdot 120 = 16,9 \text{ kA}$$

Rzeczywisty czas zwarcia wynikający z działania automatyki zabezpieczeniowej i urządzeń łączeniowych (zagadnienia te są poruszane w dalszej części prezentacji) wynoszący na ogół mniej niż jedna sekunda (szacunkowo w sieci SN przyjmuje się $T_K = 0,45 \text{ sek.}$) powiększa tę wartość, albowiem ilość wydzielonego ciepła zmniejsza się. Przeliczenia wytrzymałości jednosekundowej na wartość rzeczywistą dokonuje się zgodnie z zależnością:

$$I_{\text{th_dop}} = \frac{j_{c1} \cdot S}{\sqrt{T_K}} = \frac{I_{\text{th_dop}}}{\sqrt{T_K}} = \frac{16,9}{\sqrt{0,45}} = 25,2 \text{ kA}$$

Taka wartość dopuszczalnego prądu zwarcia jest całkowicie bezpieczna dla spotykanych w kraju sieci dystrybucyjnych SN.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



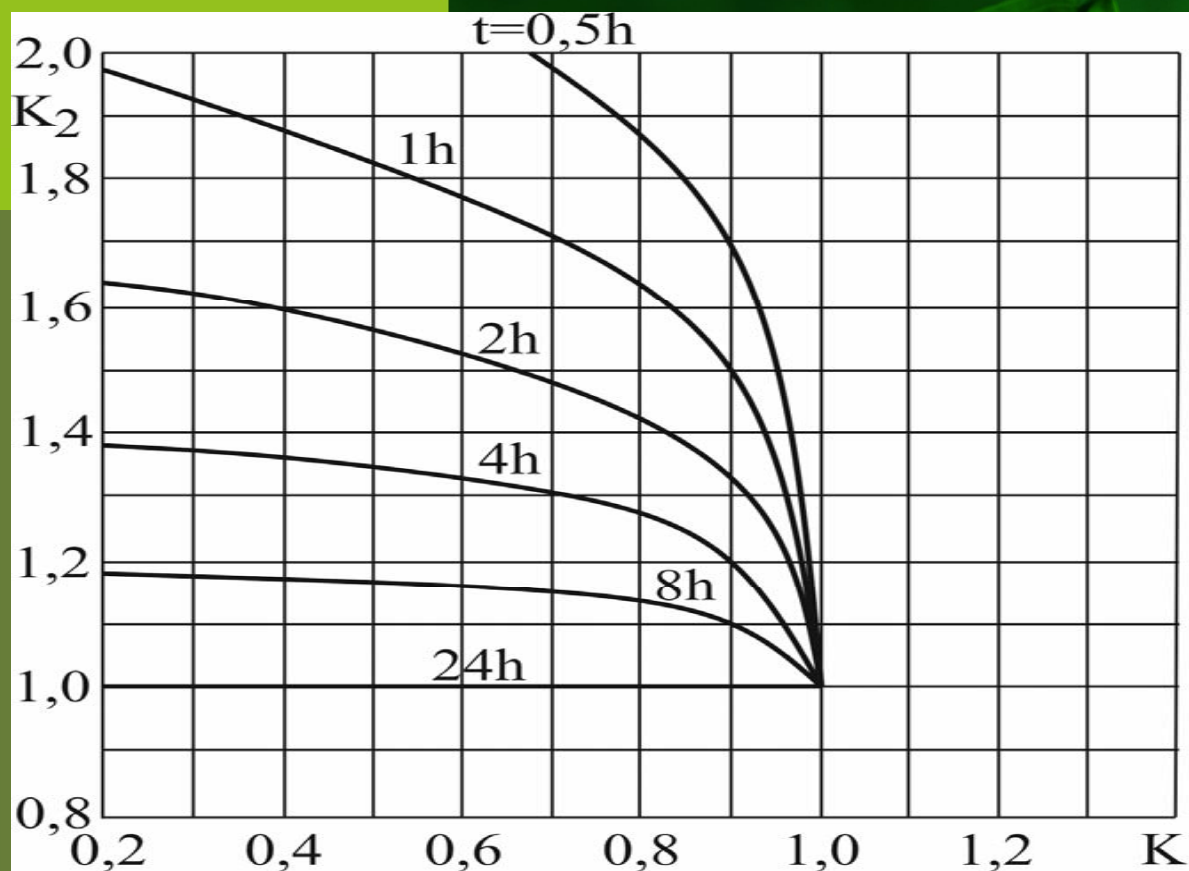
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na wykresie obok K_1 oznacza zadane obciążenie początkowe transformatora natomiast K_2 dopuszczalne obciążenie szczytowe. Zakładając znamionową trwałość izolacji (25 lat), na podstawie Rys. 77, można określić dopuszczalną obciążalność (stopień obciążenia) transformatora w danym okresie. Przykładowo, dla obciążenia początkowego wynoszącego $0,6S_{nT}$ przeciążenie o wartości $1,6S_{nT}$ może trwać prawie 2 godziny.



Rys 77. Dopuszczalna obciążalność (stopień obciążenia) transformatora dla danego czasu jego trwania [30]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Silniki indukcyjne (asynchroniczne) modelowane są za pomocą impedancji Z_M , wyznaczonej według zależności:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{nM}}} \cdot \frac{U_{nM}}{\sqrt{3} \cdot I_{nM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{nM}}} \cdot \frac{U_{nM}^2}{S_{nM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{nM}}} \cdot \frac{U_{nM}^2}{\frac{P_{nM}}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}}$$

U_{nM} - napięcie znamionowe silnika;

I_{nM} - prąd znamionowy silnika;

S_{nM}, P_{nM} - odpowiednio moc znamionowa pozorna, czynna silnika,

$\frac{I_{LR}}{I_{nM}}$ - stosunek prądu przy unieruchomionym wirniku do prądu znamionowego silnika (krotność prądu rozruchowego).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Dławiki zwarciovowe służą do ograniczania prądów zwarcia w sieciach. Odwzorowuje się je za pomocą reaktancji, którą można wyznaczyć z następującej zależności:

$$X_D = \frac{X_{D\%} \cdot U_{nD}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{nD}}$$

Gdzie:

U_{nD} – napięcie znamionowe dławika,

I_{nD} – prąd znamionowy dławika,

$X_{D\%}$ - reaktancja procentowa dławika, %,

X_D - reaktancja dławika, Ω .



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

System zastępczy, w schemacie sieci do obliczeń zwarciovych, zastępowany jest impedancją $\underline{Z}=R+jX$, którą wyznacza się w następujący sposób:

$$X_Q = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{KQ}''}, \quad R_Q \approx 0,1 \cdot X$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



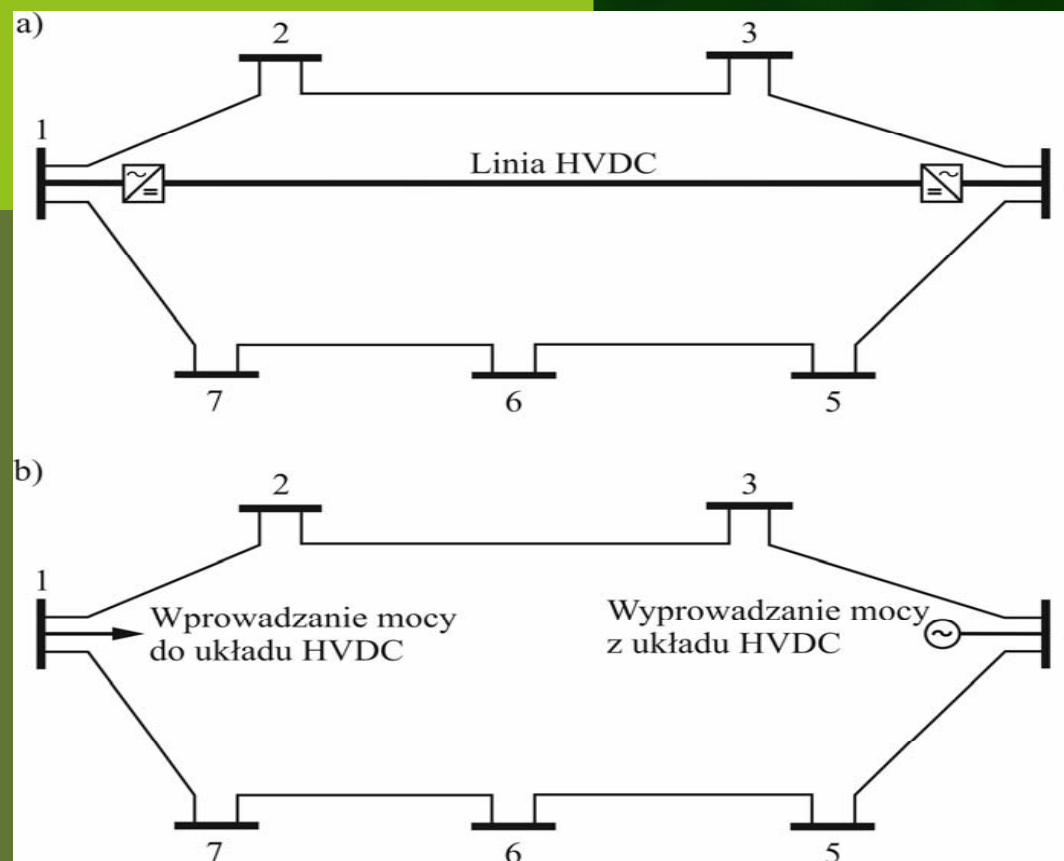
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Węzy 1,2,3,4,5,6,7 należą do systemu prądu przemiennego, a linia HVDC łączy węzły 1-4 w celu zwiększenia przepustowości pomiędzy nimi. Rozpatruje się budowę takiego połączenia między wybrzeżem Bałtyku (farmy morskie) i elektrownia jądrowa a południem Polski (Śląsk pozbawiony elektrowni węglowych)



Rys 78. Modelowanie przesyłu mocy za pomocą układu prądu stałego,
a) schemat poglądowy, b) uproszczony sposób modelowania



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



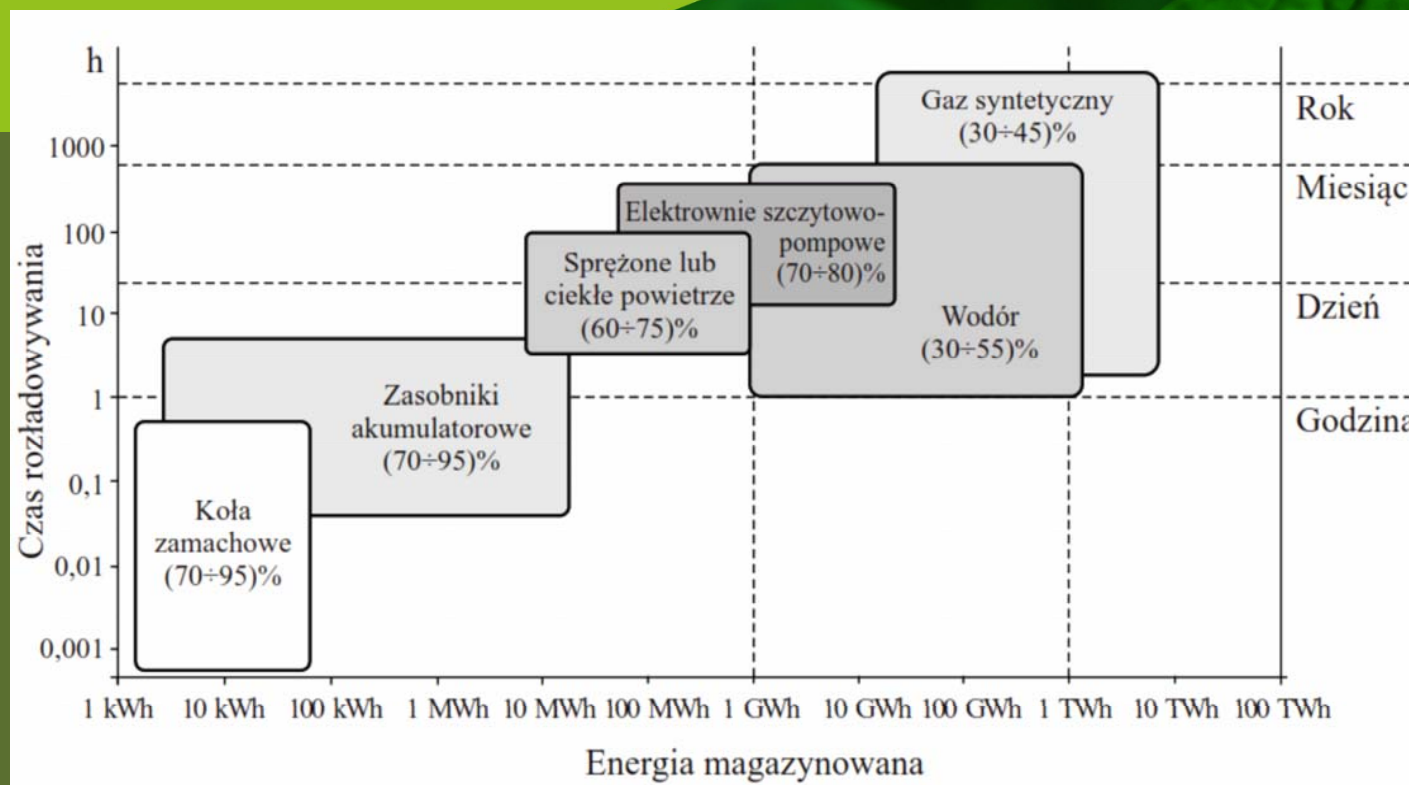
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zbiorcze zestawienie technologii magazynowania energii elektrycznej



Rys 79. Zakresy stosowania niektórych sposobów magazynowania energii [31]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Stacje rozdzielcze



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



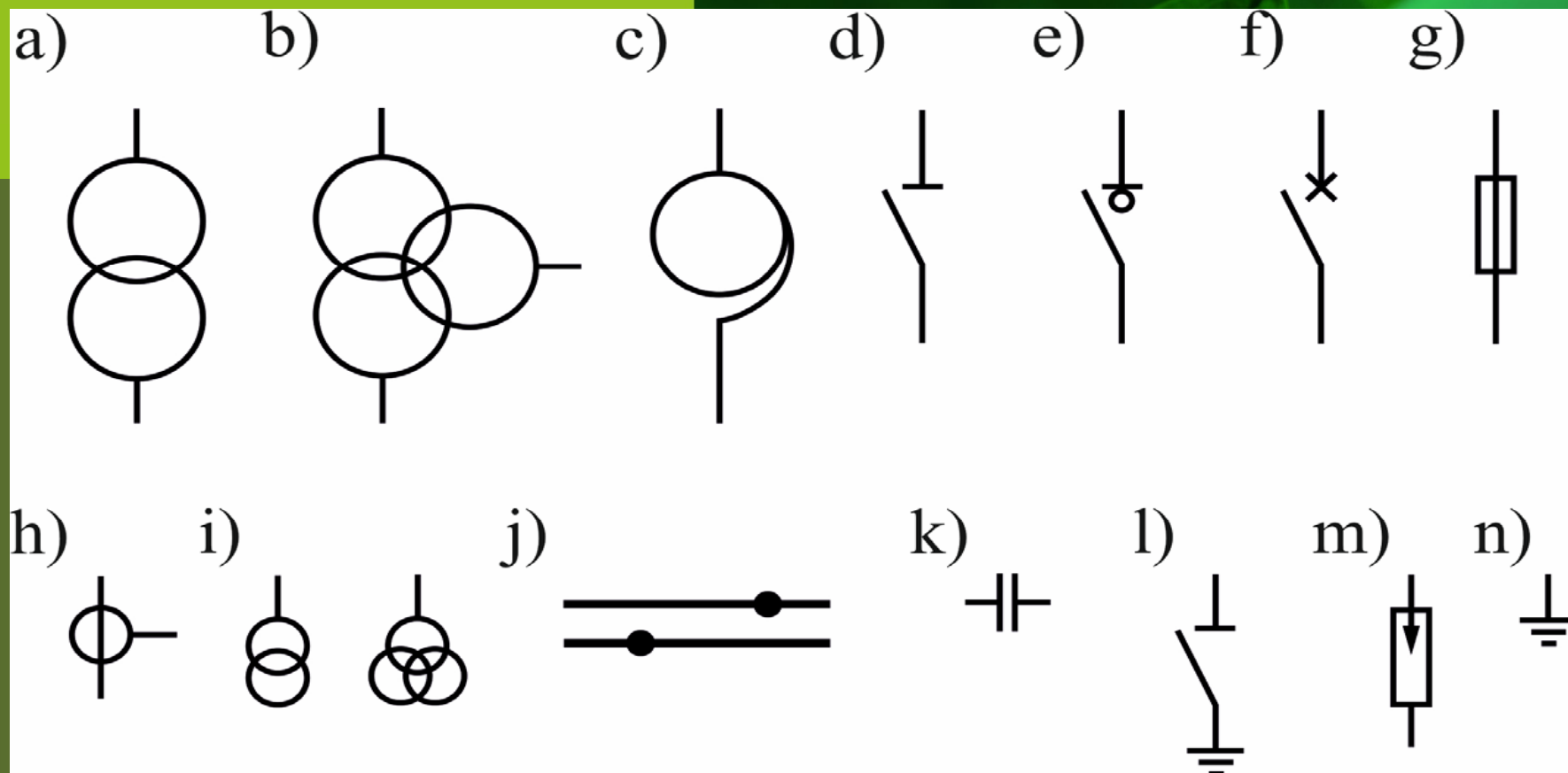
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- a) transformator dwuuzwojeniowy;
- b) transformator trójzwojeniowy;
- c) autotransformator;
- d) odłącznik;
- e) rozłącznik;
- f) wyłącznik;
- g) bezpiecznik;
- h) przekładnik prądowy;
- i) przekładnik napięciowy;
- j) szyny zbiorcze wraz z oznaczonymi polami;
- k) kondensator;
- l) uziemnik;
- m) odgromnik;
- n) uziemienie.



Rys 80. Symbole urządzeń i aparatów elektrycznych stosowane na schematach [32]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

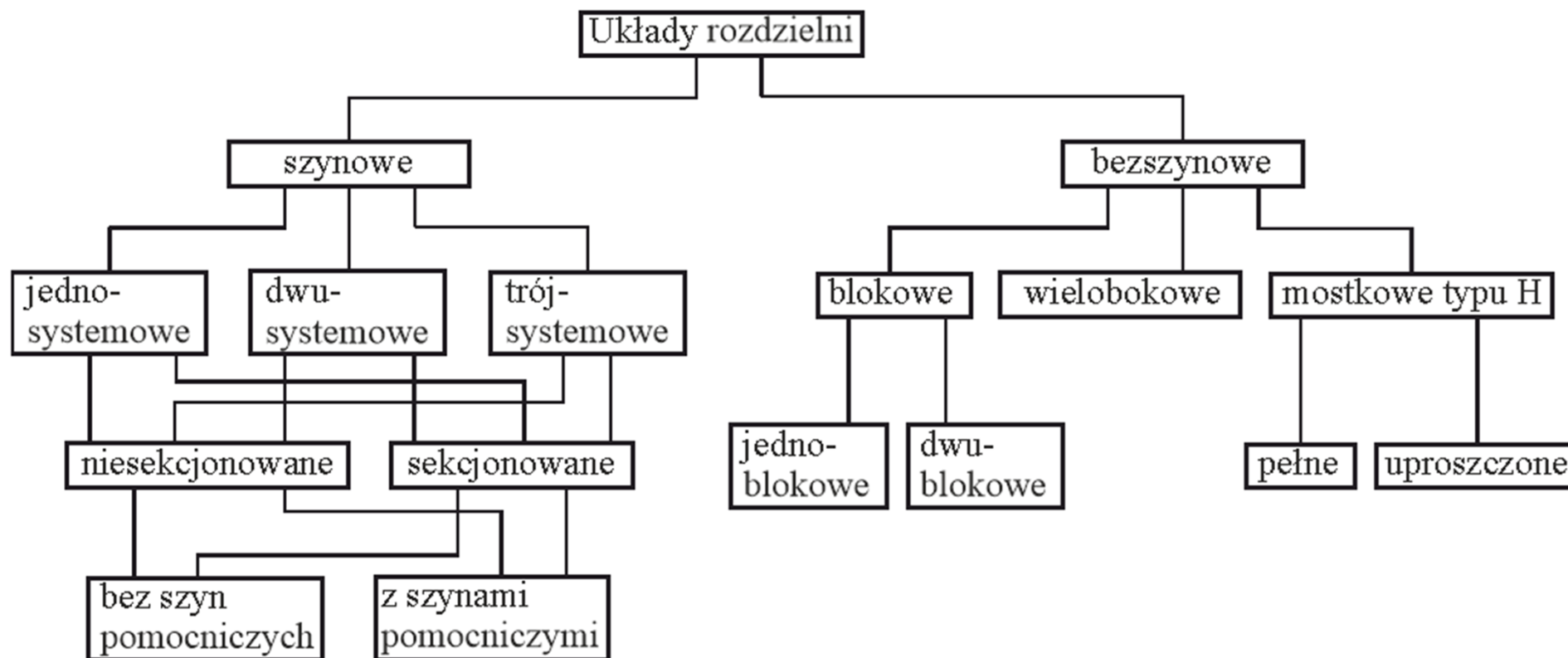


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W praktyce stacje mogą składać się z kilku rozdzielni, zawierających rozdzielnice o różnych układach połączeń. Rozdzielnice powiązane są za pomocą transformatorów. Wybór właściwego układu połączeń rozdzielni zależy głównie od pełnionej funkcji w SEE, napięcia znamionowego, liczby pól, niezależnych zasileń czy rodzaju zasilanych odbiorców. Wyróżnić można dwa główne układy:

- szynowe, np. jedno-systemowe (1S), dwusystemowe (2S) lub trój-systemowe (3S), sekcjonowane lub nie, z szynami pomocniczymi (obejściowymi - SO) lub bez,
- bezszynowe – np. blokowe (LT), mostkowe (H), wielobokowe.

Na Rys. 81 przedstawiono podział układów połączeń rozdzielni.



Rys 81. Układ połączeń rozdzielni elektroenergetycznych [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

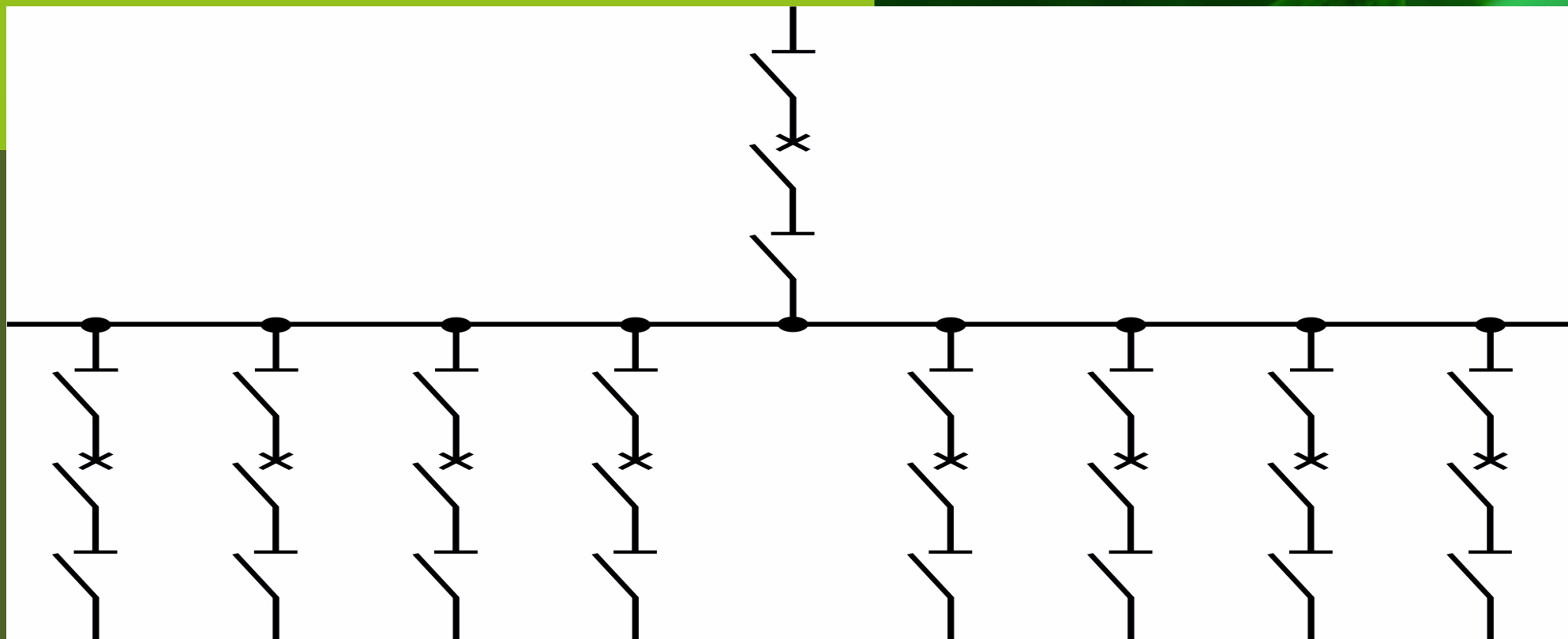


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 82. Schemat rozdzielni z pojedynczym systemem szyn zbiorczych, niesekcjonowany [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

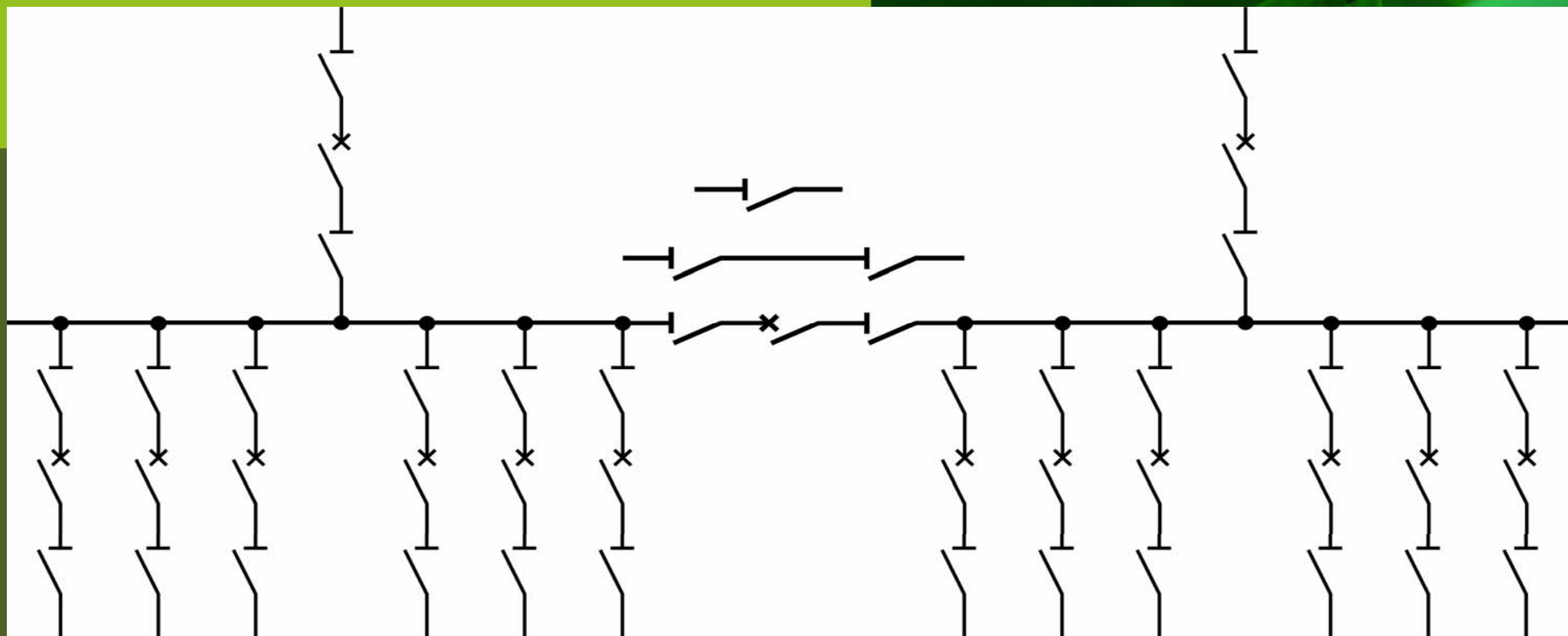


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



**Rys 83. Schemat rozdzielni z pojedynczym systemem szyn zbiorczych,
sekcjonowany [33]**



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

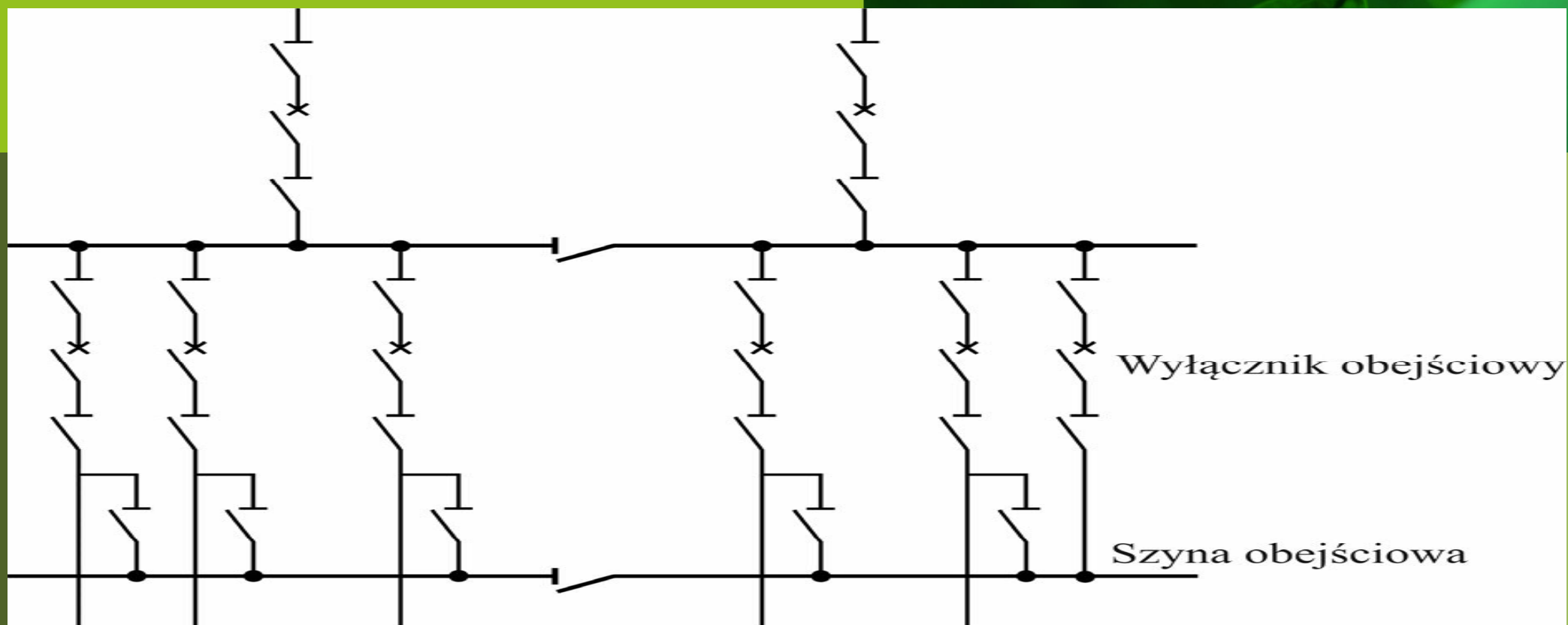


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 83. Schemat rozdzielni z pojedynczym systemem szyn zbiorczych, sekcjonowany z szyną obejściową i wyłącznikiem obejściowym [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

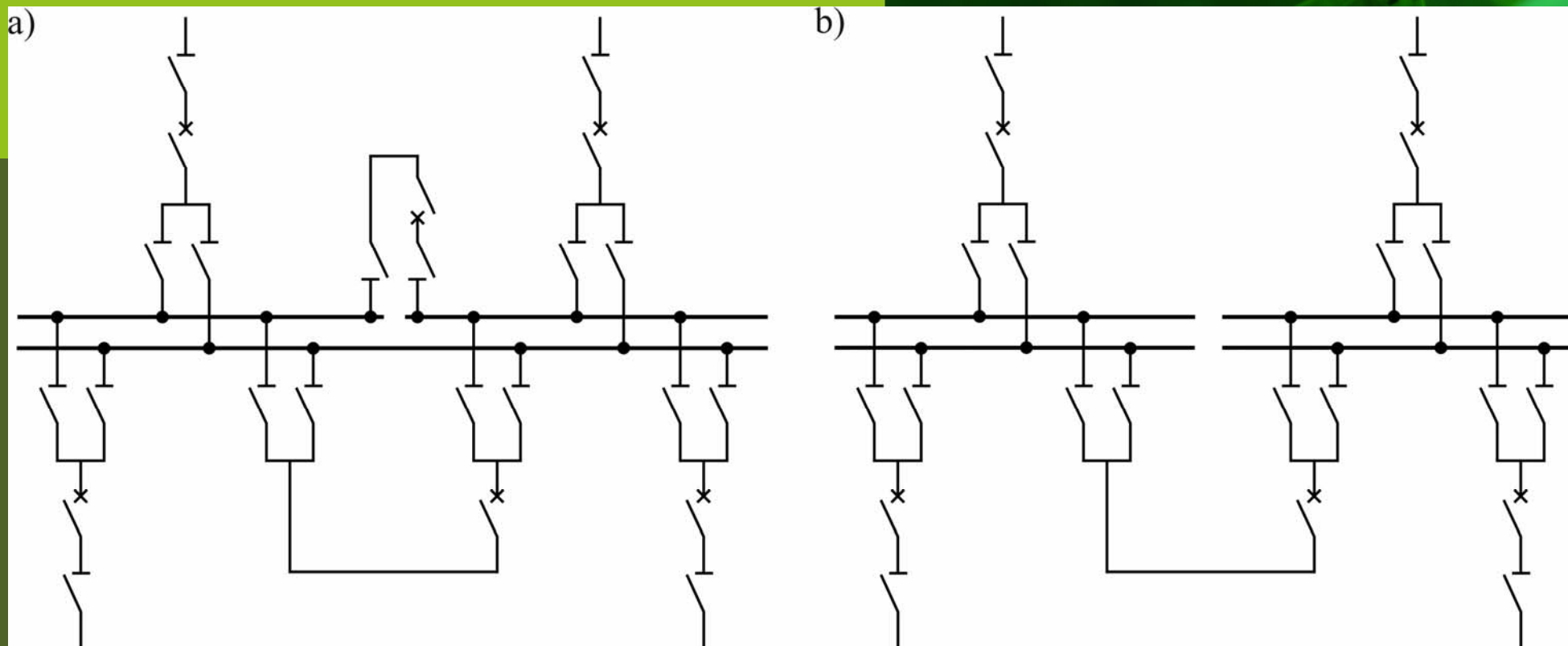


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 84. Schemat rozdzielni z podwójnym systemem szyn zbiorczych z wyłącznikami systemowymi, sekcjonowany: a) z jedną szyną sekcjonowaną, b) z dwiema szynami sekcjonowanymi [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

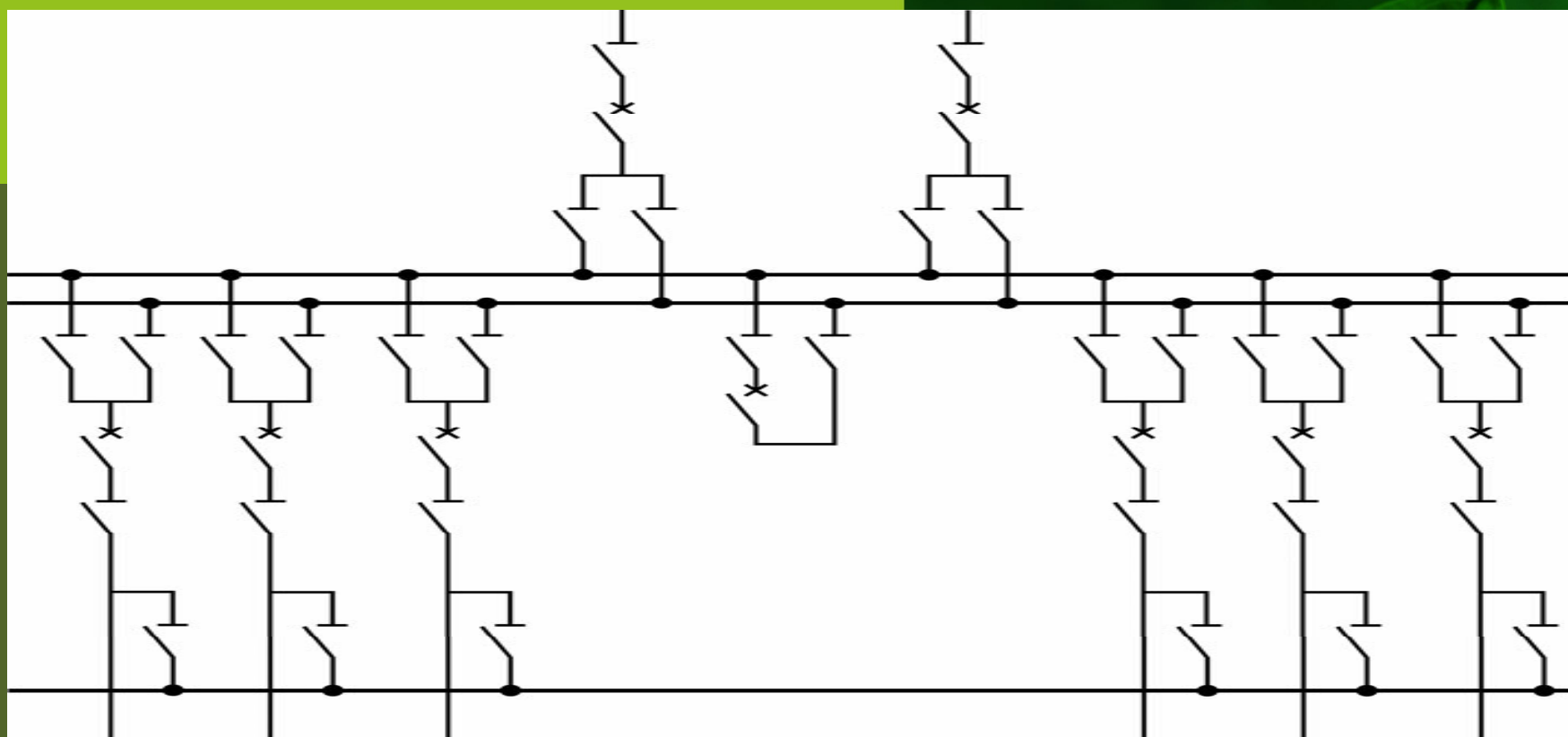


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 85. Schemat rozdzielni z podwójnym systemem szyn zbiorczych, niesekcjonowany z szyną pomocniczą (obejściową) [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

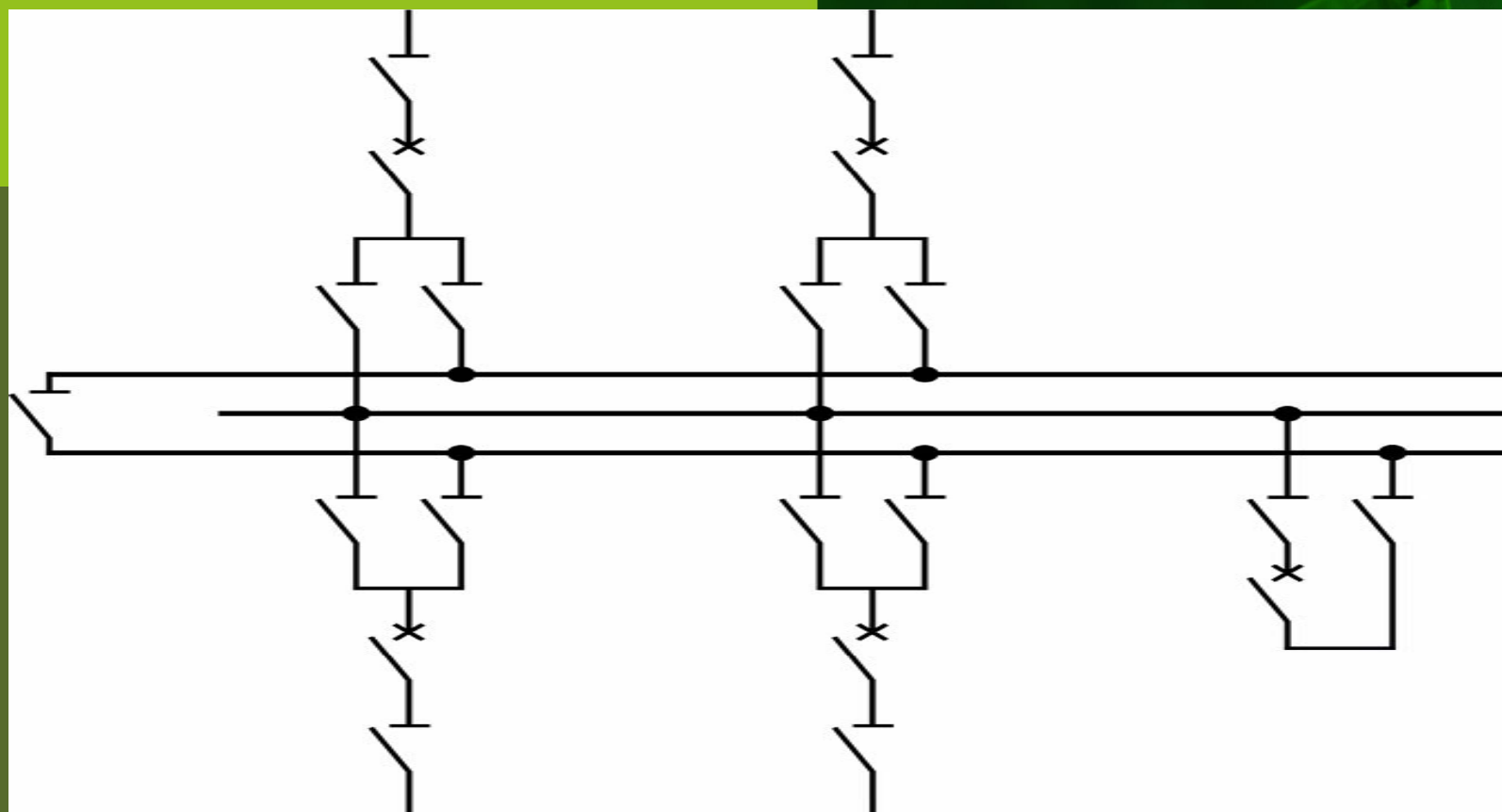


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 86. Schemat rozdzielni z podwójnym systemem szyn zbiorczych w układzie U [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

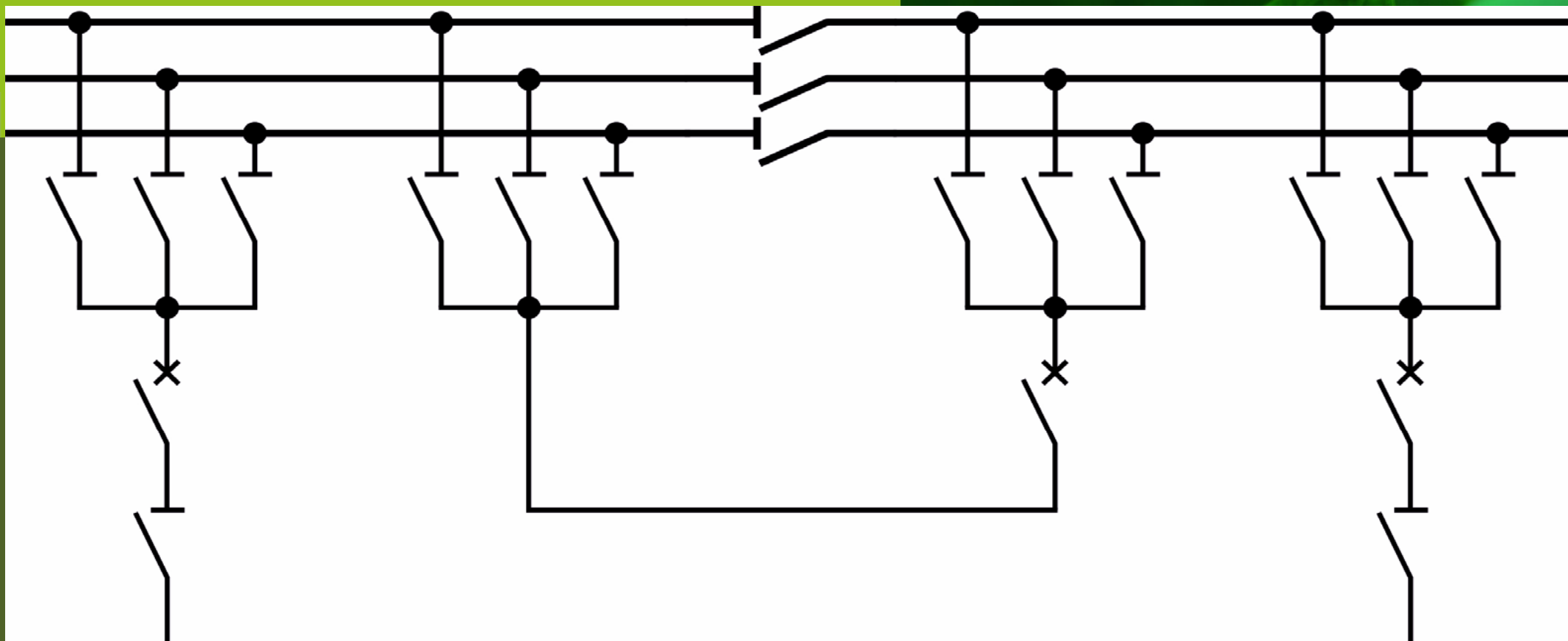


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 87. Schemat rozdzielni z potrójnym systemem szyn zbiorczych w układzie [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

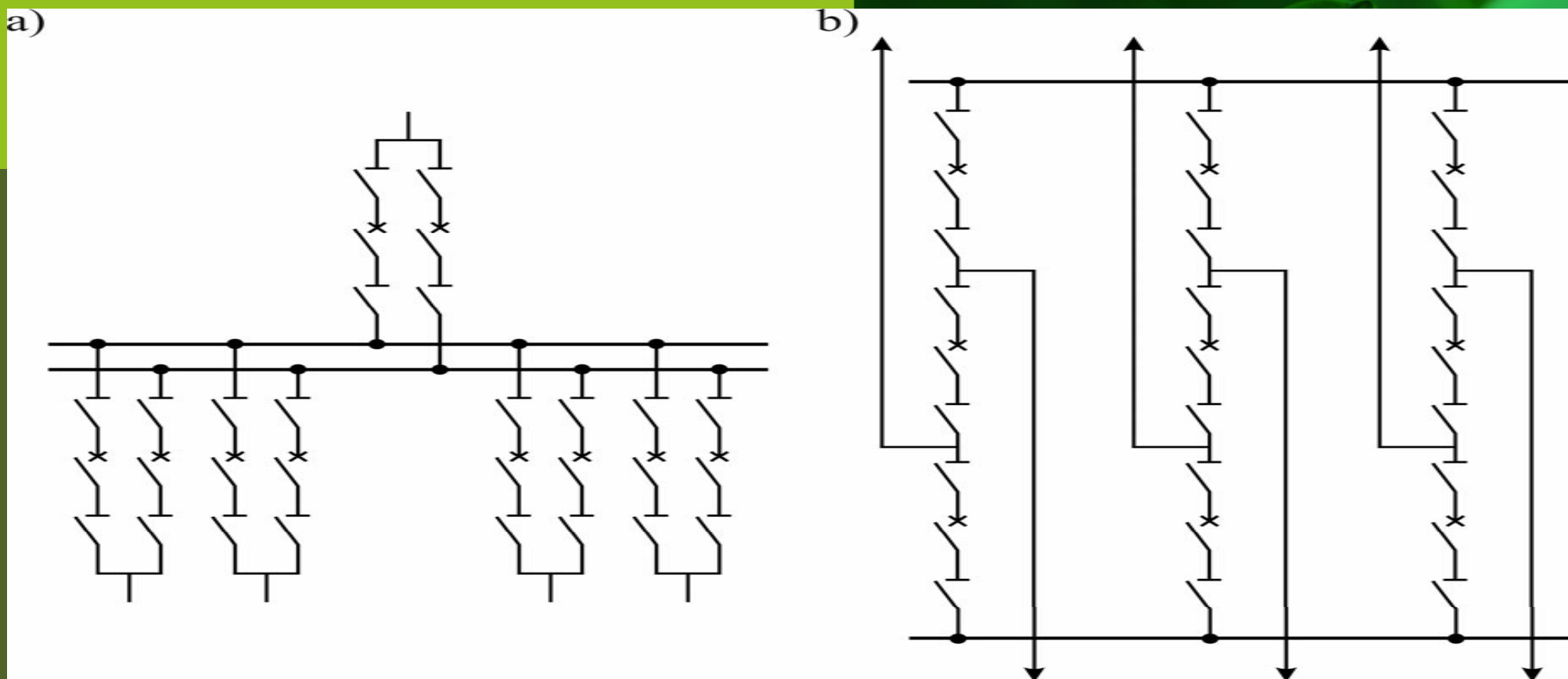


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 88. Schemat rozdzielni z podwójnym systemem szyn zbiorczych : a) z dwoma wyłącznikami na jedno pole, b) z trzema wyłącznikami na dwa pola [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

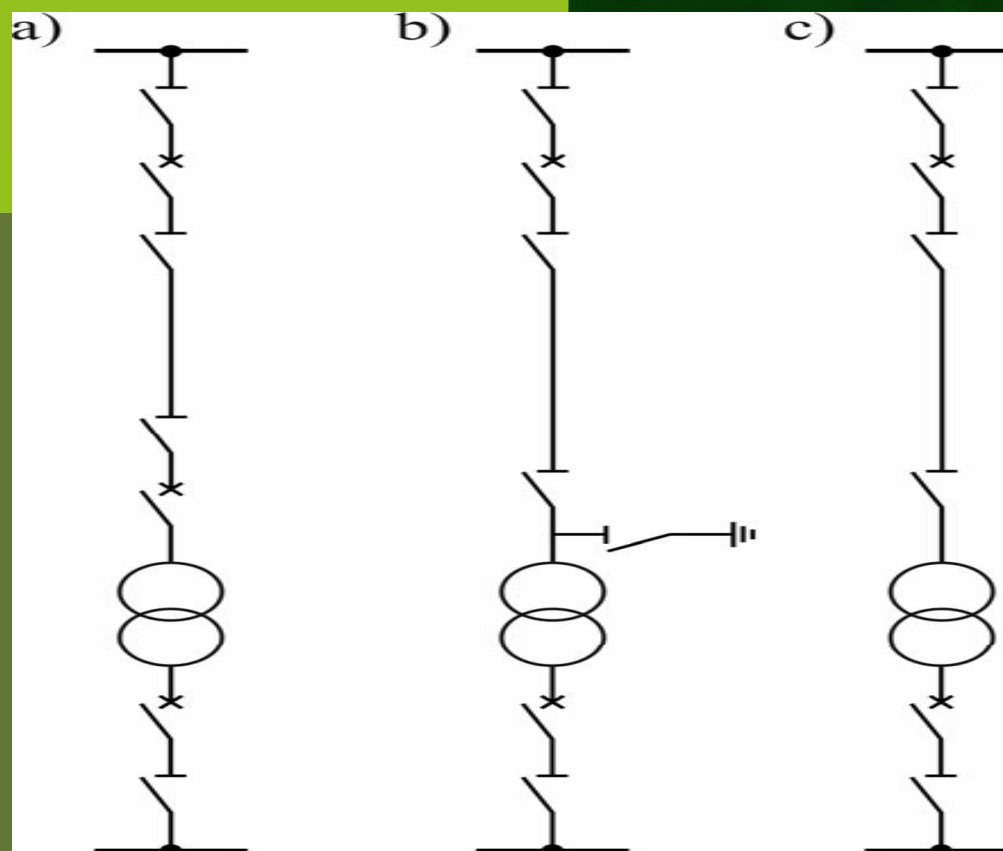


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 89. Schemat rozdzielni w układzie blokowym: a) z wyłącznikiem, b) ze zwiernikiem, c) z odłącznikiem [33]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

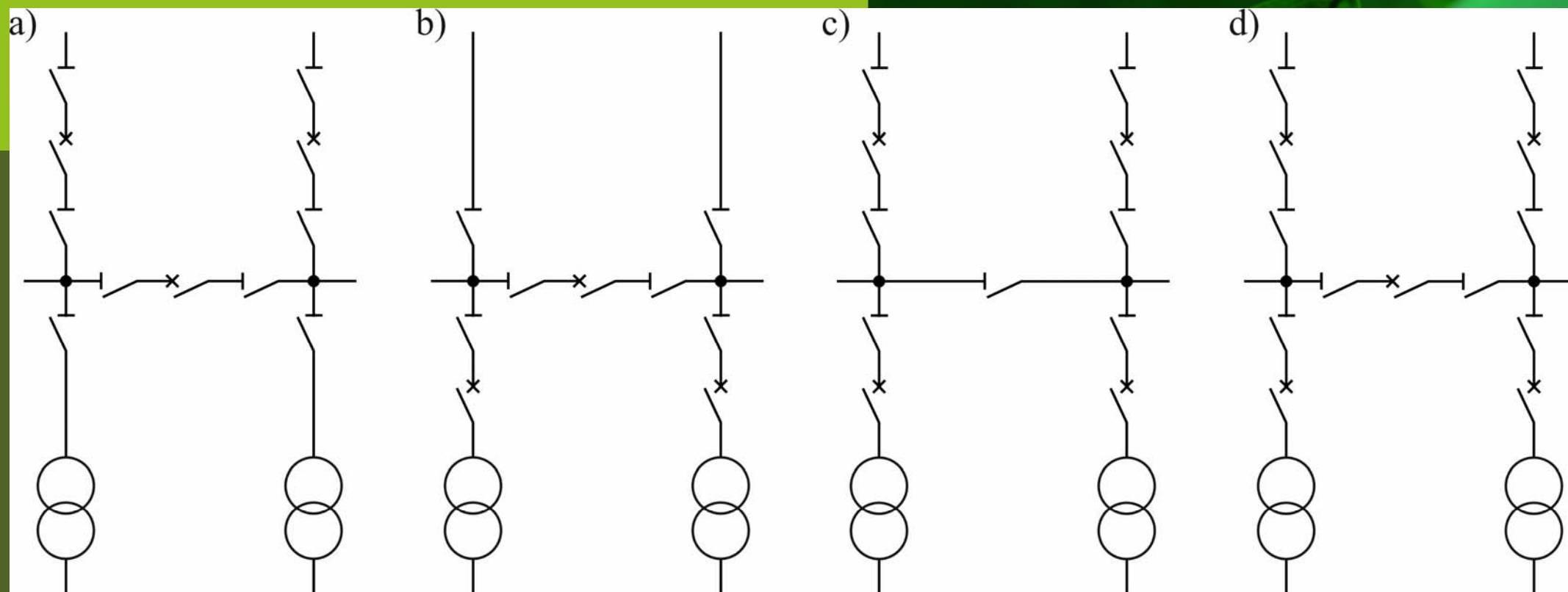


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 90. Schemat rozdzielni w układzie mostkowym : a) H3, b) H3t, c) H4, d) H5 [33,34]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

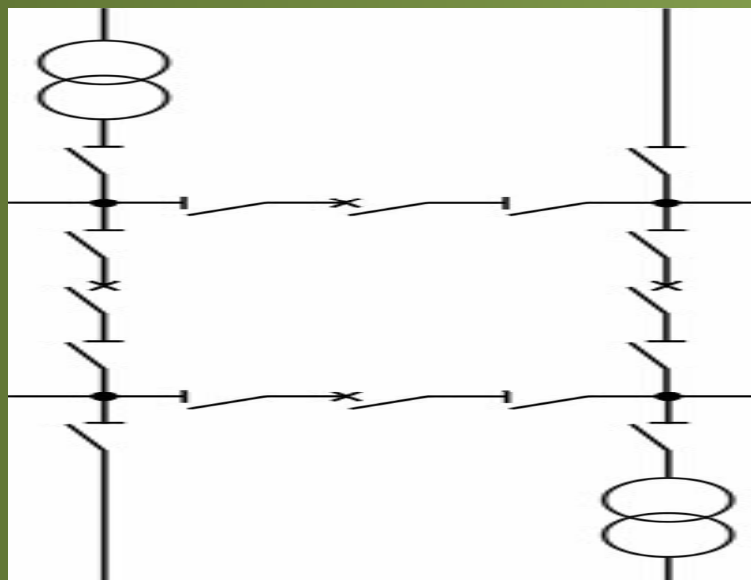


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 91. Schemat w układzie czworoboku [33,34]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

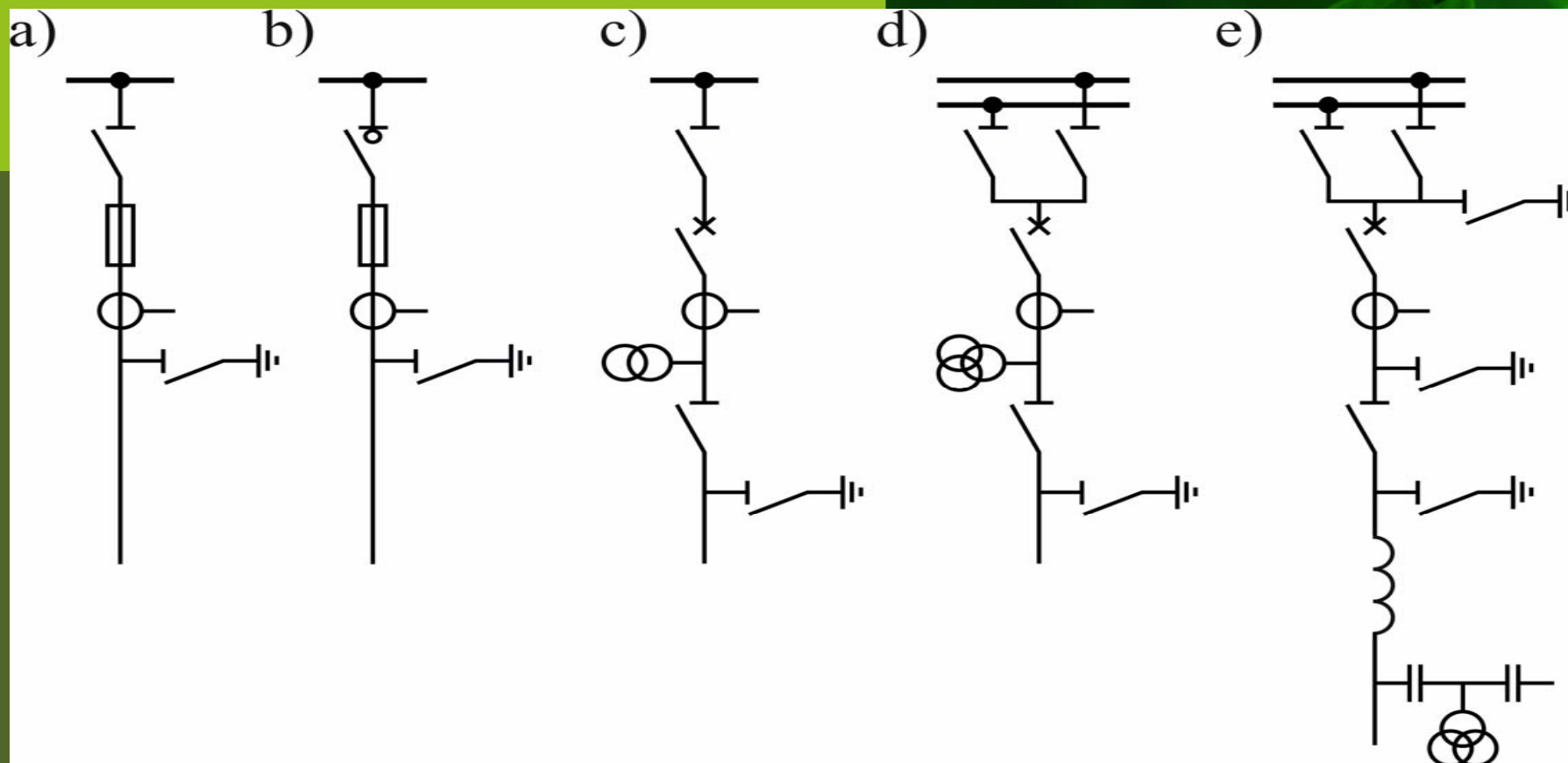


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 92. Typowe rozwiązania pól liniowych SN (a,b,c) oraz WN (d,e) [33,35]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Spadki, straty i odchylenia napięcia



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

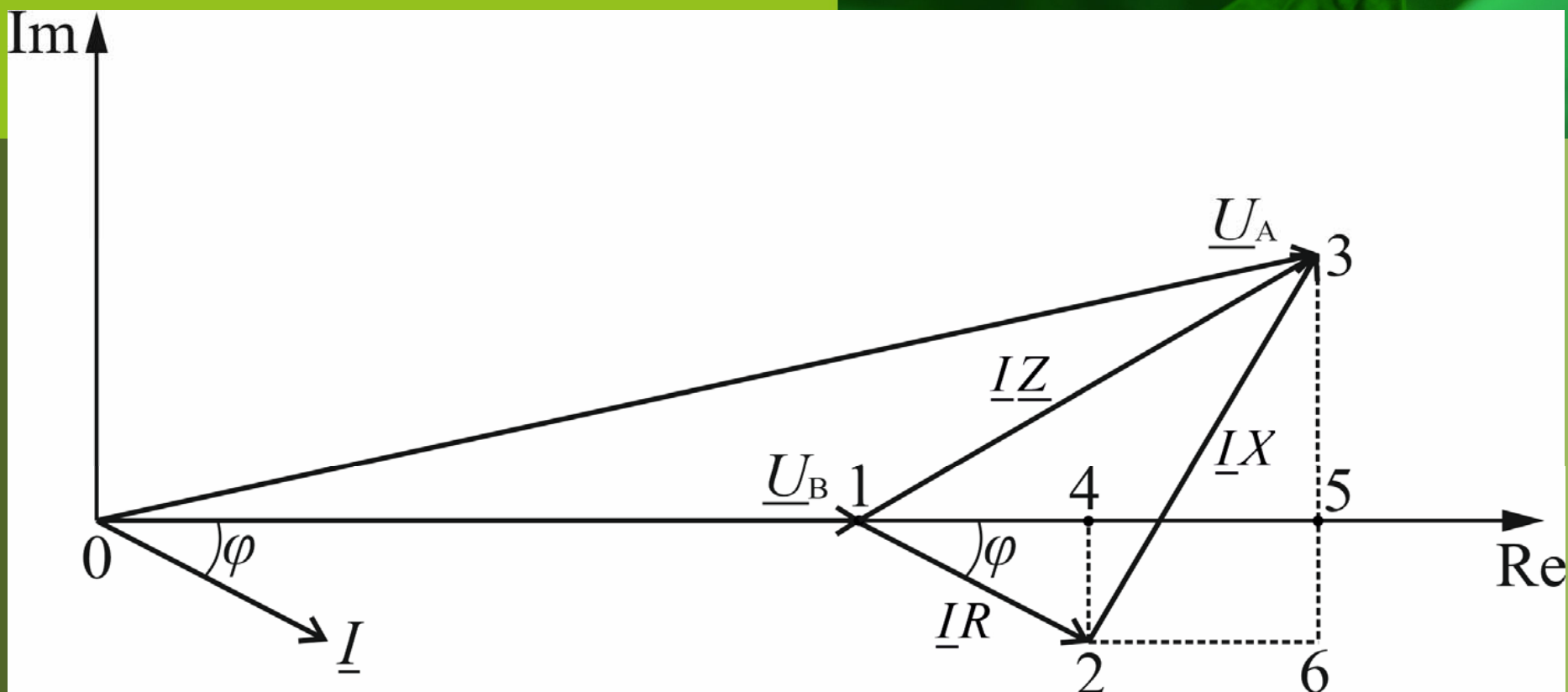


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 93. Wykres wektorowy prądów i napięć dla obciążenia o charakterze indukcyjnym (pobór mocy biernej z sieci)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

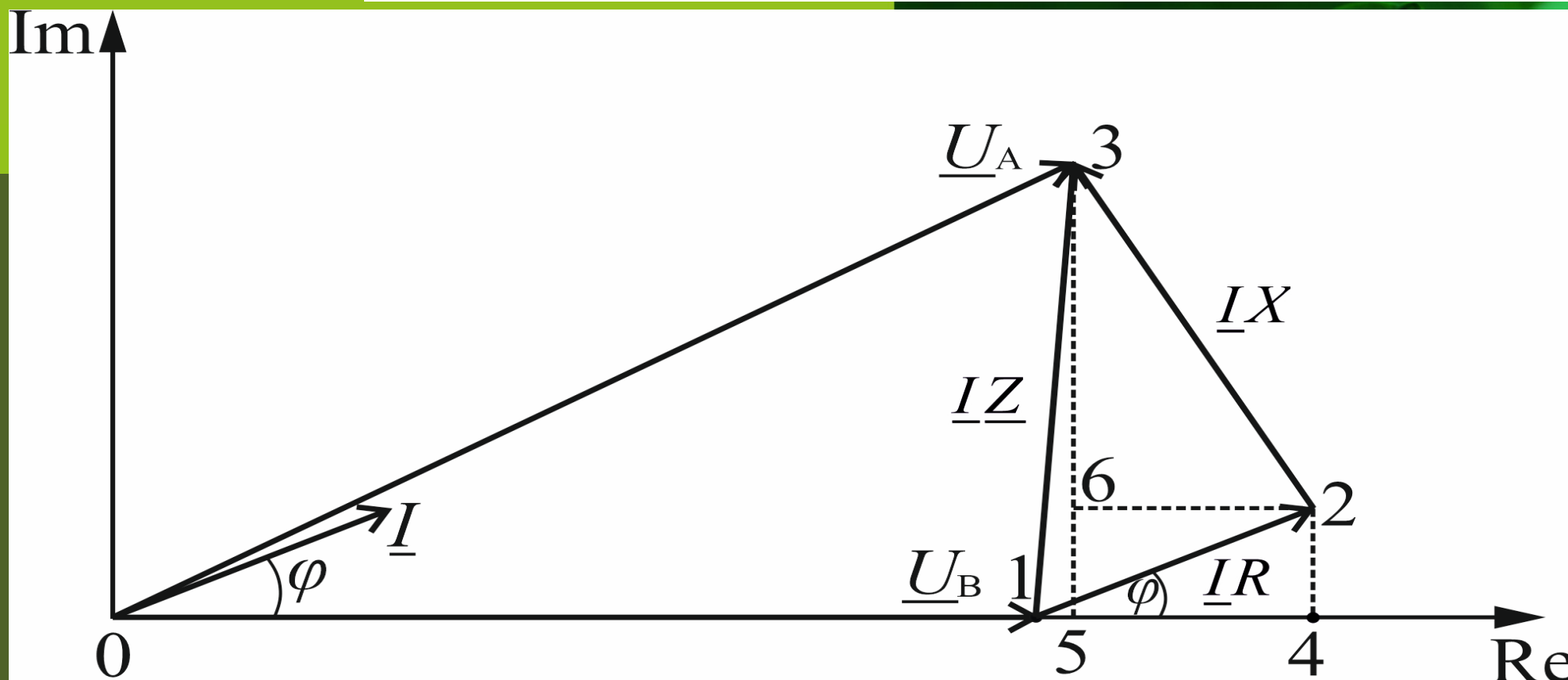


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 94. Wykres wektorowy prądów i napięć dla obciążenia o charakterze pojemnościowym
(wprowadzenie mocy biernej do sieci)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 11.

Dana jest trójfazowa linia o napięciu znamionowym 15 kV, wykonana przewodami AFL 6-70 i długości 15 km. Należy przyjąć, że reaktancja jednostkowa $X' = 0,4 \Omega/\text{km}$.

Obliczyć stratę oraz procentowy spadek napięcia dla dwóch wariantów obciążenia:

$P = 800 \text{ kW}$, $\text{tg} \varphi = 0,4$ (pobór mocy biernej),

$P = 800 \text{ kW}$, $\text{tg} \varphi = 0,4$ (wprowadzanie mocy biernej).

Parametry wzdłużne linii (R oraz X) wynoszą:

$$R = R' \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l = \frac{1000}{34 \cdot 70} \cdot 15 = 0,42 \cdot 15 = 6,3 \Omega$$

$$X = X' \cdot l = 0,4 \cdot 15 = 6 \Omega$$

$$\underline{Z} = R + jX = (6,3 + j6) \Omega$$

Prąd obciążenia linii dla wariantu a) można wyznaczyć z mocy odbioru w następujący sposób:

$$\underline{I} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi - j \sin \varphi) = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,93} \cdot (0,93 - j0,368) = (30,79 - j12,18) \text{ A}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Składowa czynna prądu $I^c = 30,79$ A, natomiast składowa bierna $I^b = -12,18$ A.

Znak „-” oznacza charakter indukcyjny prądu, czyli występuje pobór mocy biernej z sieci.

Prąd obciążenia linii dla wariantu b) można wyznaczyć z mocy odbioru w następujący sposób:

$$\underline{I} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,93} \cdot (0,93 + j0,368) = (30,79 + j12,18) \text{ A}$$

Składowa czynna prądu $I^c = 30,79$ A, natomiast składowa bierna $I^b = 12,18$ A.

Znak „+” oznacza charakter pojemnościowy prądu, czyli występuje wprowadzanie mocy biernej do sieci.

Strata napięcia dla wariantu a):

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{I} \cdot \underline{Z} = \sqrt{3} \cdot (30,79 - j12,18) \cdot (6,3 + j6) = (462,6 + j187,1) \text{ V}$$

Spadek napięcia dla wariantu a):

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (I^c \cdot R - I^b \cdot X) = \sqrt{3} \cdot [30,79 \cdot 6,3 - (-12,18) \cdot 6] = 462,6 \text{ V}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Procentowy spadek napięcia dla wariantu a):

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100\% = \frac{462,6}{15 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 3,08\%$$

Strata napięcia dla wariantu b):

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{I} \cdot \underline{Z} = \sqrt{3} \cdot (30,79 + j12,18) \cdot (6,3 + j6) = (209,4 + j452,9) \text{ V}$$

Spadek napięcia dla wariantu b):

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (I^c \cdot R - I^b \cdot X) = \sqrt{3} \cdot (30,79 \cdot 6,3 - 12,18 \cdot 6) = 209,4 \text{ V}$$

Procentowy spadek napięcia dla wariantu b):

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100\% = \frac{209,4}{15 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 1,4\%$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

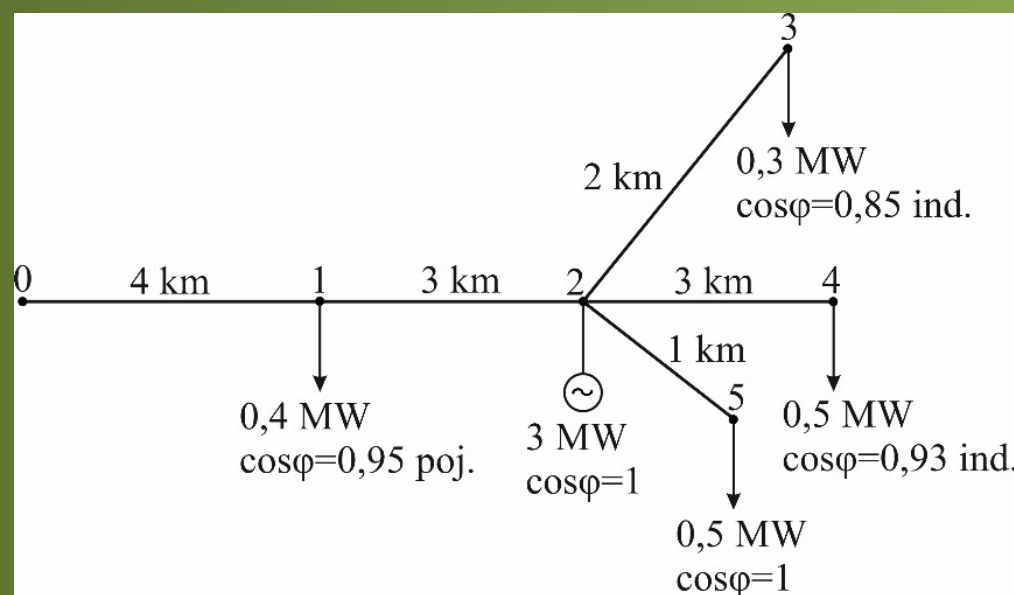
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 12.

Wyznaczyć rozływ prądów oraz maksymalny, procentowy spadek napięcia w sieci o napięciu znamionowym $U_n = 15 \text{ kV}$ przedstawionym Rys. 95. Poszczególne odcinki linii wykonane są przewodami AFL 6-70. Przyjąć, że reaktancja jednostkowa $X' = 0,4 \, \Omega/\text{km}$.



Rys 95. Schemat układu do zadania



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na wstępie należy zauważyć, że w przypadku źródła przyłączonego w węźle numer 2 przyjmuje się prąd ze znakiem ujemnym, ze względu na generację mocy. Rozpatrywana sieć jest siecią rozgałęzioną dlatego też do wyznaczenia spadków napięć wykorzystana będzie metoda odcinkowa jako łatwiejsza. Aby obliczyć maksymalny spadek napięcia w tej sieci konieczne jest wyznaczenie trzech spadków napięcia na drodze 0-3, 0-4 oraz 0-5. Maksymalny spadek napięcia będzie równy największej z obliczonych wartości.

Parametry wzdłużne (R oraz X) poszczególnych odcinków linii 15 kV wynoszą:

$$R_{01} = R'_{01} \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l = \frac{1000}{34 \cdot 70} \cdot 4 = 0,42 \cdot 4 = 1,68 \Omega$$

$$X_{01} = X'_{01} \cdot l = 0,4 \cdot 4 = 1,6 \Omega$$

$$R_{12} = R'_{12} \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l = \frac{1000}{34 \cdot 70} \cdot 3 = 0,42 \cdot 3 = 1,26 \Omega$$

$$X_{12} = X'_{12} \cdot l = 0,4 \cdot 3 = 1,2 \Omega$$

$$R_{23} = R'_{23} \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l = \frac{1000}{34 \cdot 70} \cdot 2 = 0,42 \cdot 2 = 0,84 \Omega$$

$$X_{23} = X'_{23} \cdot l = 0,4 \cdot 2 = 0,8 \Omega$$

$$R_{24} = R'_{24} \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l = \frac{1000}{34 \cdot 70} \cdot 3 = 0,42 \cdot 3 = 1,26 \Omega$$

$$X_{24} = X'_{24} \cdot l = 0,4 \cdot 3 = 1,2 \Omega$$

$$R_{25} = R'_{25} \cdot l = \frac{1000}{\gamma \cdot S} \cdot l = \frac{1000}{34 \cdot 70} \cdot 1 = 0,42 \cdot 1 = 0,42 \Omega$$

$$X_{25} = X'_{25} \cdot l = 0,4 \cdot 1 = 0,4 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Prądy w poszczególnych punktach odbiorczych oraz generacyjnym wynoszą:

$$\underline{I}_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \frac{0,4 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,95} \cdot (0,95 + j0,312) = (15,4 + j5,06) \text{ A}$$

$$\underline{I}_2 = - \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = - \frac{3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 1} \cdot (1 + j0) = -115,47 \text{ A}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi - j \sin \varphi) = \frac{0,3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,85} \cdot (0,85 - j0,527) = (11,55 - j7,16) \text{ A}$$

$$\underline{I}_4 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi - j \sin \varphi) = \frac{0,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,93} \cdot (0,93 - j0,368) = (19,25 - j7,61) \text{ A}$$

$$\underline{I}_5 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \cdot (\cos \varphi - j \sin \varphi) = \frac{0,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 1} \cdot (1 - j0) = 19,25 \text{ A}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Prądy płynące w poszczególnych odcinkach linii wynoszą:

$$\underline{I}_{01} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 = (-50,04 + j9,7) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 = (-65,43 - j14,76) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{23} = \underline{I}_3 = (11,55 - j7,16) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{24} = \underline{I}_4 = (19,25 - j7,61) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{25} = \underline{I}_5 = 19,25 \text{ A}$$

Spadek napięcia na odcinku 0-3:

$$\Delta U_{03} = \sqrt{3} \cdot \left(I_{01}^c \cdot R_{01} - I_{01}^b \cdot X_{01} + I_{12}^c \cdot R_{12} - I_{12}^b \cdot X_{12} + I_{23}^c \cdot R_{23} - I_{23}^b \cdot X_{23} \right) = -204,22 \text{ V}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Procentowy spadek napięcia na odcinku 0-3:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{03}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{-204,22}{15 \cdot 10^3} \cdot 100\% = -1,36\%$$

Spadek napięcia na odcinku 0-4:

$$\Delta U_{04} = \sqrt{3} \cdot \left(I_{01}^c \cdot R_{01} - I_{01}^b \cdot X_{01} + I_{12}^c \cdot R_{12} - I_{12}^b \cdot X_{12} + I_{24}^c \cdot R_{24} - I_{24}^b \cdot X_{24} \right) = -173,12 \text{ V}$$

Procentowy spadek napięcia na odcinku 0-4:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{04}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{-173,12}{15 \cdot 10^3} \cdot 100\% = -1,15\%$$

Spadek napięcia na odcinku 0-5:

$$\Delta U_{05} = \sqrt{3} \cdot \left(I_{01}^c \cdot R_{01} - I_{01}^b \cdot X_{01} + I_{12}^c \cdot R_{12} - I_{12}^b \cdot X_{12} + I_{25}^c \cdot R_{25} - I_{25}^b \cdot X_{25} \right) = -216,94 \text{ V}$$

Procentowy spadek napięcia na odcinku 0-5:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{05}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{-216,94}{15 \cdot 10^3} \cdot 100\% = -1,45\%$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W przypadku braku generacji w węźle numer 2 zmianie ulegną wartości prądów w odcinkach 0-1 i 1-2:

$$\underline{I}_{01} = \underline{I}_1 + \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 = (65,45 - j9,7) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 = (50,04 - j14,76) \text{ A}$$

oraz wartości spadków napięcia.

Spadek napięcia na odcinku 0-3:

$$\Delta U_{03} = \sqrt{3} \cdot \left(I_{01}^c \cdot R_{01} - I_{01}^b \cdot X_{01} + I_{12}^c \cdot R_{12} - I_{12}^b \cdot X_{12} + I_{23}^c \cdot R_{23} - I_{23}^b \cdot X_{23} \right) = 384,01 \text{ V}$$

Procentowy spadek napięcia na odcinku 0-3:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U_{03}}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{384,01}{15 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 2,56 \%$$

Procentowy spadek napięcia na odcinku 0-4:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U_{04}}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{415,12}{15 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 2,77 \%$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Spadek napięcia na odcinku 0-5:

$$\Delta U_{05} = \sqrt{3} \cdot \left(I_{01}^c \cdot R_{01} - I_{01}^b \cdot X_{01} + I_{12}^c \cdot R_{12} - I_{12}^b \cdot X_{12} + I_{25}^c \cdot R_{25} - I_{25}^b \cdot X_{25} \right) = 371,3 \text{ V}$$

Procentowy spadek napięcia na odcinku 0-5:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U_{05}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{371,3}{15 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 2,48\%$$

Na podstawie wykonanych obliczeń można stwierdzić, że maksymalny spadek napięcia występuje na odcinku 0-4.

W przykładzie rozpatrzono stan pracy sieci z generacją w źródle równą 3 MW oraz stan bez generacji. Ponieważ generacja przeważa nad sumaryczną mocą pobieraną w węzłach odbiorczych, to w efekcie spadek napięcia jest ujemny, w przeciwieństwie do stanu bez generacji, w którym spadek napięcia jest dodatni. Przykład obrazuje wpływ źródeł na spadki napięcia w sieciach elektroenergetycznych. Źródła przyczyniają się do wzrostu napięcia w węzłach sieci.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Regulacja napięcia



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Konieczność utrzymania wartości napięć w dopuszczalnych przepisami granicach (od $0,9 U_n$ do $1,1 U_n$) wymaga stosowania odpowiednich sposobów regulacji napięcia. Wyróżnia się następujące metody:

- Za pomocą „napięć dodawczych” (zmiana sił elektromotorycznych generatorów oraz przekładni transformatorów);
- Poprzez zmianę impedancji sieci (zmiana struktury sieci, zastosowanie kondensatorów szeregowych);
- Poprzez zmianę rozplływów mocy biernej (zastosowanie kondensatorów lub dławików równoległych). Do tego sposobu regulacji można również uwzględnić możliwość regulacji mocy biernej (pobór/wprowadzanie) w źródłach OZE.

Wymienione sposoby regulacji napięcia zależą między innymi od poziomu napięcia sieci, jej struktury, a także czynników ekonomicznych i technicznych.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

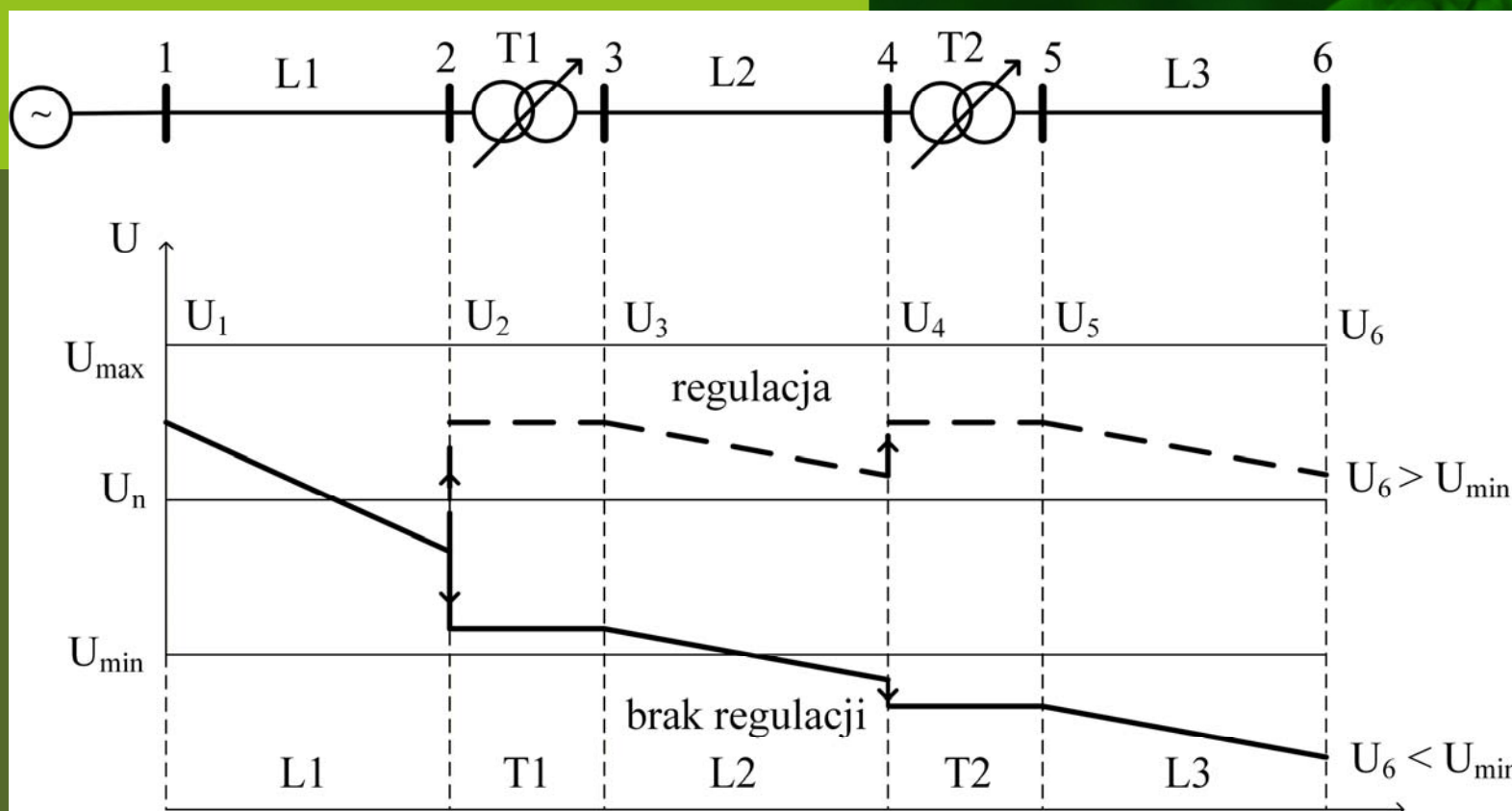


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 96. Regulacja napięcia przez zmianę przekładni transformatora



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

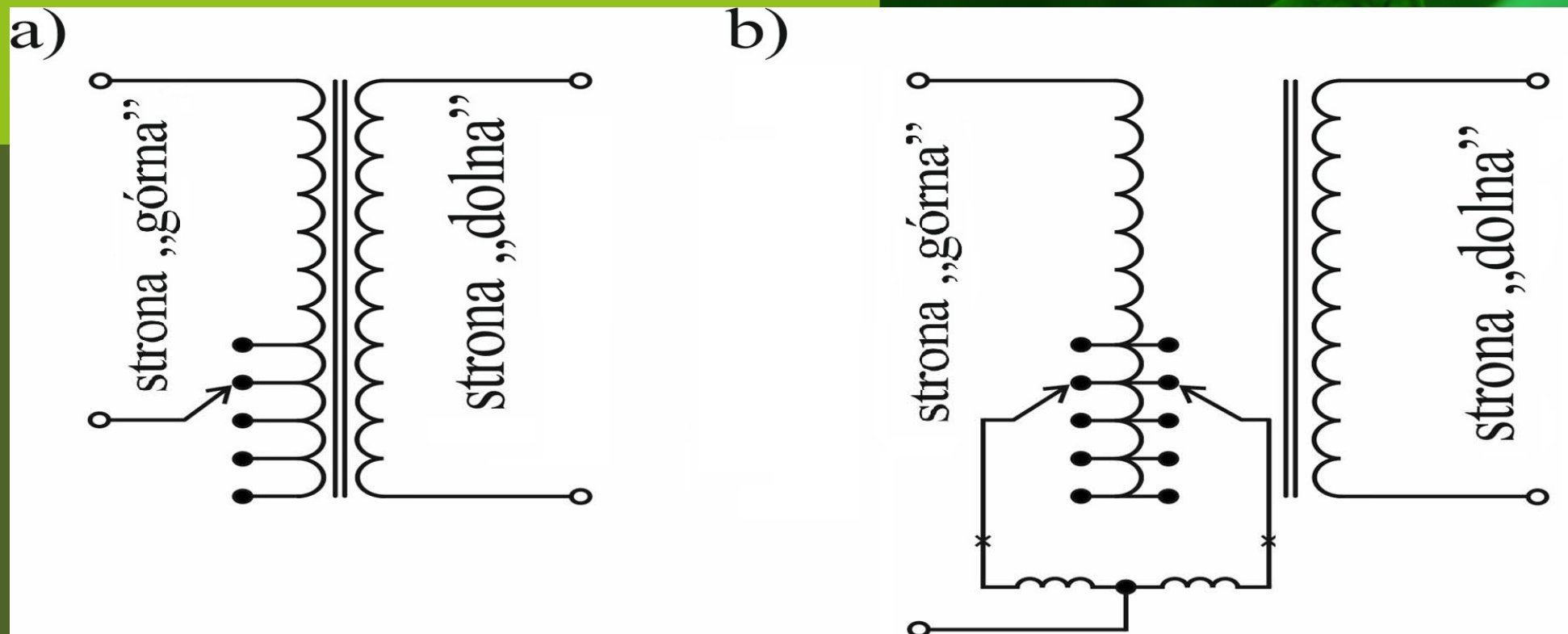


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 97. Poglądowy schemat transformatora z przełącznikiem zaczeów, przystosowanym do regulacji napięcia : a) w stanie beznapięciowym, b) pod obciążeniem [28]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

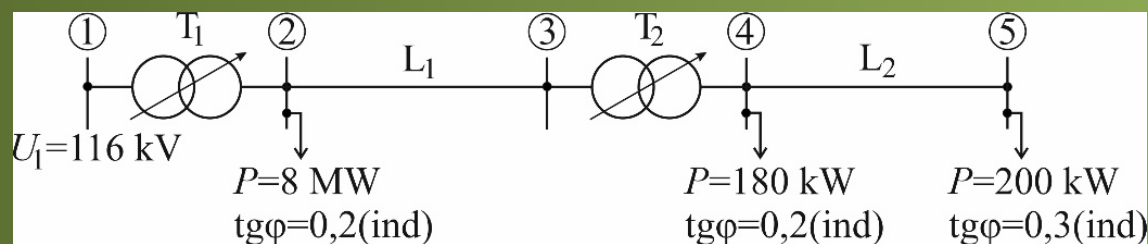
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 13.

W układzie jak na Rys. 98 obliczyć odchylenie napięcia u odbiorcy w punkcie 5. Założyć, że obydwa transformatory pracują na zaczeple zerowym. Jeżeli napięcie w punkcie 5 nie będzie się mieściło w dopuszczalnym przedziale, czyli od $0,9 \cdot U_n$ do $1,1 \cdot U_n$, należy dobrać zaczeple transformatora T2 tak aby wartość napięcia osiągnęła wymagany zakres.



Rys 98. Schemat układu do zadania

Dane:

$$T_1:$$

$$S_n = 16 \text{ MVA}, \vartheta = \frac{115 \text{ kV}}{16,5 \text{ kV}} \pm 10\% (\pm 9 \text{ stopni})$$

$$u_K = 11\%, \Delta p_{Cu} = 0,5\%, \Delta P_{Fe} = 8,8 \text{ kW}$$

$$L_1:$$

$$l_1 = 3 \text{ km}, X' = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}, \gamma = 34 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}, \text{AFL 6-95}, U_n = 15 \text{ kV}$$

$$T_2:$$

$$S_n = 630 \text{ kVA}, \vartheta = \frac{15,75 \text{ kV}}{0,4 \text{ kV}} \pm 5\% (\pm 2 \text{ stopnie})$$

$$u_K = 6\%, \Delta p_{Cu} = 1,05\%, \Delta P_{Fe} = 1,47 \text{ kW}$$

$$L_2:$$

$$l_2 = 0,7 \text{ km}, X' = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}}, \gamma = 34 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}, S = 240 \text{ mm}^2, U_n = 0,4 \text{ kV}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W pierwszej kolejności wyznaczone zostaną parametry elementów tworzących układ.

Transformator (T1):
$$R_T = \frac{\Delta p_{Cu}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{0,5 \cdot (115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 4,133 \Omega$$

$$X_T = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11 \cdot (115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} = 90,922 \Omega$$

Transformator (T2):
$$R_T = \frac{\Delta p_{Cu}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1,05 \cdot (15,75 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 630 \cdot 10^3} = 4,134 \Omega$$

$$X_T = \frac{u_X}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5,907 \cdot (15,75 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 630 \cdot 10^3} = 23,259 \Omega$$

$$u_X = \sqrt{u_K^2 - \Delta p_{Cu}^2} = \sqrt{6^2 - (1,05)^2} = 5,907\%$$

Linia (L1):
$$R_{L1} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{3000}{34 \cdot 95} = 0,929 \Omega$$

$$X_{L1} = X' \cdot l = 0,4 \cdot 3 = 1,2 \Omega$$

Linia (L2):
$$R_{L2} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{700}{34 \cdot 240} = 0,0858 \Omega$$

$$X_{L2} = X' \cdot l = 0,1 \cdot 0,7 = 0,07 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W drugim kroku wyznaczone zostaną spadki napięcia występujące na poszczególnych elementach układu.

Spadek napięcia w transformatorze T1:

$$\Delta U_{T1} = \frac{P_{T1} \cdot R_{T1} + Q_{T1} \cdot X_{T1}}{U_{nH}} = \frac{8,38 \cdot 10^6 \cdot 4,133 + 1,696 \cdot 10^6 \cdot 90,922}{110 \cdot 10^3} = 1,717 \text{ kV}$$

$$P_{T1} = 8 + 0,18 + 0,2 = 8,38 \text{ MW}$$

$$Q_{T1} = 8 \cdot 0,2 + 0,18 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,3 = 1,696 \text{ Mvar}$$

Spadek napięcia w transformatorze T2:

$$\Delta U_{T2} = \frac{P_{T2} \cdot R_{T2} + Q_{T2} \cdot X_{T2}}{U_{nH}} = \frac{380 \cdot 10^3 \cdot 4,134 + 96 \cdot 10^3 \cdot 23,259}{15 \cdot 10^3} = 0,254 \text{ kV}$$

$$P_{T2} = 0,18 + 0,2 = 380 \text{ kW}$$

$$Q_{T2} = 180 \cdot 0,2 + 200 \cdot 0,3 = 96 \text{ kvar}$$



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Spadek napięcia w linii L1:

$$\Delta U_{L1} = \frac{P_{L1} \cdot R_{L1} + Q_{L1} \cdot X_{L1}}{U_n} = \frac{380 \cdot 10^3 \cdot 0,929 + 96 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{15 \cdot 10^3} = 31,21 \text{ V}$$

$$P_{L1} = 180 + 200 = 380 \text{ kW}$$

$$Q_{L1} = 180 \cdot 0,2 + 200 \cdot 0,3 = 96 \text{ kvar}$$

Spadek napięcia w linii L2:

$$\Delta U_{L2} = \frac{P_{L2} \cdot R_{L2} + Q_{L2} \cdot X_{L2}}{U_n} = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 0,0858 + 60 \cdot 10^3 \cdot 0,07}{0,4 \cdot 10^3} = 59,8 \text{ V}$$

$$P_{L2} = 200 \text{ kW}$$

$$Q_{L2} = 200 \cdot 0,3 = 60 \text{ kvar}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Napięcie w punkcie 2 wyniesie:

$$U_2 = (U_1 - \Delta U_{T1}) \cdot \frac{U_{nT1L}}{U_{nT1H} + p \cdot \delta U_{pT1G}} = (116 - 1,717) \cdot \frac{16,5}{115 + 0 \cdot 1,278} = 16,397 \text{ kV}$$

$$\delta U_{pT1G} = \frac{\delta \mathcal{G}_{p\%}}{100\%} \cdot U_{nT1G} = \frac{1,111}{100} \cdot 115 = 1,278 \text{ kV}$$

$$\delta \mathcal{G}_{p\%} = \frac{\delta \mathcal{G}_{\%}}{I_p} = \frac{10}{9} = 1,111\%$$

Napięcie w punkcie 3 wyniesie:

$$U_3 = U_2 - \Delta U_{L1} = 16,397 - 0,03121 = 16,366 \text{ kV}$$

Napięcie w punkcie 4 wyniesie:

$$U_4 = (U_3 - \Delta U_{T2}) \cdot \frac{U_{nT2L}}{U_{nT2H} + p \cdot \delta U_{pT2G}} = (16,366 - 0,254) \cdot \frac{0,4}{15,75 + 0 \cdot 0,39375} = 0,409 \text{ kV}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

$$\delta U_{pT2G} = \frac{\delta g_{p\%}}{100\%} \cdot U_{nT2G} = \frac{2,5}{100} \cdot 15,75 = 0,394 \text{ kV}$$

$$\delta g_{p\%} = \frac{\delta g_{\%}}{I_p} = \frac{5}{2} = 2,5\%$$

Napięcie w punkcie 5 wyniesie:

$$U_5 = U_4 - \Delta U_{L2} = 409 - 59,8 = 349,2 \text{ V}$$

Napięcie minimalne, dopuszczalne w punkcie 5 wynosi $0,9 \cdot U_n = 0,9 \cdot 400 = 360 \text{ V}$.

Aby napięcie w punkcie 5 nie było niższe od 360 V, to napięcie po stronie dolnej transformatora T_2 nie może być niższe od wartości równej $360 \text{ V} + 59,8 \text{ V} = 419,8 \text{ V}$. Aby napięcie w punkcie 4 było większe od wartości 419,8 V, transformator T_2 powinien pracować na zaciepie, który można wyznaczyć z zależności:

$$p \leq \frac{(U_3 - \Delta U_{T2}) \cdot U_{nT2L}}{U_{Lmin} \cdot \delta U_{pT2G}} - \frac{U_{nT2H}}{\delta U_{pT2G}} = \frac{(16,366 - 0,254) \cdot 0,4}{0,4198 \cdot 0,394} - \frac{15,75}{0,394} = -1,011$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Transformator T_2 powinien zatem pracować na zaczepie -2. Napięcie u odbiorcy w punkcie 5 będzie wówczas wyższe od 360 V.

Sprawdzenie:

Jeżeli transformator T_2 będzie pracował na zaczepie numer -2, wówczas napięcie w punkcie 4 wyniesie:

$$U_4 = (U_3 - \Delta U_{T2}) \cdot \frac{U_{nT2L}}{U_{nT2H} + p \cdot \delta U_{pT2G}} = (16,366 - 0,254) \cdot \frac{0,4}{15,75 + (-2) \cdot 0,39375} = 0,431 \text{ kV}$$

Napięcie w punkcie 5 wyniesie:

$$U_5 = U_4 - \Delta U_{L2} = 431 - 59,8 = 371,2 \text{ V}$$

Zatem:

$$\frac{U_5}{U_n} = \frac{371,2}{400} = 0,928 > 0,9$$

Zmiana zaczechu w transformatorze T2 przyczyniła się do wzrostu napięcia u odbiorcy w punkcie 5 powyżej wartości minimalnej, równej 360 V.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

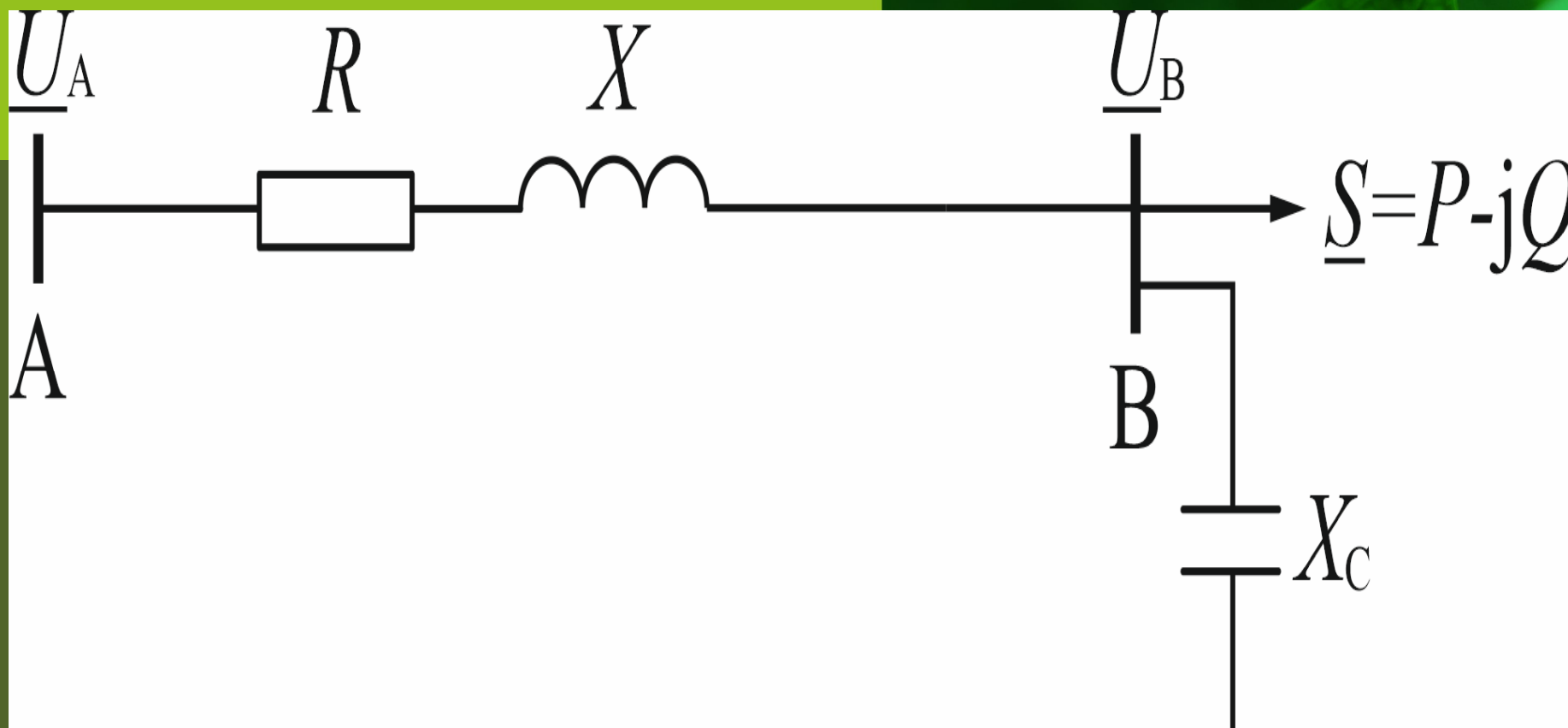


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 98. Schemat zastępczy układu z włączonym równolegle kondensatorem [25]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 14.

Dany jest układ składający się z linii o napięciu 15 kV, wykonanej przewodem AFL 6-70 o długości 15 km, obciążonej na końcu mocą $\underline{S} = (500 + j300)$ kVA. Obliczyć moc baterii kondensatorów równoległych, aby przy wzroście mocy przesyłanej do wartości $\underline{S} = (800 + j480)$ kVA spadek napięcia pozostał niezmienny.

Rezystancja i reaktancja linii wyniosą:

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{15000}{34 \cdot 70} = 6,3 \, \Omega$$

$$X = X' \cdot l = 0,4 \cdot 15 = 6 \, \Omega$$

Spadek napięcia przed wzrostem obciążenia wyniesie:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 6,3 + 300 \cdot 10^3 \cdot 6}{15 \cdot 10^3} = 330 \, \text{V}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Spadek napięcia po wzroście obciążenia wyniesie:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{800 \cdot 10^3 \cdot 6,3 + 480 \cdot 10^3 \cdot 6}{15 \cdot 10^3} = 528 \text{ V}$$

Moc baterii kondensatorów, przy której spadek napięcia pozostanie niezmienny, wyniesie:

$$Q_C = \frac{(P_2 - P_1) \cdot R + (Q_2 - Q_1) \cdot X}{X} = \frac{(800 - 500) \cdot 6,3 + (480 - 300) \cdot 6}{6} = 495 \text{ kvar}$$

Spadek napięcia po wzroście obciążenia oraz zastosowaniu dobranej baterii kondensatorów o mocy 495 kvar wyniesie:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{800 \cdot 10^3 \cdot 6,3 + (480 - 495) \cdot 10^3 \cdot 6}{15 \cdot 10^3} = 330 \text{ V}$$

Wartość spadku napięcia pozostaje niezmienna.

W dalszym kroku można sprawdzić, czy bateria kondensatorów o mocy 495 kvar umożliwi spełnienie warunku związanego z dotrzymaniem dopuszczalnego wskaźnika $\text{tg}\phi=0,4$. Aby spełnić to wymaganie należy wyznaczyć moc baterii kondensatorów z zależności:

$$Q_C = P \left(\text{tg}\phi - \text{tg}\phi_{\text{dop}} \right) = 1000 \cdot \left(\frac{480}{800} - 0,4 \right) = 200 \text{ kvar}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Straty mocy i energii



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

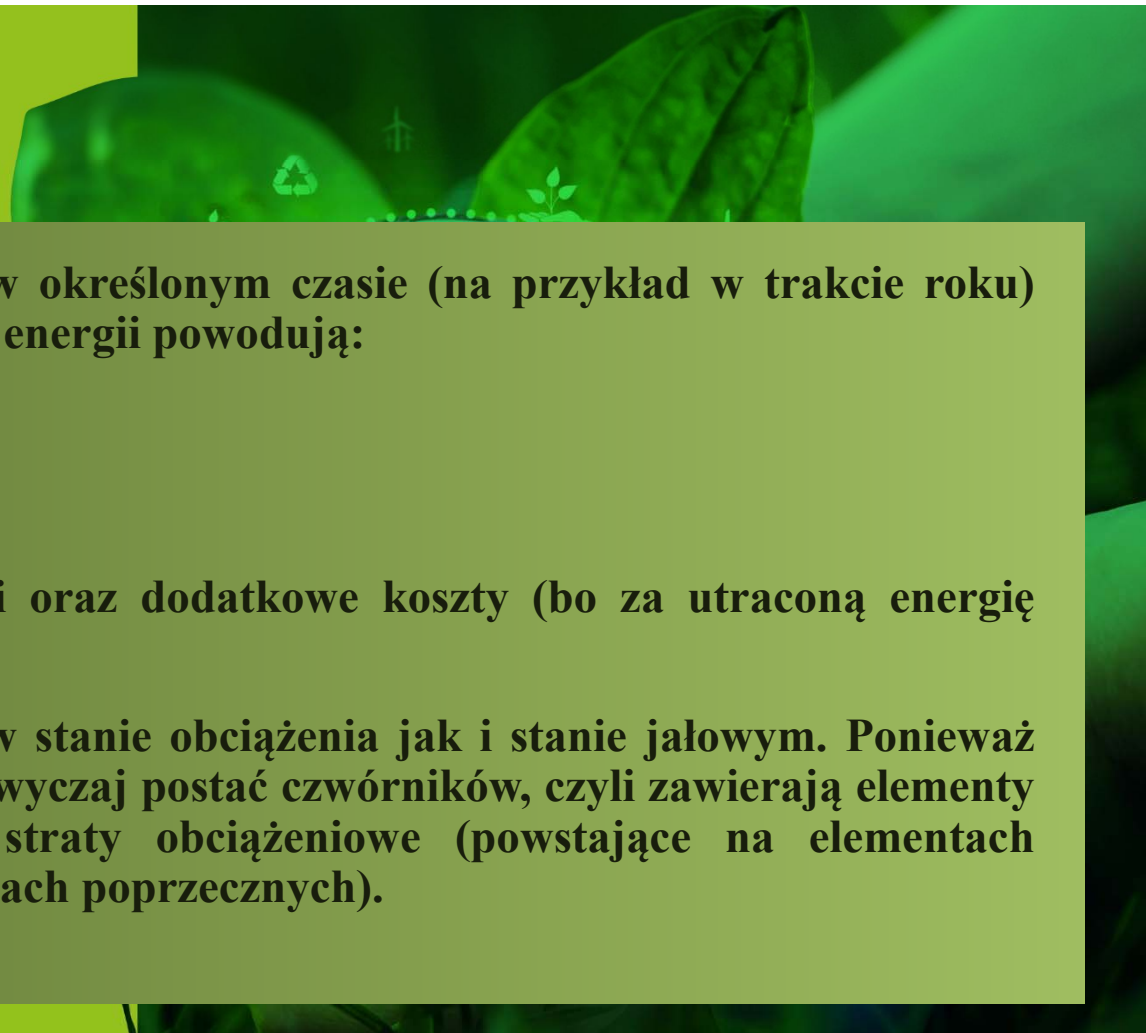


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Straty mocy (dla danej chwili) rozpatrywane w określonym czasie (na przykład w trakcie roku) prowadzą do pojęcia strat energii. Straty mocy i energii powodują:

- **zmniejszenie sprawności procesu przesyłu,**
- **nagrzewanie się elementów sieci,**
- **zmniejszenie ich przepustowości i trwałości oraz dodatkowe koszty (bo za utraconą energię trzeba przecież zapłacić).**

Straty w elementach sieci występują zarówno w stanie obciążenia jak i stanie jałowym. Ponieważ schematy zastępcze elementów sieci, mające zazwyczaj postać czwórników, czyli zawierają elementy podłużne i poprzeczne, toteż wyróżnia się straty obciążeniowe (powstające na elementach podłużnych) oraz jałowe (powstające na elementach poprzecznych).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Straty obciążeniowe (ΔP_L) można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta P_L = 3 \cdot I^2 \cdot R_L = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \cdot R_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R_L$$

gdzie:

I – prąd obciążenia linii,

S – moc obciążenia linii,

R_L – rezystancja zastępcza linii (podłużny element modelu).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

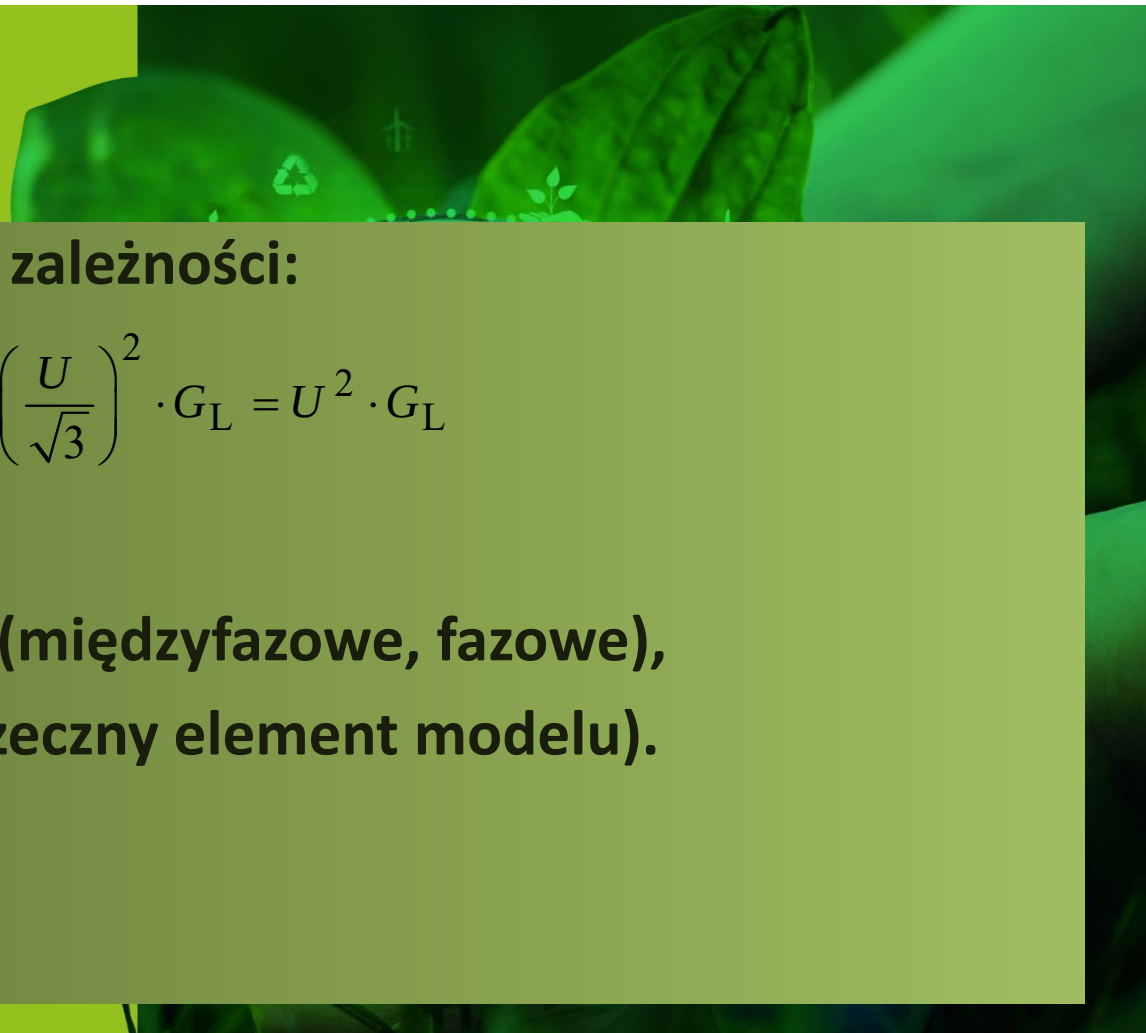


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Straty jałowe (ΔP_j) można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta P_j = 3 \cdot U_f^2 \cdot G_L = 3 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot G_L = U^2 \cdot G_L$$

gdzie:

U, U_f – napięcie w miejscu przyłączenia (międzyfazowe, fazowe),

G_L – konduktancja zastępcza linii (poprzeczny element modelu).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Straty obciążeniowe mocy biernej (ΔQ_L) można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta Q_L = 3 \cdot I^2 \cdot X_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot X_L$$

Straty jałowe mocy biernej ΔQ_j można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta Q_j = 3 \cdot U_f^2 \cdot B_L = U^2 \cdot B_L$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Obciążeniowe straty mocy czynnej (ΔP_{Cu}) w transformatorze wynikają z przepływu prądu przez uzwojenia i mogą być wyznaczone z następującej zależności:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_{nT}} \right)^2$$

gdzie I , S oznaczają odpowiednio prąd i moc obciążenia transformatora, natomiast ΔP_{Cun} to znamionowe straty w uzwojeniach, podawane jako parametr fabryczny transformatora (symbol Cu używany zwyczajowo sugeruje uzwojenia miedziane, ale dla transformatorów małych mocy stosowane są także uzwojenia aluminiowe). S_{nT} jest mocą znamionową transformatora.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Jałowe straty mocy czynnej (ΔP_{jT}) w transformatorze wynikają ze zjawiska histerezy magnetycznej i występowania prądów wirowych w rdzeniu transformatora. Przyjmując, że $U \approx U_n$, jałowe straty mocy czynnej będą równe znamionowym stratom w żelazie (ΔP_{Fe}):

$$\Delta P_{jT} \approx \Delta P_{Fe}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Całkowite straty mocy w transformatorze są sumą strat obciążeniowych i jałowych:

$$\Delta P_T = \Delta P_{jT} + \Delta P_{Cu} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_{nT}} \right)^2$$

Całkowite straty mocy biernej w transformatorze są sumą strat obciążeniowych i jałowych:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{jT} + \Delta Q_{Cun} = \frac{i_0 \cdot S_{nT}}{100} + \frac{u_X \cdot S^2}{100 \cdot S_{nT}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Po odpowiednich przekształceniach, zależność na graniczną moc obciążenia $S_{gr}=S$, przy której należy załączyć kolejny transformator będzie następująca:

$$S_{gr} = S_{nT} \cdot \sqrt{k \cdot (k + 1) \frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Możliwe jest wyznaczenie mocy granicznej S_{gr} także wtedy, gdy obciążenie transformatorów po dokonaniu przełączenia nie będzie jednakowe, ale określone za pomocą współczynników p_1 oraz p_2 , czyli dla dwóch jednakowych transformatorów, po przełączeniu na pracę dwutransformatorową - $S_{T1}=p_1 S_{nT}$ oraz $S_{T2}=p_2 S_{nT}$. Przy takim założeniu wzór na graniczną moc obciążenia przyjmuje postać ($k=1$):

$$S_{gr} = S_{nT} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - p_1^2 - p_2^2} \cdot \frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}}}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Moc bierna, przepływając przez elementy SEE, powoduje straty mocy czynnej. Wartość tych strat można wyznaczyć wprowadzając pojęcie *energetycznego równoważnika mocy biernej* k_{en} . Jeżeli obciążeniowe straty mocy czynnej w rozpatrywanym układzie sieci wyrażone zostaną zależnością:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R$$

wówczas energetyczny równoważnik mocy biernej będzie stanowił pochodną tych strat względem mocy biernej:

$$k_{en} = \frac{d\Delta P}{dQ} = \frac{d \left(\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \right)}{dQ} = \frac{2 \cdot Q \cdot R}{U^2}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

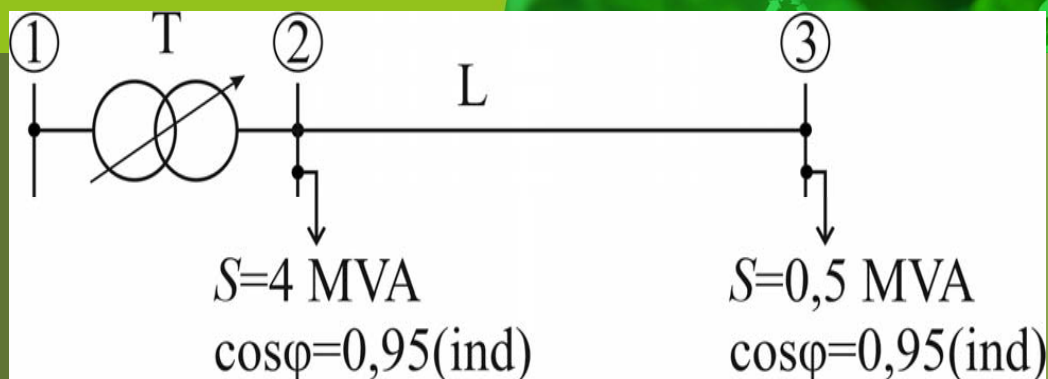
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 15.

Należy obliczyć całkowite straty mocy czynnej i biernej w układzie sieciowym widocznym na Rys. 99.



Rys 99. Schemat promieniowego układu sieciowego

Dane elementów układu sieciowego:

$$T: S_n = 6,3 \text{ MVA}, g = \frac{115}{16,5} \frac{\text{kV}}{\text{kV}}, u_K = 11\%, \Delta P_{C_{un}} = 42 \text{ kW}, \Delta P_{Fe} = 8 \text{ kW}, i_0 = 0,5\%$$

$$L: l = 10 \text{ km}, X' = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}, \gamma = 34 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}, \text{AFL 6-70}, U_n = 15 \text{ kV}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W pierwszej kolejności obliczone zostaną całkowite straty mocy w linii. W tym celu należy wyznaczyć parametry linii SN, czyli rezystancję i reaktancję. Parametry poprzeczne zostaną pominięte.

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{10000}{34 \cdot 70} = 4,2 \, \Omega, \quad X_L = X' \cdot l = 0,4 \cdot 10 = 4 \, \Omega$$

$$\Delta P_L = \frac{S^2}{U^2} \cdot R_L = \frac{(0,5 \cdot 10^6)^2}{(15 \cdot 10^3)^2} \cdot 4,2 = 4,67 \, \text{kW}$$

$$\Delta Q_L = \frac{S^2}{U^2} \cdot X_L = \frac{(0,5 \cdot 10^6)^2}{(15 \cdot 10^3)^2} \cdot 4 = 4,44 \, \text{kvar}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W kolejnym kroku wyznaczone zostaną całkowite straty mocy czynnej i biernej w transformatorze.

Moc czynna i bierna obciążająca transformator jest równa sumie mocy czynnych i biernych pobieranych w węzłach 2 i 3 oraz strat mocy czynnej i biernej w linii:

$$P = P_2 + P_3 + \Delta P_L$$

$$P = 4 \cdot 10^6 \cdot 0,95 + 0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,95 + 4,67 \cdot 10^3 = 4,28 \text{ MW}$$

$$Q = Q_2 + Q_3 + \Delta Q_L$$

$$Q = 4 \cdot 10^6 \cdot 0,312 + 0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,312 + 4,44 \cdot 10^3 = 1,41 \text{ Mvar}$$

Moc pozorna obciążająca transformator wynosi:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 4,506 \text{ MVA}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Całkowite straty mocy czynnej i biernej w transformatorze wyniosą:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_{nT}} \right)^2 = 8 \cdot 10^3 + 42 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{4,506 \cdot 10^6}{6,3 \cdot 10^6} \right)^2 = 29,49 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_T = \frac{i_0 \cdot S_{nT}}{100} + \frac{u_K \cdot S^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{0,5 \cdot 6,3 \cdot 10^6}{100} + \frac{11 \cdot (4,506 \cdot 10^6)^2}{100 \cdot 6,3 \cdot 10^6} = 386,01 \text{ kvar}$$

Całkowite straty mocy czynnej i biernej w układzie wyniosą:

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_L = 4,667 \cdot 10^3 + 29,486 \cdot 10^3 = 34,15 \text{ kW}$$

$$\Delta Q = \Delta Q_T + \Delta Q_L = 4,444 \cdot 10^3 + 386,014 \cdot 10^3 = 390,46 \text{ kvar}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

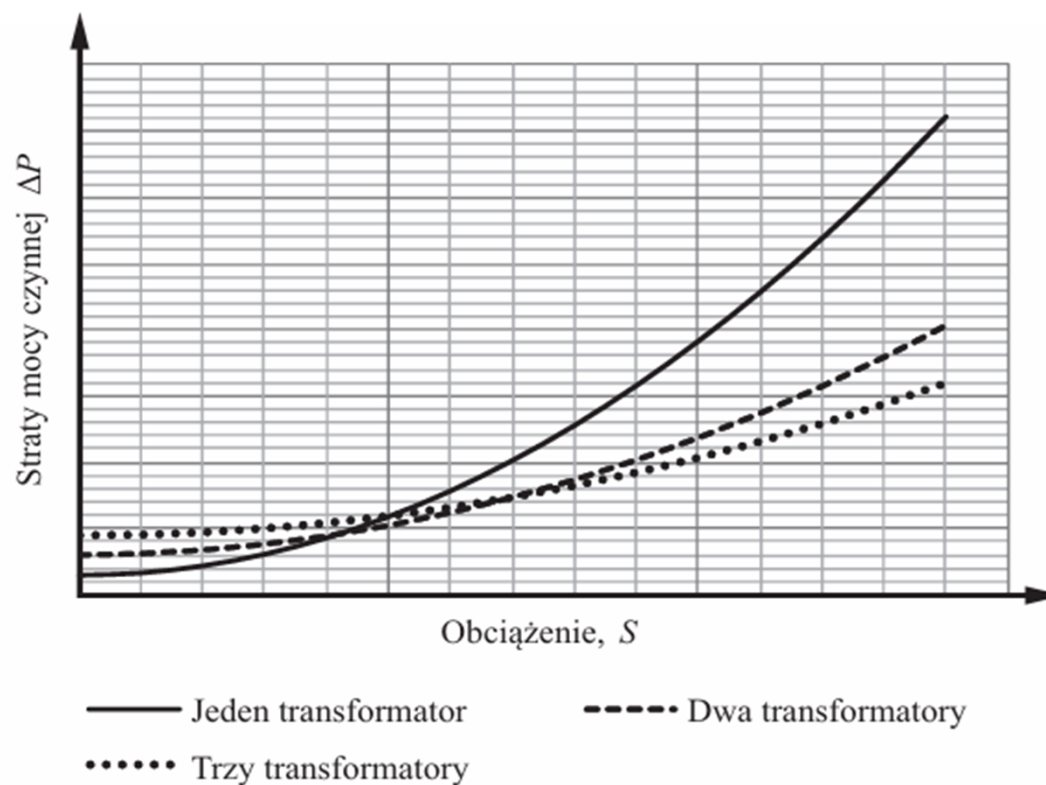


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 100. Całkowite straty mocy czynnej dla jednego, dwóch oraz trzech transformatorów pracujących równolegle w funkcji mocy obciążenia stacji – przykładowe rozwiązanie graficzne



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 16.

Obliczyć roczne straty energii oraz względne roczne straty energii w linii napowietrznej 15 kV o danych: $l = 30 \text{ km}$, $s = 70 \text{ mm}^2$, $\gamma_{Al} = 34 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$.

Ilość energii przesyłanej linią w ciągu roku wynosi $A_r = 8000 \text{ MWh}$, współczynnik mocy obciążenia $\cos\phi = 0,8$. Czas trwania maksymalnych strat przyjąć według wzoru Eimera $\tau_s = \frac{2}{3} \cdot T_s$. Do wyznaczenia mocy szczytowej przyjąć prąd dopuszczalny długotrwale dla przewodów linii: $I_{dd} = 90 \text{ A}$.

Ponieważ rozważana jest linia średniego napięcia dlatego też straty poprzeczne, związane z konduktancją linii, zostaną pominięte. Roczne straty energii można wyznaczyć zatem, korzystając z zależności $\Delta A = \Delta P_s \cdot \tau_s$. Maksymalne straty mocy czynnej wynoszą:

$$\Delta P_s = 3 \cdot I_{dd}^2 \cdot R_L, \quad \tau_s = \frac{2}{3} \cdot T_s, \quad T_s = \frac{A_r}{P_s}$$

Parametry wzdłużne schematu zastępczego linii wynoszą:

$$R_L = \frac{l}{\gamma_{Al} \cdot s} = \frac{30 \cdot 10^3}{34 \cdot 70} = 12,61 \, \Omega$$

Obciążeniowe straty mocy czynnej przy maksymalnym obciążeniu wynoszą:

$$\Delta P_s = 3 \cdot I_{dd}^2 \cdot R_L = 3 \cdot 90^2 \cdot 12,61 = 306,42 \text{ kW}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Moc szczytowa wyniesie:

$$P_s = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{dd} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 0,8 = 1,87 \text{ MW}$$

Czas użytkowania mocy szczytowej wyniosą:

$$T_s = \frac{A_r}{P_s} = \frac{8000}{1,8706} = 4277 \text{ h}$$

Czas trwania strat maksymalnych wyniesie:

$$\tau_s = \frac{2}{3} \cdot T_s = \frac{2}{3} \cdot 4277 = 2851 \text{ h}$$

Roczne straty energii wyniosą:

$$\Delta A_r = \Delta P_s \cdot \tau_s = 306,423 \cdot 2851 = 873612 \text{ kWh} = 873,61 \text{ MWh}$$

Względne straty energii wyniosą:

$$\frac{\Delta A_r}{A_r} \cdot 100\% = \frac{873,612}{8000} \cdot 100\% = 10,92\%$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 17.

Transformator 110/SN o mocy 25 MVA pracuje przy zmiennym obciążeniu z mocą szczytową 12 MVA i $\cos\phi = 0,8$. Analiza obciążenia wykazała, że czas użytkowania mocy szczytowej wynosi $T_s = 3000$ h. Należy wyznaczyć roczne straty energii w tym transformatorze wiedząc dodatkowo, że $\Delta P_{Cun} = 130$ kW, $\Delta P_{Fe} = 14$ kW.

Roczne straty energii składają się z dwóch składników – strat obciążeniowych oraz strat w żelazie. Strat obciążeniowe wyznacza się na podstawie strat od mocy szczytowej i czasu trwania strat maksymalnych. Zatem:

$$\Delta P_s = \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_{nT}} \right)^2 = 130 \cdot \left(\frac{12}{25} \right)^2 = 29,9 \text{ kW}$$

$$\tau_s = \frac{2}{3} \cdot T_s = \frac{2}{3} \cdot 3000 = 2000 \text{ h}$$

$$\Delta A_s = \Delta P_s \cdot \tau_s = 29,9 \cdot 3000 = 89\,856 \text{ kWh} = 89,86 \text{ MWh}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

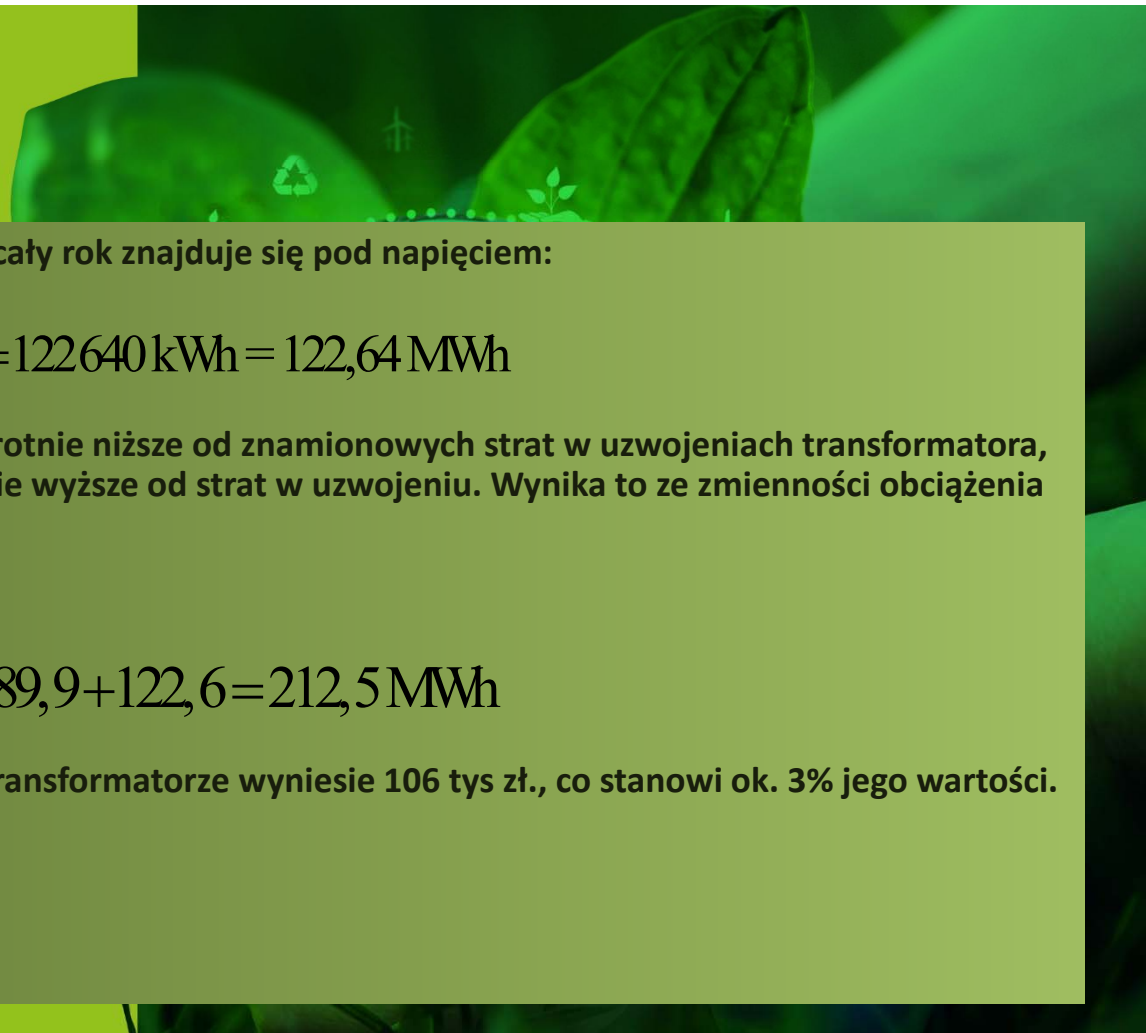


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Straty w żelazie wyznacza się przy założeniu, że transformator przez cały rok znajduje się pod napięciem:

$$\Delta A_{\text{Fe}} = \Delta P_{\text{Fe}} \cdot \tau_s = 14 \cdot 8760 = 122640 \text{ kWh} = 122,64 \text{ MWh}$$

Warto zauważyć, że aczkolwiek straty mocy w żelazie są dziewięciokrotnie niższe od znamionowych strat w uzwojeniach transformatora, to jednak roczne straty energii dla rdzenia transformatora są wyraźnie wyższe od strat w uzwojeniu. Wynika to ze zmienności obciążenia transformatora i faktu jego przyłączenia do sieci przez cały rok.

Sumaryczne roczne straty energii w transformatorze wynoszą:

$$\Delta A_T = \Delta A_S + \Delta A_{\text{Fe}} = 89,9 + 122,6 = 212,5 \text{ MWh}$$

Przy koszcie energii wynoszącym 500 zł/MWh, roczny koszt strat w transformatorze wyniesie 106 tys. zł., co stanowi ok. 3% jego wartości.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



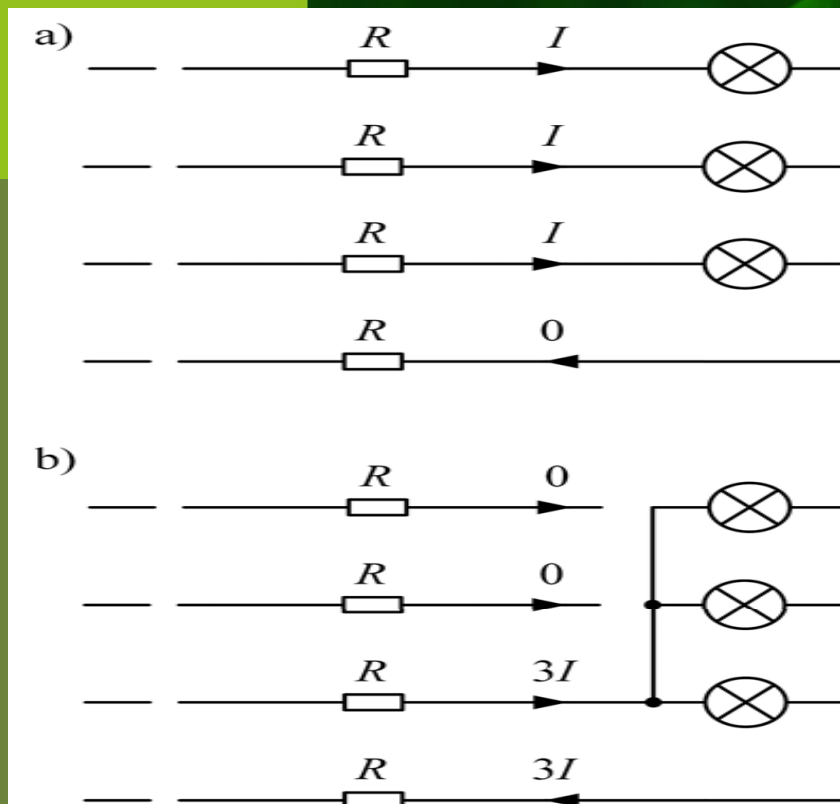
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Lokalnie, w sieciach niskiego napięcia może wystąpić bardzo wysoki poziom strat. Czasami (obecnie bardzo rzadko) może to wynikać z lokalnej „mody” na zakłócanie pracy liczników indukcyjnych za pomocą magnesów neodymowych. Oprócz wspomnianej patologii, może mieć miejsce asymetria obciążenia faz, która może być przyczyną lokalnego wzrostu poziomu strat. Istotę tego problemu pokazano na Rys. 101. W układzie całkowicie asymetrycznym straty są 6 razy większe w układzie symetrycznym.



Rys 101. Fragment sieci niskiego napięcia: a) symetryczny, b) układ z całkowitą utratą symetrii



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

We wskazanej na Rys. 101 sieci w warunkach symetrii, przy symetrycznym obciążeniu prądem I trzech faz straty mocy wynoszą:

$$\Delta P_s = 3I^2 R$$

W warunkach pracy całkowicie niesymetrycznej, prąd jednej fazy wzrasta do wartości $3I$ i powraca przewodem neutralnym. Tym samym straty mocy wynoszą:

$$\Delta P_N = 2 \cdot (3I)^2 \cdot R = 18I^2 R$$

Można zauważyć, że sześciokrotny wzrost strat mocy. W rzeczywistości asymetria fazowa nie musi być tak głęboka jak pokazano na Rys. 101b. i straty będą mniejsze. Z drugiej strony przekrój przewodu neutralnego może być mniejszy niż przekroje przewodów fazowych, tak więc jego rezystancja będzie większa, a straty w nim większe niż w przewodzie fazowym



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



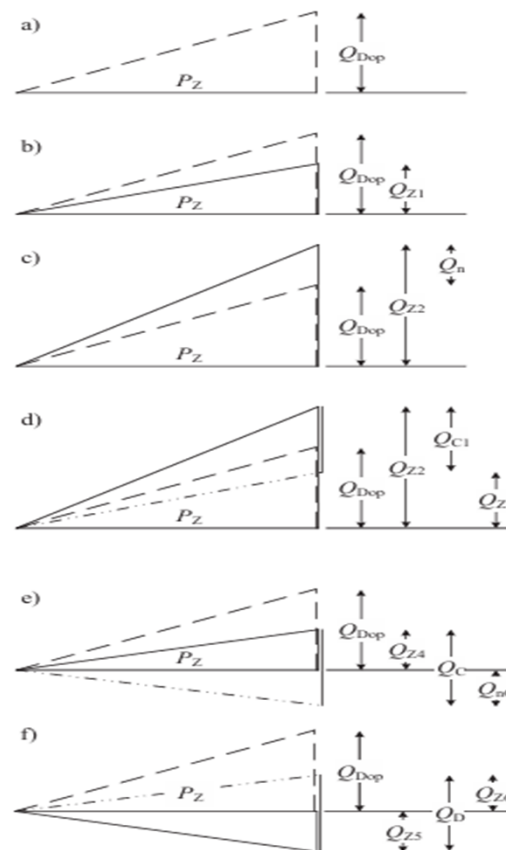
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- Układ referencyjny;
- Pobór mocy biernej mniejszy od dopuszczalnego;
- Pobór mocy biernej większy od dopuszczalnego;
- Skuteczne zmniejszenie poboru za pomocą baterii kondensatorów;
- Przekompensowanie po zmniejszeniu poboru mocy biernej przez odbiór;
- Wprowadzenie mocy biernej do sieci przez odbiór redukowane za pomocą dławika kompensującego.



Rys 102. Charakterystyczne przypadki kompensacji mocy biernej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 18.

Dla odbiornika trójfazowego należy wyznaczyć moc baterii kondensatorów równoległych, by dla obciążenia $S = 1000 \text{ kVA}$, $\cos \varphi = 0,8$ ind. nie występowało przekroczenie umownego współczynnika mocy $\text{tg } \varphi \leq 0,4$.

Moce czynne i bierne obciążenia:

$$\begin{aligned} P_Z &= S \cdot \cos \varphi = 1000 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 800 \text{ kW}, & Q_Z &= \sqrt{S^2 - P_Z^2} = \\ &= \sqrt{1000^2 - 800^2} \cdot 10^3 = 600 \text{ kvar} \end{aligned}$$

Współczynnik mocy $\text{tg } \varphi$ wynosi:

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q_Z}{P_Z} = \frac{600}{800} = 0,75 - \text{czyli jest większy od dopuszczalnego } \text{tg } \varphi_{\text{dop}} = 0,4.$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Obliczenie mocy baterii kondensatorów kompensacyjnych:

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_{\text{dop}}) = 800 \cdot 10^3 (0,75 - 0,4) = 280 \text{ kvar}$$

Sprawdzenie:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_Z - Q_C}{P_Z} = \frac{600 - 280}{800} = 0,4$$

W przypadku kompensacji mocy biernej w praktyce dobierana jest wielostopniowa bateria kondensatorów. Bateria kondensatorów jest sterowana przez regulator współczynnika mocy tak, by współczynnik mocy zawierał się w granicach

$\operatorname{tg} \varphi = (0 \dots 0,4)$.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 19.

Budynek użyteczności publicznej o mocy szczytowej $P_S = 100$ kW i czasie jej użytkowania wynoszącym $T_S = 2500$ godzin, wprowadza codziennie do sieci (w okresach wieczornych, nocnych i porannych, średnio 12 godzin dziennie) moc bierną o wartości 5 kvar. Przyjmując dla uproszczenia, że rozliczeniowe ceny energii zarówno dla poboru jak dla opłaty karnej są jednakowe i wynoszą $C_A = 500$ zł/kWh należy porównać roczną opłatę za energię i roczną wartość opłat karnych wprowadzanych do sieci.

Opłata roczna za energię wynosi:

$$O_A = C_A \cdot A = C_A \cdot P_S \cdot T_S = 500 \cdot 100 \cdot 2500 / 1000 = 125\,000 \text{ zł}$$

Opłata karna za moc bierna wprowadzana do sieci wynosi:

$$O_{b-} = k \cdot C_A \cdot A_{Q-} = 3 \cdot 500 \cdot 5 \cdot 12 \cdot 365 = 32\,850 \text{ zł}$$

Jak widać, opłata karna stanowi 25% opłaty za energię. Panuje pogląd, że wysokość opłat karnych jest niewspółmiernie wysoka, w stosunku do wpływu ponadumownego poboru mocy biernej lub wprowadzania mocy biernej do sieci na rzeczywisty poziom strat mocy w sieciach operatorów. W obecnym stanie prawnym odbiorcy przyłączeni do sieci powinni do omawianych kosztów przywiązywać bardzo dużą uwagę.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Rozpływy mocy w sieci zamkniętej - zależności podstawowe i metody rozwiązania zadania rozptywowego



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



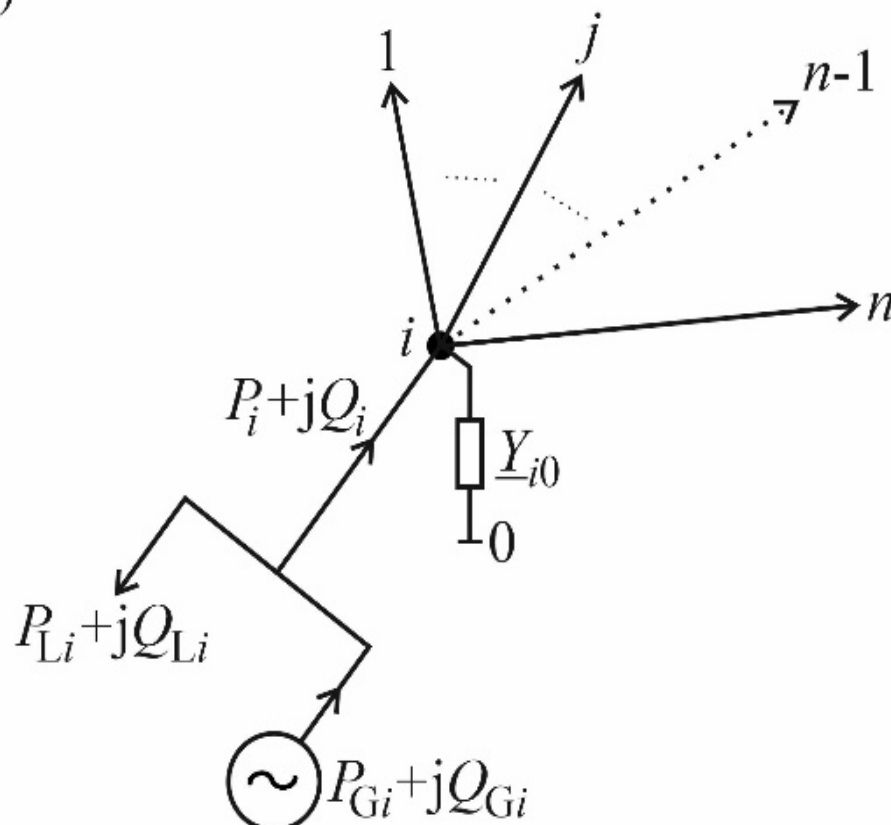
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

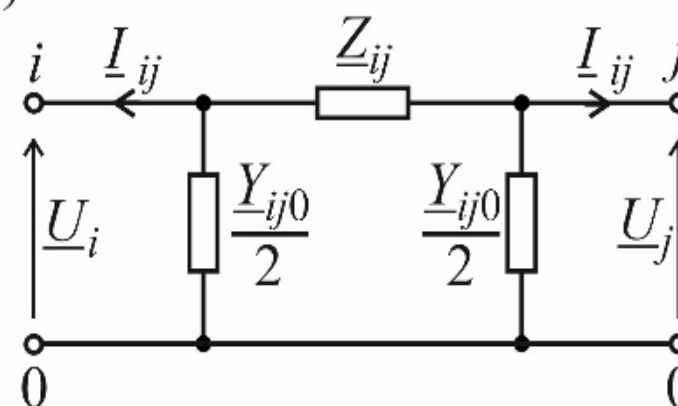


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

a)



b)



Rys 103. Schemat ogólny węzła sieci elektroenergetycznej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

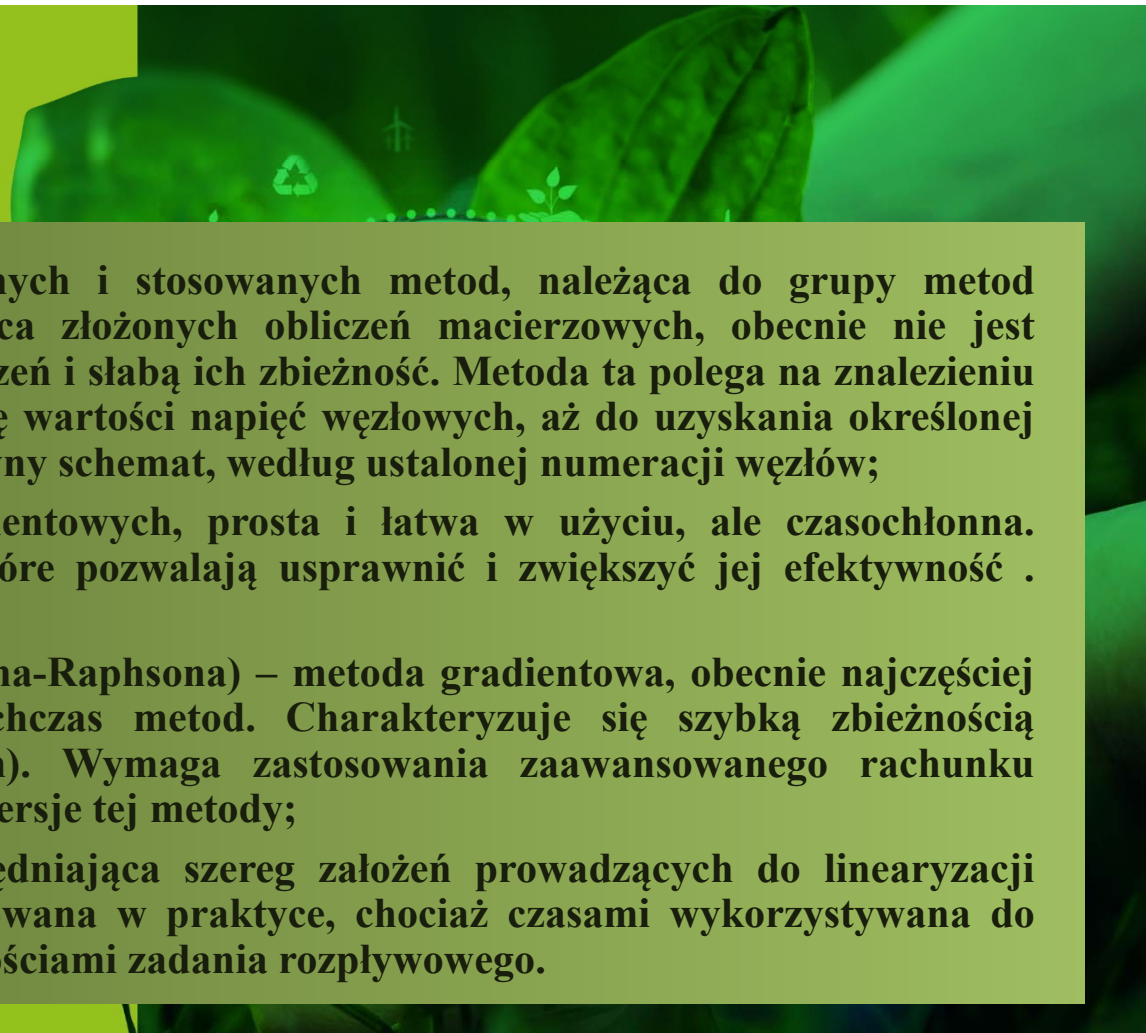


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



- **Metoda Warda – Hale’a** - najstarsza ze znanych i stosowanych metod, należąca do grupy metod bezpośrednich, bezgradientowych, niewymagająca złożonych obliczeń macierzowych, obecnie nie jest stosowana w praktyce z uwagi na długi czas obliczeń i słabą ich zbieżność. Metoda ta polega na znalezieniu rozwiązania zadania poprzez wielokrotną korektę wartości napięć węzłowych, aż do uzyskania określonej dokładności. Wykorzystywany jest przy tym sztywny schemat, według ustalonej numeracji węzłów;
- **Metoda Gaussa** – należąca do metod bezgradientowych, prosta i łatwa w użyciu, ale czasochłonna. Spotykane są różne modyfikacje tej metody, które pozwalają usprawnić i zwiększyć jej efektywność. Obecnie nie stosowana w praktyce;
- **Metoda Newtona** (zwana również metodą Newtona-Raphsona) – metoda gradientowa, obecnie najczęściej stosowana, najdokładniejsza ze znanych dotychczas metod. Charakteryzuje się szybką zbieżnością (rozwiązanie uzyskuje się po kilku iteracjach). Wymaga zastosowania zaawansowanego rachunku macierzowego. Spotykane są różne uproszczone wersje tej metody;
- **Metoda „prądu stałego”** – uproszczona, uwzględniająca szereg założeń prowadzących do linearyzacji zadania rozplywowego. Obecnie raczej nie stosowana w praktyce, chociaż czasami wykorzystywana do określania zależności pomiędzy wybranymi wielkościami zadania rozplywowego.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

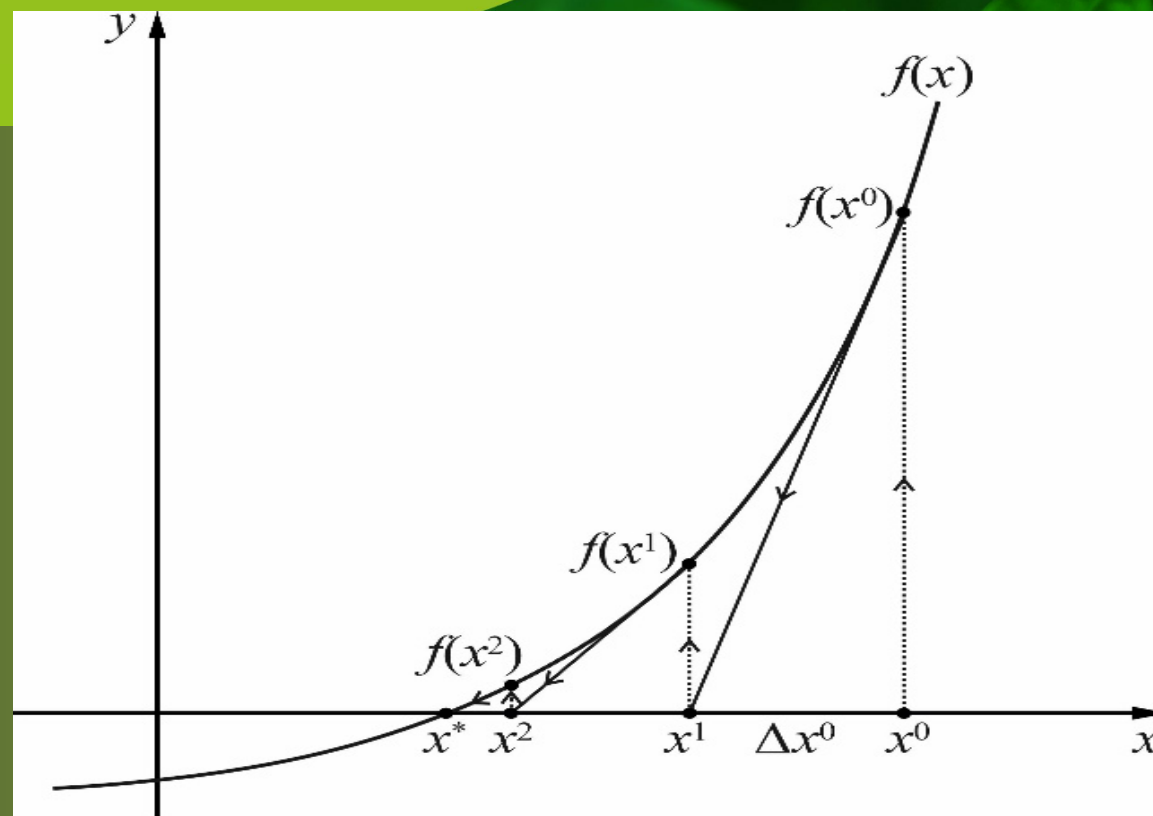


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 104. Interpretacja graficzna metody Newtona - Raphsona



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

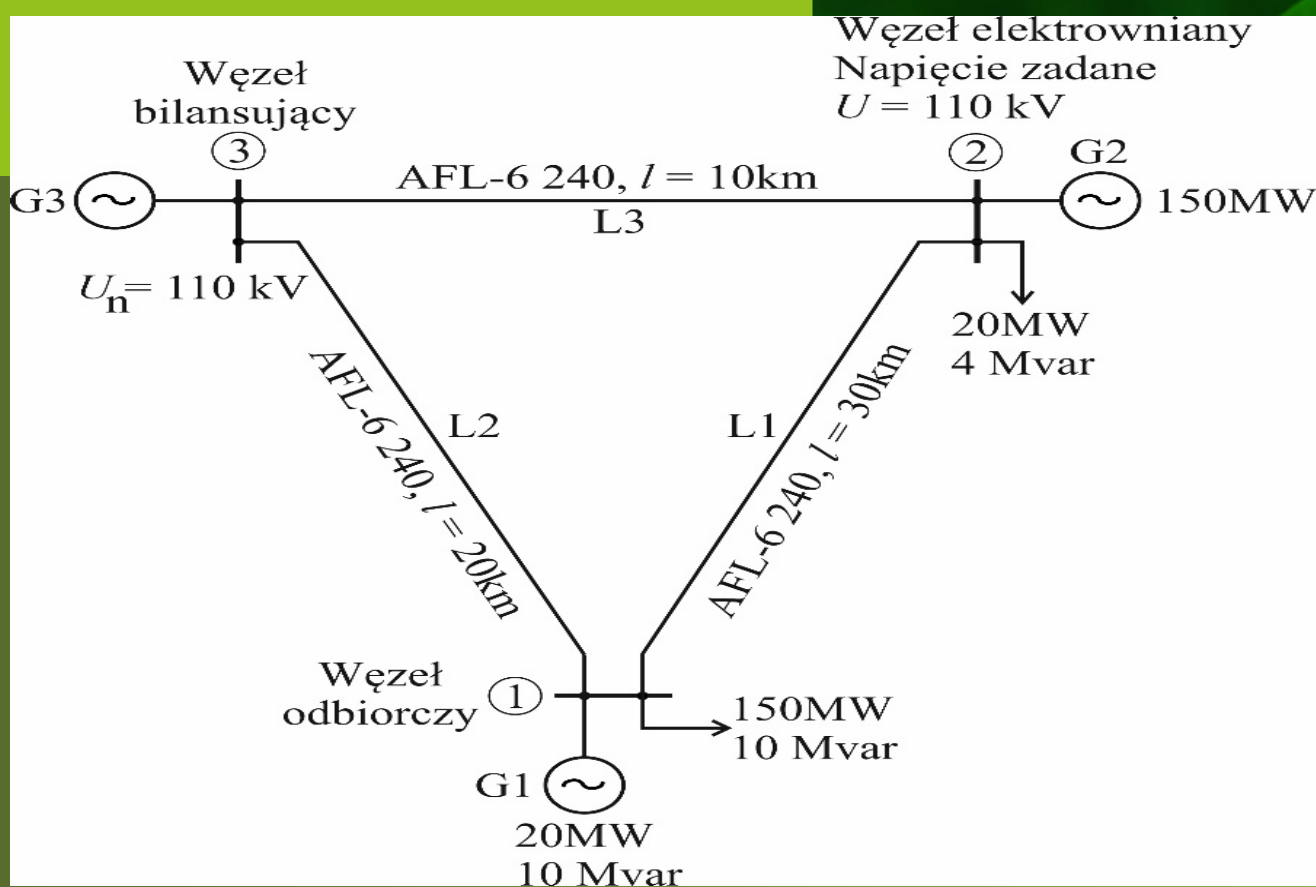


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 105. Schemat przykładowej sieci zawierającej trzy węzły



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

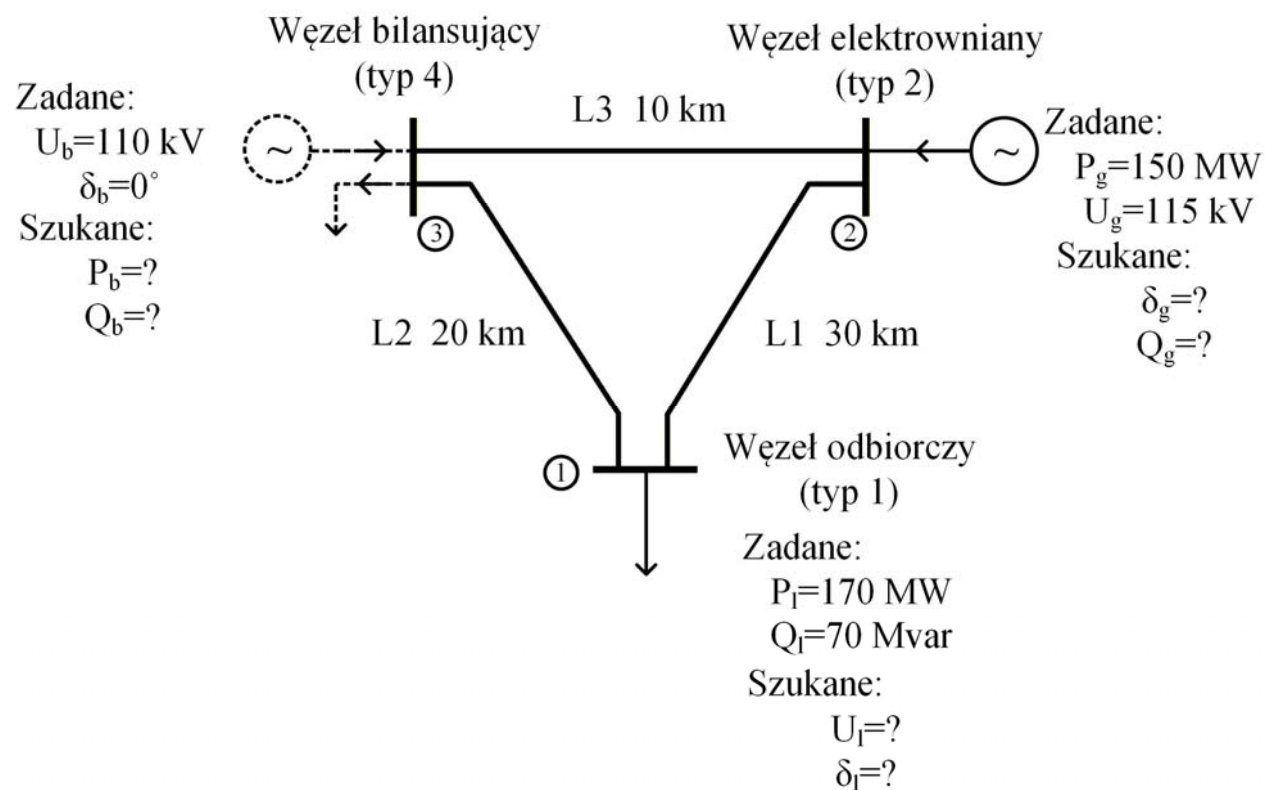


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 106. Sformułowanie zadania rozptywowego dla sieci przykładowej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

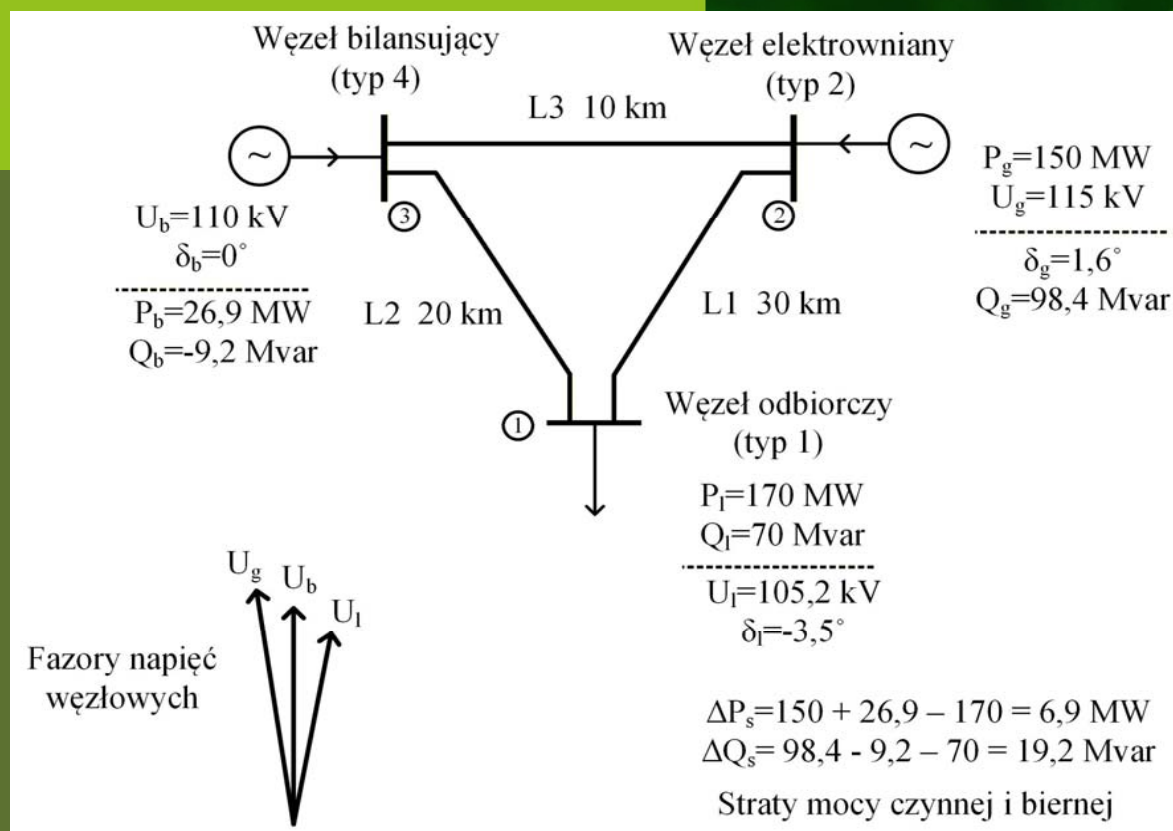


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 107. Wyniki zadania rozptylowego – wielkości węzłowe



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

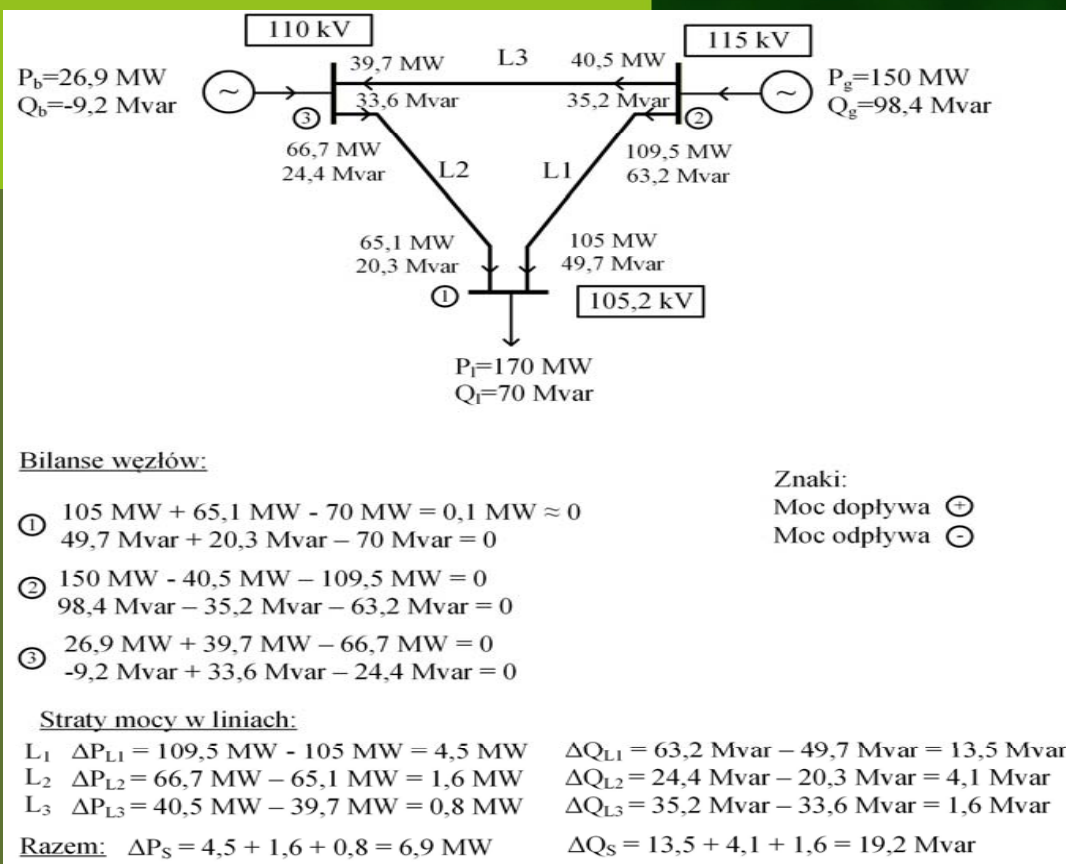


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 108. Wyniki zadania rozptywowego – bilanse węzłów i przepływy gałęziowe



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Optymalizacja stanów pracy SEE



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Optymalizacja, według definicji zawartej w encyklopedii PWN [42], jest to „wyznaczenie najlepszego rozwiązania jakiegoś zadania (np. techn., ekon., społ.) ze względu na przyjęte kryterium (wskaźnik specyficznie rozumianej jakości, np. koszt, zysk, niezawodność, dokładność, czas realizacji zadania), przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń”.

Zagadnienia optymalizacyjne w elektroenergetyce są znane i rozwiązywane od dawna. Początkowo dotyczyły one takich zadań jak Optymalizacja Doboru Składu Jednostek Wytwórczych oraz Ekonomiczny Rozdział Obciążeń (ERO) [43], [44]. Pierwsze z nich dotyczy właściwego (w sensie optymalnego) doboru składu jednostek wytwórczych, które uczestniczą w pokrywaniu zapotrzebowania na moc, z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego. W literaturze międzynarodowej, zadanie to znane jest pod nazwą Unit Commitment (UC) [43], [45]. Drugie zagadnienie polega na optymalnym rozdziale mocy wytwarzanej w źródłach wytwórczych, ze względu na minimalizację kosztu bilansowania zapotrzebowania. W literaturze międzynarodowej, zadanie to znane jest pod nazwą Economic Dispatch (ED) [43], [45].

Obecnie zadania optymalizacyjne w SEE, obecnie często występują pod nazwą Optimal Power Flow (OPF) lub (po uwzględnieniu kryterium „N-1”) Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF). Inna klasa problemów dotyczy np. obliczeń zwarciovych, stabilności systemu elektroenergetycznego, jakości energii, czy jeszcze innych zagadnień, określanych mianem Special Optimal Power Flow (SOPF) [45], [46], [47].



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykładowe zadania optymalizacyjne elektroenergetyki:

- optymalizacja rozplywów mocy biernej,
- minimalizacja strat mocy w SEE,
- wyznaczanie dostępnych mocy przyłączeniowych w SEE,
- dynamiczne dopasowanie poziomu mocy generowanej do możliwości przesyłowych linii i transformatorów,
- optymalny wybór punktów podziały w sieci SN,
- minimalizacja różnicy kątów fazorów napięcia przy załączaniu linii elektroenergetycznych,
- optymalne sterowanie pracą inwerterów mikroinstalacji fotowoltaicznych,
- optymalny wybór punktów przyłączenia magazynów energii w sieci elektroenergetycznej,
- optymalizacja wskaźnika jakości napięcia w sieci elektroenergetycznej,
- optymalna lokalizacja urządzeń do kompensacji mocy biernej,
- optymalny dobór urządzenia kompensacyjnego dla farmy wiatrowej lub fotowoltaicznej przyłączonej do sieci elektroenergetycznej linią kablową,
- optymalne wykorzystanie wspólnej infrastruktury sieciowej przez źródła o różnej technologii wytwarzania (tzw. instalacje hybrydowe),



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



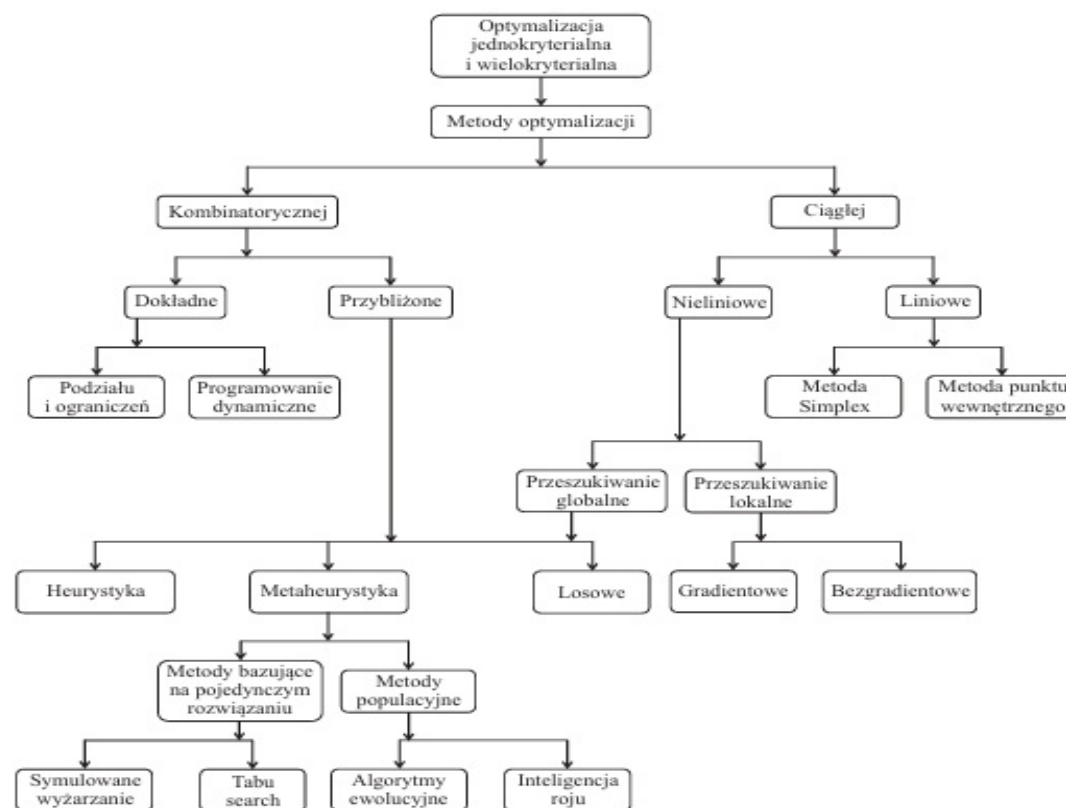
NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- minimalizacja kosztów bilansowania zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym,
- wygaszanie planów budowy niektórych źródeł w celu uzyskania możliwości przyłączenia innych,
- optymalne sterowanie urządzeniami do regulacji przepływów mocy czynnej,
- optymalne planowanie konfiguracji pracy sieci z punktu widzenia likwidacji przeciążeń gałęzi,
- optymalne planowanie konfiguracji pracy sieci z punktu widzenia minimalizacji mocy zwarciovych.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Rys 109. Metody optymalizacji stosowane w praktyce [19]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Podstawowe informacje o zakłóceniach zwarciovych



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zwarciem nazywamy połączenie przynajmniej dwóch punktów obwodu elektrycznego o różnych potencjałach, nieprzewidziane w normalnym stanie pracy. Za punkt systemu uważa się również ziemię. Połączenie to może nastąpić poprzez łuk elektryczny lub przedmiot o małej impedancji. Zwarcia klasyfikujemy według różnych kryteriów, np. liczby faz, liczby punktów zwarcia, miejsca zwarcia itp.

Najczęściej wyróżnia się następujące rodzaje zwarć :

- zwarcia pojedyncze i wielomiejscowe,
- zwarcia symetryczne (trójfazowe),
- niesymetryczne (jednofazowe z ziemią, dwufazowe, dwufazowe z ziemią),



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- zwarcia jednoczesne i niejednoczesne,
- zwarcia zewnętrzne i wewnętrzne,
- zwarcia trwałe i przemijające,
- zwarcia bezimpedancyjne (zwane metalicznymi lub bezpośrednimi) oraz za pośrednictwem impedancji (zwane zwarciami oporowym),
- zwarcia doziemne i bez udziału ziemi,
- zwarcia małoprądowe i wielkoprądowe.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

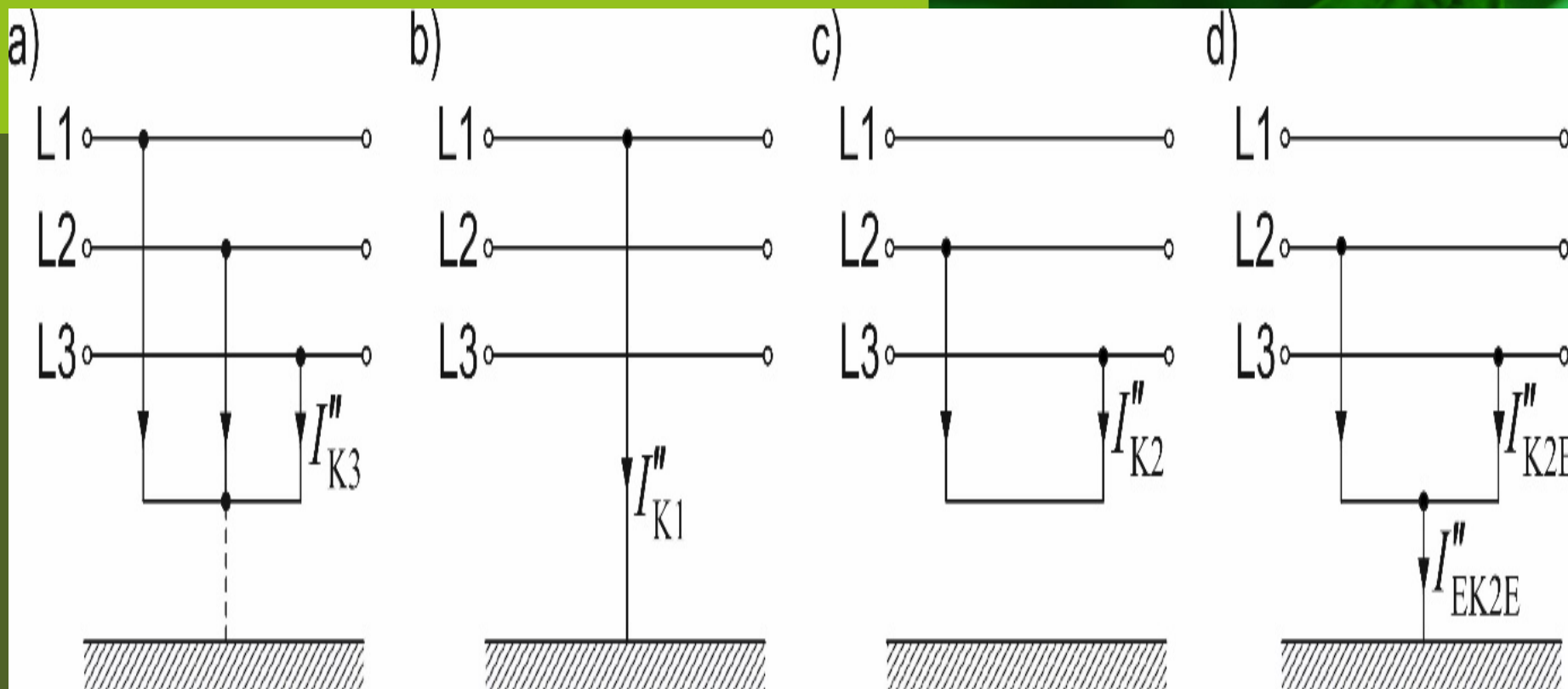


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 110. Schemat zwarć symetrycznych i niesymetrycznych [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

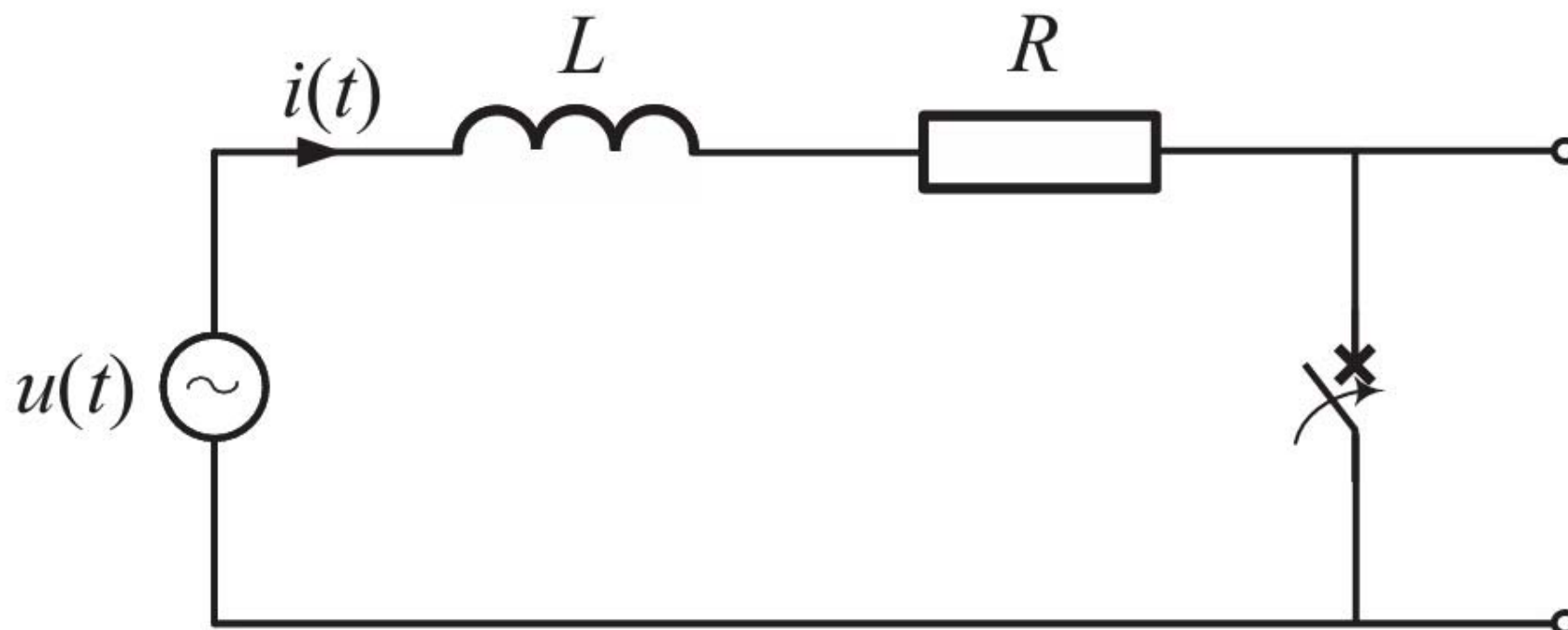


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 111. Schemat zastępczy obwodu elektrycznego do analiz zwarciovych [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Napięcie źródła $u(t)$ wyraża się wzorem:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma_0)$$

W stanie zwarcia (po zamknięciu wyłącznika), obwód jest opisany równaniem:

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma_0) = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i$$

Jest to równanie różniczkowe liniowe i może być rozwiązane analitycznie. Dla zerowych warunków początkowych otrzymuje się:

$$i(t) = \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma_0 - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\gamma_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

gdzie:

$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$ - jest argumentem impedancji oraz kątem przesunięcia prądu względem napięcia;

$\tau = \frac{X}{\omega_s \cdot R}$ - jest stałą czasową obwodu zwarciovego. Zgodnie ze wzorem, prąd zwarcia stanowi sumę dwóch składowych: składowej okresowej i nieokresowej prądu zwarcia.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

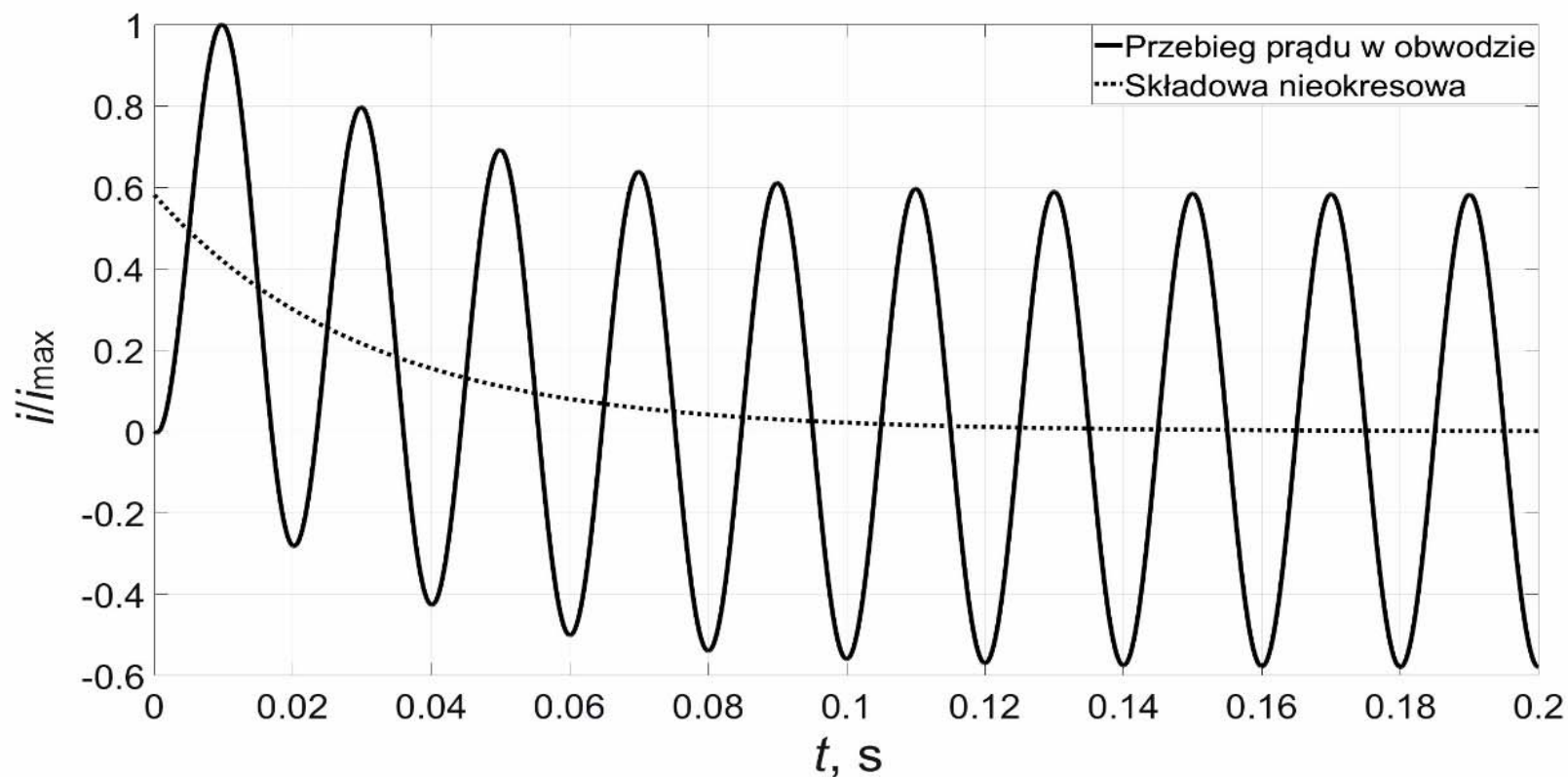


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 112. Przykładowy przebieg prądu zwarcia z wyszczególnieniem składowej nieokresowej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

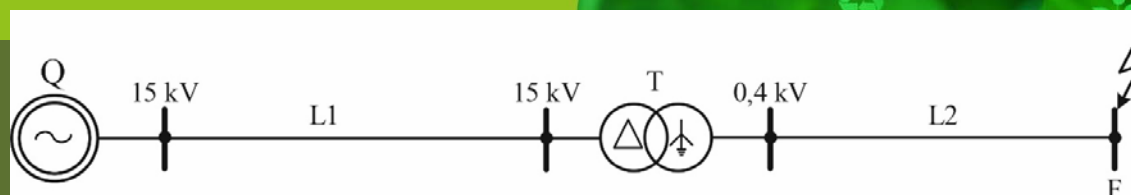
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 20.

W układzie jak na Rys. 113 należy wyznaczyć przebieg prądu zwarcia trójfazowego w punkcie F.



Rys 113. Schemat rozpatrywanego układu w zadaniu

System zastępczy Q - $U_n = 15 \text{ kV}$: $S_{KQ}'' = 250 \text{ MVA}$, $\frac{R_Q}{X_Q} = 0,1$

Linia napowietrzna L_1 - AFL 6-70, $X' = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $l = 8 \text{ km}$

Linia kablowa L_2 - $R' = 0,245 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $X' = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $l = 1,2 \text{ km}$

Transformator T - $S_n = 630 \text{ kVA}$, $\vartheta = 15,75 / 0,4 \text{ kV/kV}$, $u_K = 6\%$, $\Delta P_{Cu\%} = 1,05\%$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na początku wyznaczone zostaną parametry podłużne (rezystancja i reaktancja elementów analizowanego układu sieci, sprowadzone na poziom napięcia 0,4 kV).

$$X_Q = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{KQ}''} \cdot \frac{1}{9^2} = \frac{1,1 \cdot (15 \cdot 10^3)^2}{250 \cdot 10^6} \cdot \frac{1}{\left(\frac{15,75 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} \right)^2} = 0,00064 \ \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,00051 = 0,000064 \ \Omega$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu\%}}{100} \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{1,05 \cdot (0,4 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 630 \cdot 10^3} = 0,00267 \ \Omega$$

$$Z_T = \frac{u_K}{100} \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{6 \cdot (0,4 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 630 \cdot 10^3} = 0,0152 \ \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 0,015 \ \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

$$R_{L1} = \frac{l}{\gamma \cdot S} \cdot \frac{1}{g^2} = \frac{8000}{34 \cdot 70} \cdot \frac{1}{\left(\frac{15,75 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} \right)^2} = 0,0022 \Omega$$

$$X_{L1} = X' \cdot l \cdot \frac{1}{g^2} = 0,4 \cdot 8 \cdot \frac{1}{\left(\frac{15,75 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} \right)^2} = 0,0021 \Omega$$

$$R_{L2} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{1200}{34 \cdot 120} = 0,294 \Omega$$

$$X_{L2} = X' \cdot l = 0,1 \cdot 1,2 = 0,12 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W kolejnym kroku obliczona zostanie impedancja zwarcia Z_K oraz stała czasowa τ :

$$R_K = R_Q + R_{L1} + R_T + R_{L2} = 0,299 \, \Omega, \quad X_K = X_Q + X_{L1} + X_T + X_{L2} = 0,138 \, \Omega$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = 0,329 \, \Omega$$

$$\tau = \frac{X_K}{\omega \cdot R_K} = \frac{0,138}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,299} = 0,00147 \, \text{s}$$

Na Rys. 114 przedstawiono przebieg prądu zwarcia w rozpatrywanym obwodzie wraz z wyszczególnieniem składowej nieokresowej.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

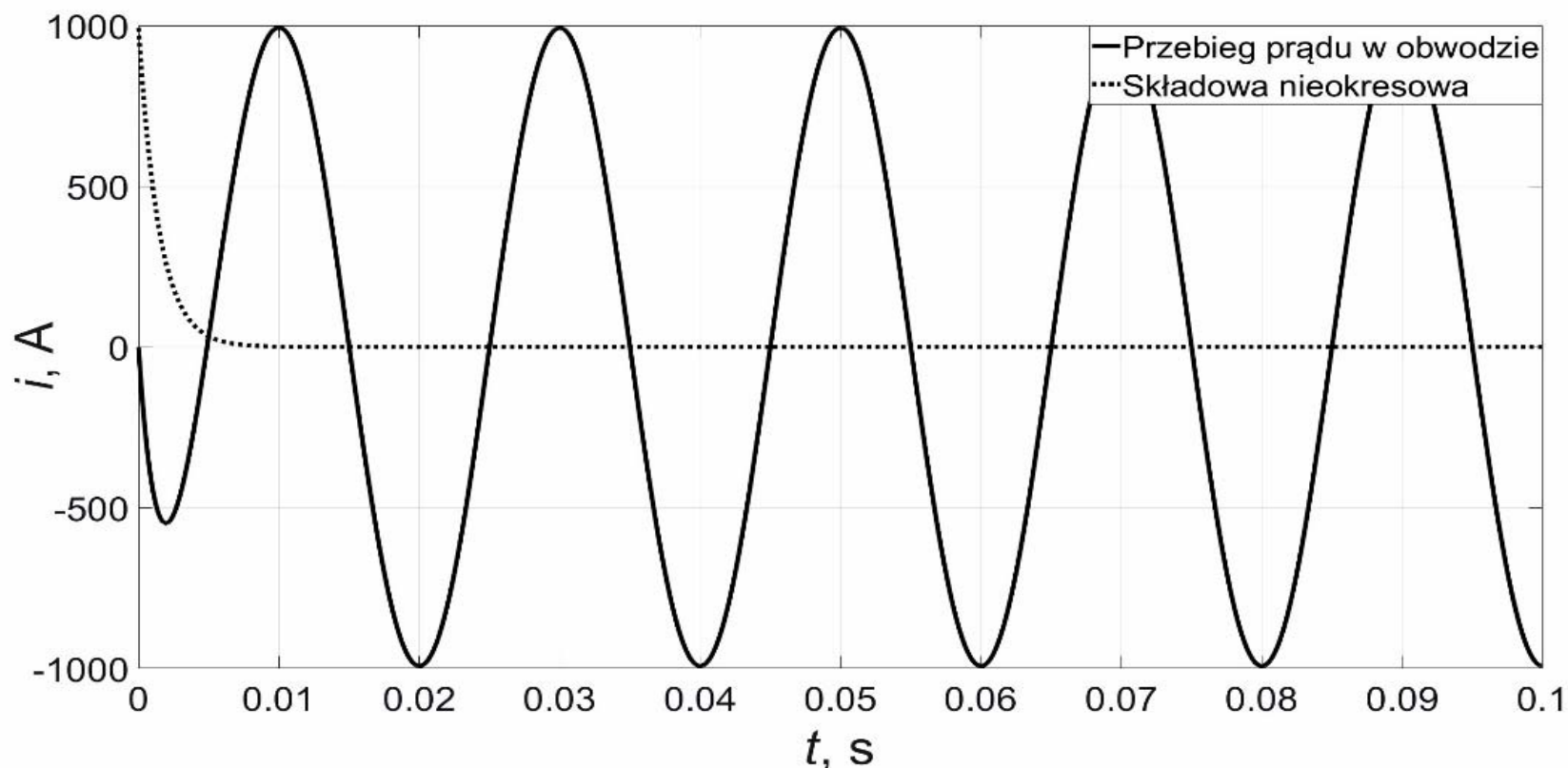


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 114. Przebieg prądu zwarcia w obwodzie z wyszczególnieniem składowej nieokresowej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

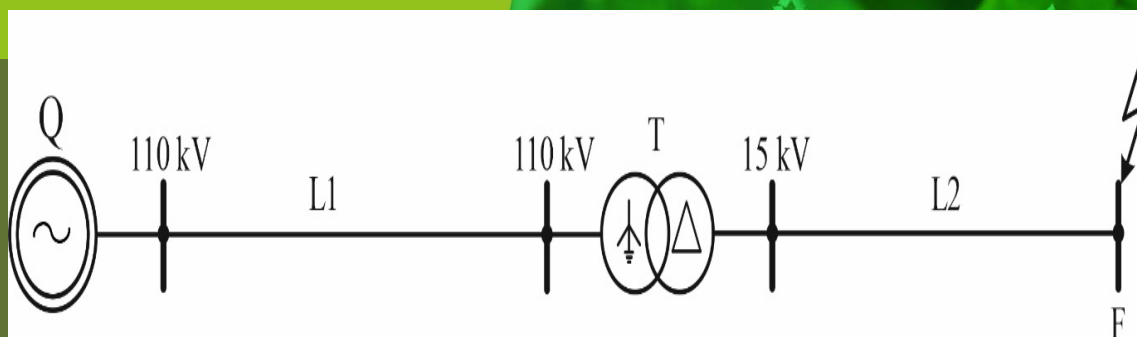
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 21.

W układzie jak na Rys. 115 wyznacz przebieg prądu zwarcia trójfazowego w punkcie F.



Rys 115. Schemat rozpatrywanego układu promieniowego – sieć 110 kV i sieć SN

System zastępczy Q - $U_n = 110 \text{ kV}$: $S_{KQ}'' = 2000 \text{ MVA}$, $\frac{R_Q}{X_Q} = 0,1$

Linia napowietrzna L_1 - AFL 6 – 240, $X' = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $l = 40 \text{ km}$

Linia kablowa L_2 - AFL 6 – 95, $X' = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $l = 10 \text{ km}$

Transformator T - $S_n = 25 \text{ MVA}$, $\vartheta = 115/16,5 \text{ kV/kV}$, $u_K = 12\%$, $\Delta P_{Cu\%} = 0,46\%$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Na początku wyznaczone zostaną parametry podłużne (rezystancja i reaktancja elementów analizowanego układu sieci, sprowadzone na poziom 16,5 kV).

$$X_Q = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{KQ}''} \cdot \frac{1}{9^2} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{2000 \cdot 10^6} \cdot \frac{1}{\left(\frac{115 \cdot 10^3}{16,5 \cdot 10^3}\right)^2} = 0,137 \ \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,137 = 0,0137 \ \Omega$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu\%}}{100} \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{0,46 \cdot (16,5 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^6} = 0,05 \ \Omega$$

$$X_T = \frac{u_K}{100} \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{12 \cdot (16,5 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^6} = 1,307 \ \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

$$R_{L1} = \frac{l}{\gamma \cdot S} \cdot \frac{1}{g^2} = \frac{40000}{34 \cdot 240} \cdot \frac{1}{\left(\frac{115 \cdot 10^3}{16,5 \cdot 10^3}\right)^2} = 0,101 \Omega$$

$$X_{L1} = X' \cdot l \cdot \frac{1}{g^2} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{1}{\left(\frac{115 \cdot 10^3}{16,5 \cdot 10^3}\right)^2} = 0,329 \Omega$$

$$R_{L2} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{10000}{34 \cdot 95} = 3,096 \Omega$$

$$X_{L2} = X' \cdot l = 0,4 \cdot 10 = 4 \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W kolejnym kroku obliczona zostanie impedancja zwarcia Z_K oraz stała czasowa τ :

$$R_K = R_Q + R_{L1} + R_T + R_{L2} = 3,261 \Omega$$

$$X_K = X_Q + X_{L1} + X_T + X_{L2} = 5,773 \Omega$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = 6,63 \Omega$$

$$\tau = \frac{X_K}{\omega \cdot R_K} = \frac{5,773}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,2607} = 0,0056 \text{ s}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Uwzględniając rezystancję uzwojeń i asymetrię magnetyczną wirnika oraz zakładając stan bez obciążenia źródła przed zwarcie, prąd płynący w fazie L1 wyraża się wzorem:

$$i_{L1} = \frac{U_{fm}}{X_d''} \cdot g_3(t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \gamma_0) -$$

$$-\frac{U_{fm}}{2} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \left[\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos \gamma_0 - \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \gamma_0) \right]$$

$$g_3(t) = X_d'' \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + \frac{1}{X_d} \right]$$

Gdzie:

$U_{fm} = \sqrt{2} \cdot U_f$ - napięcie fazowe,

γ_0 – kąt położenia wirnika w chwili powstania zwarcia,

τ_d'' - stała czasowa podprześciowa,

τ_d' - stała czasowa prześciowa,



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

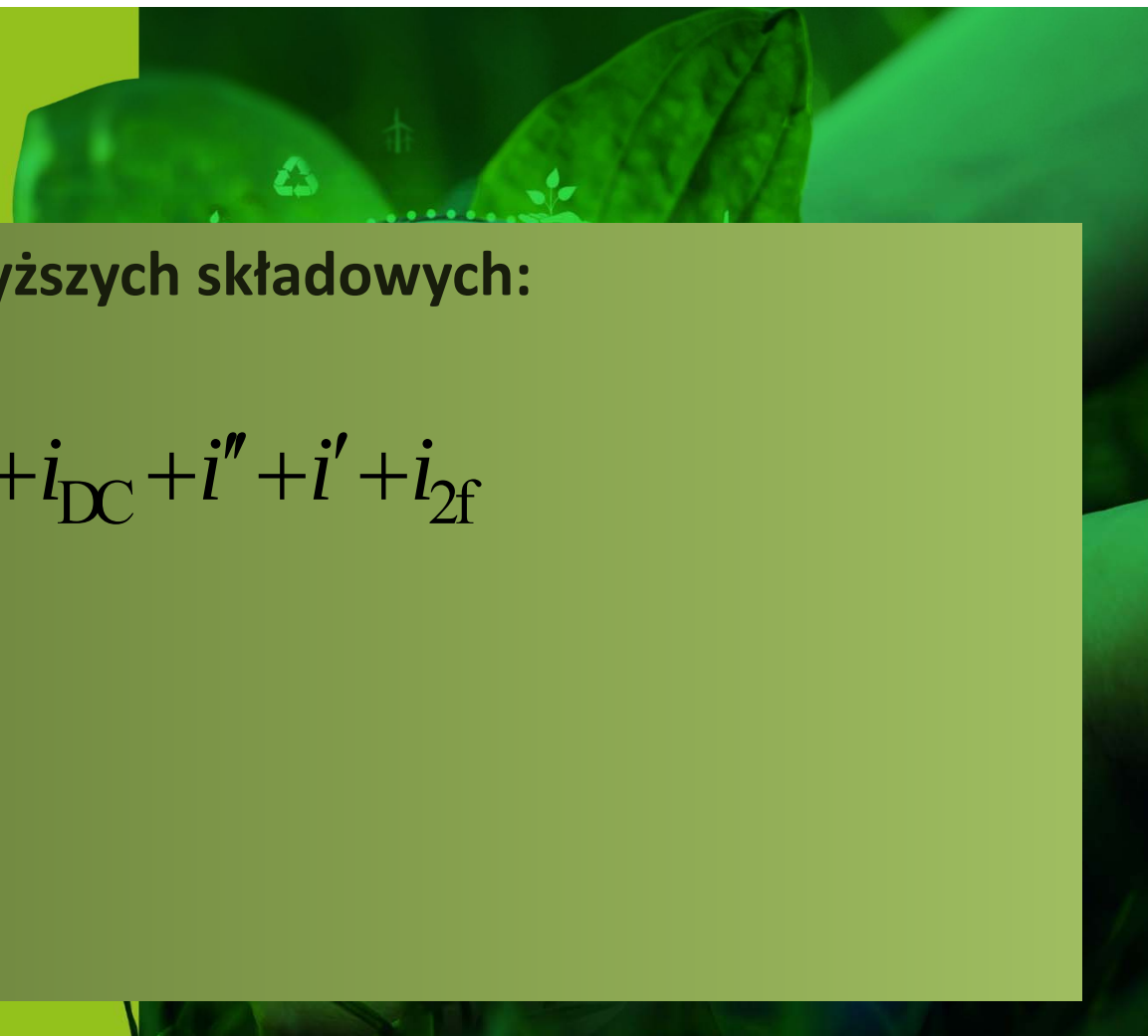


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

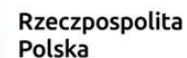


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Całkowity prąd zwarcia jest sumą powyższych składowych:

$$i_{L1} = i_{AC} + i_{DC} + i'' + i' + i_{2f}$$





Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



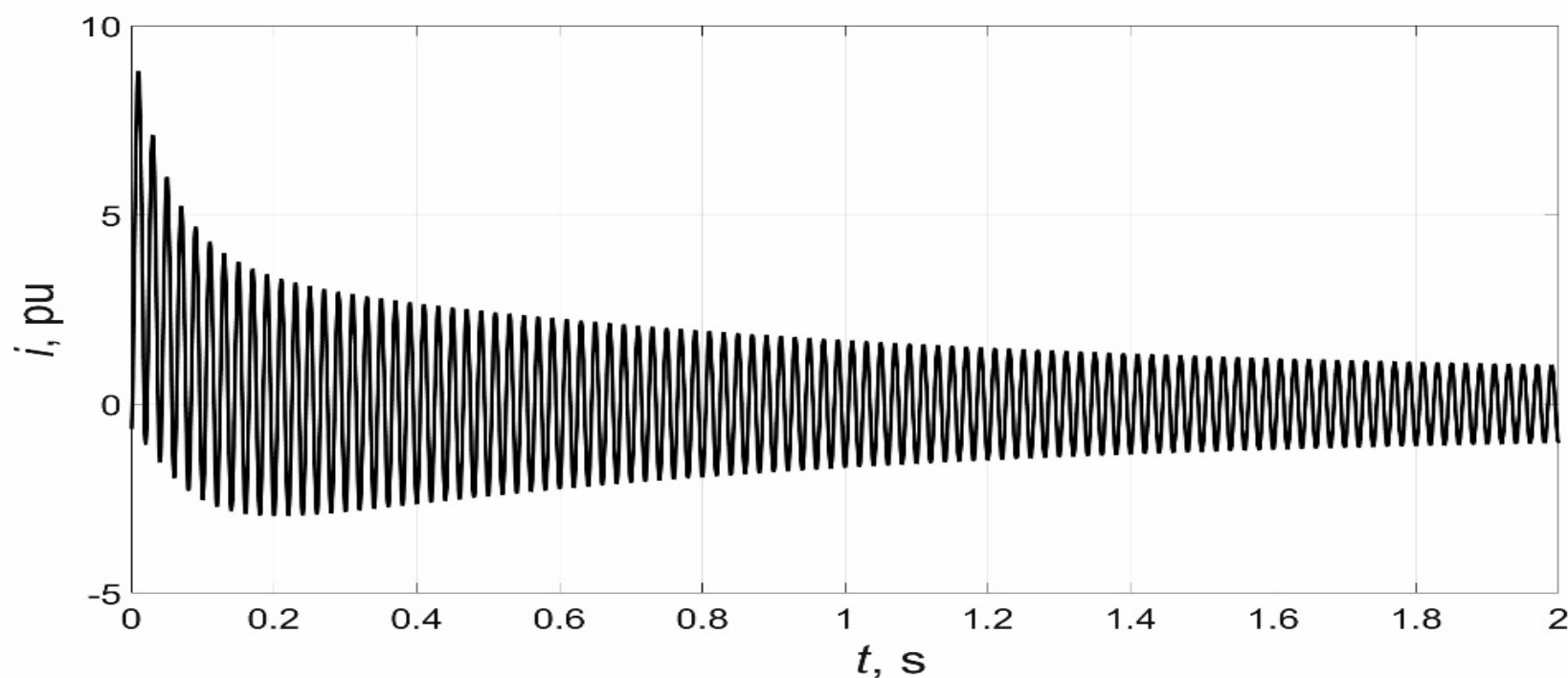
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Rozwiązaniem zadania są przebiegi prądu zwarcia w analizowanym układzie oraz przebiegi poszczególnych jego składowych



Rys 117. Przebieg całkowitego prądu zwarcia



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

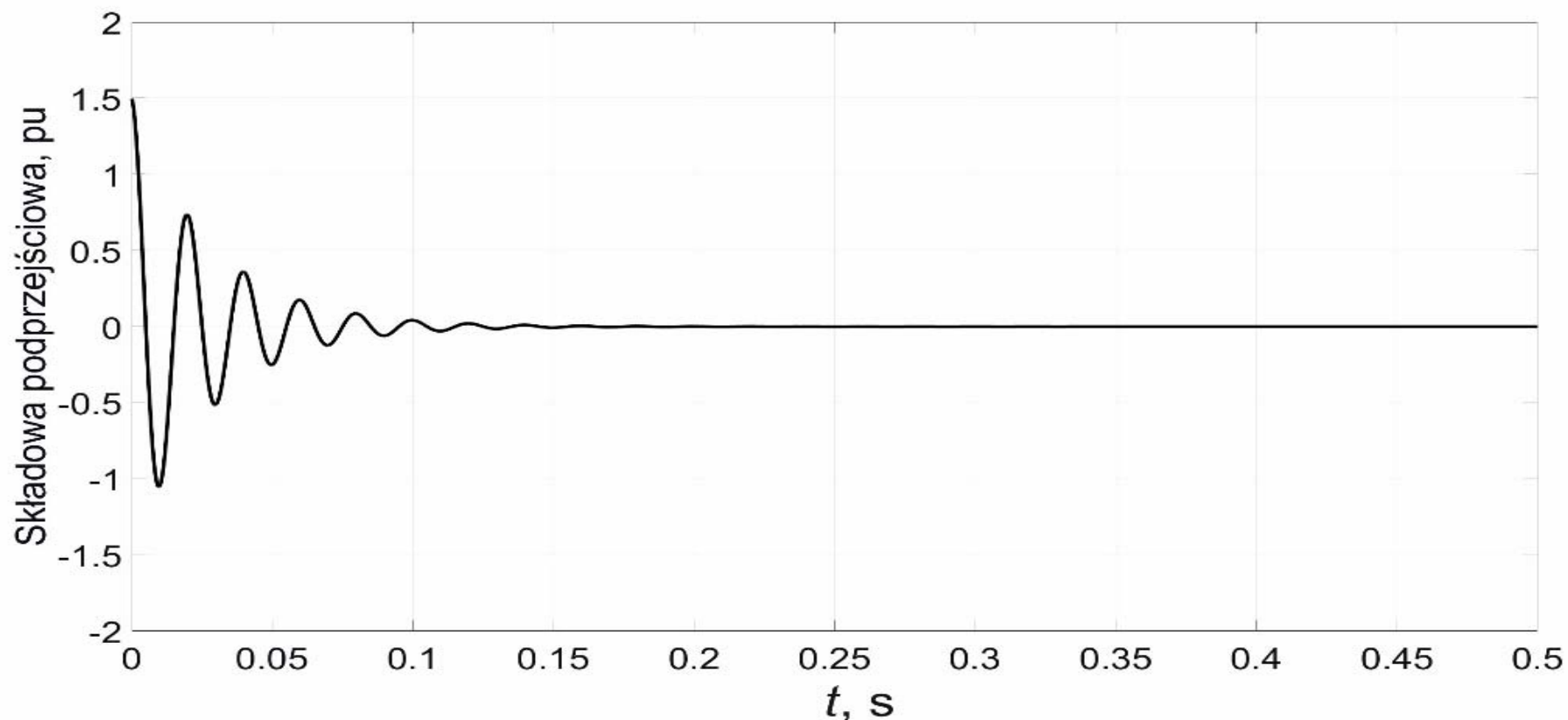


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 118. Przebieg składowej podprzejęciowej prądu zwarcia



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

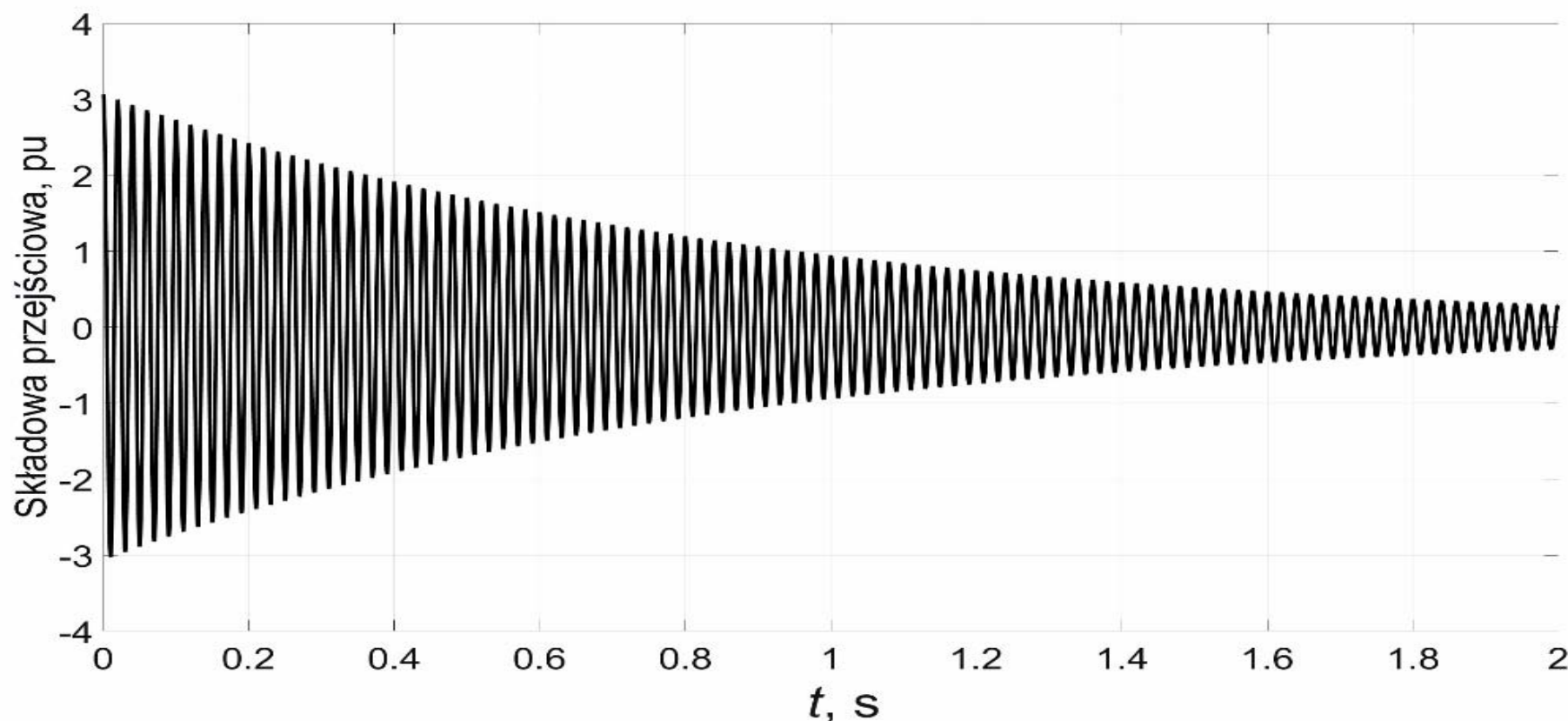


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 119. Przebieg składowej przejściowej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

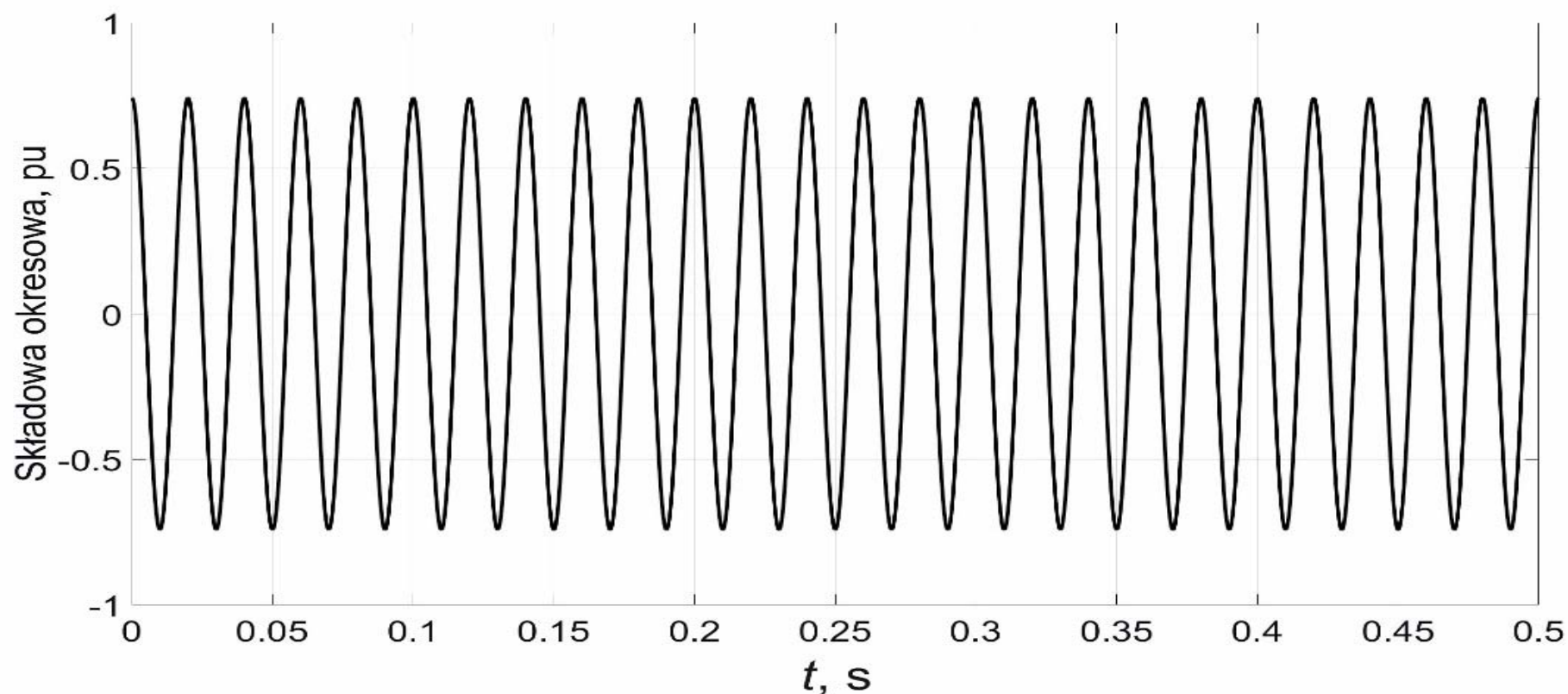


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 120. Przebieg składowej ustalonej prądu zwarcia



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

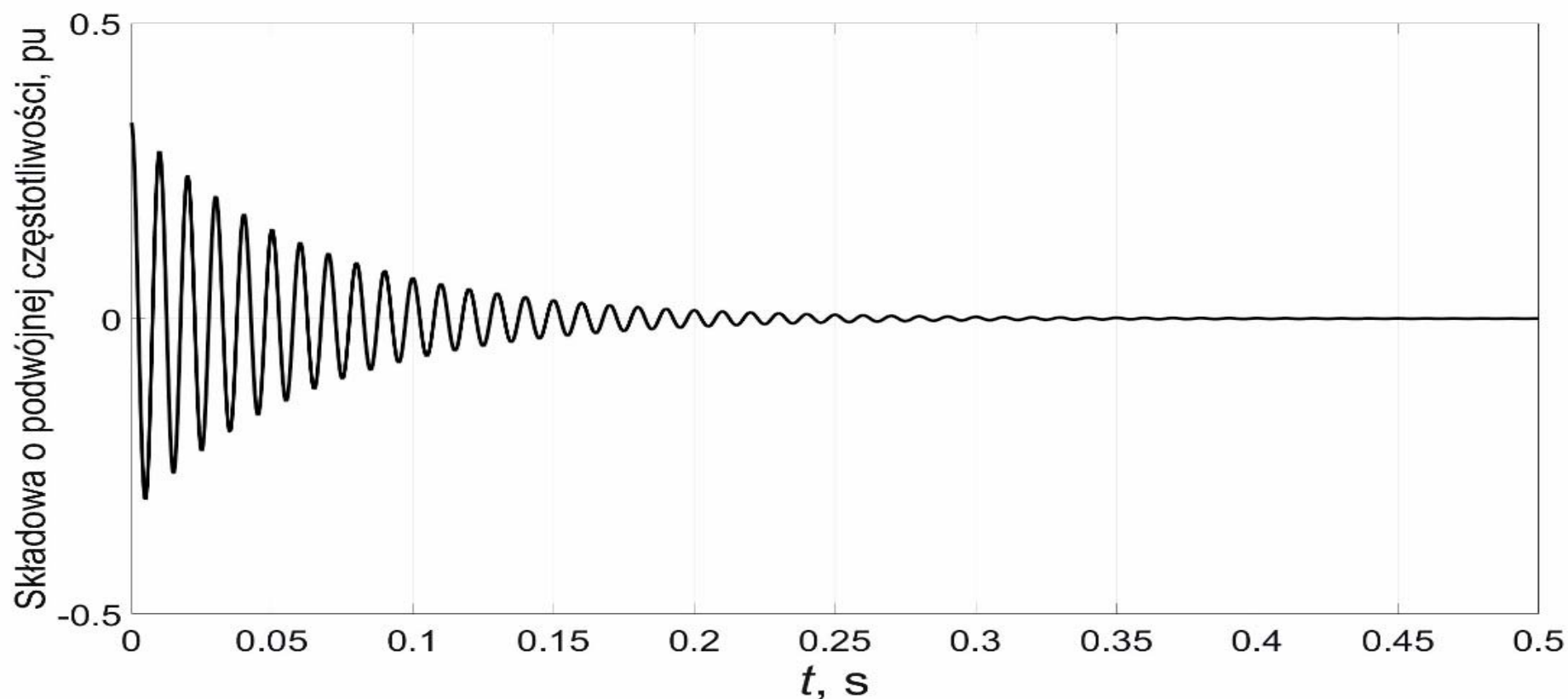


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 121. Przebieg składowej prądu zwarcia o podwójnej częstotliwości



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

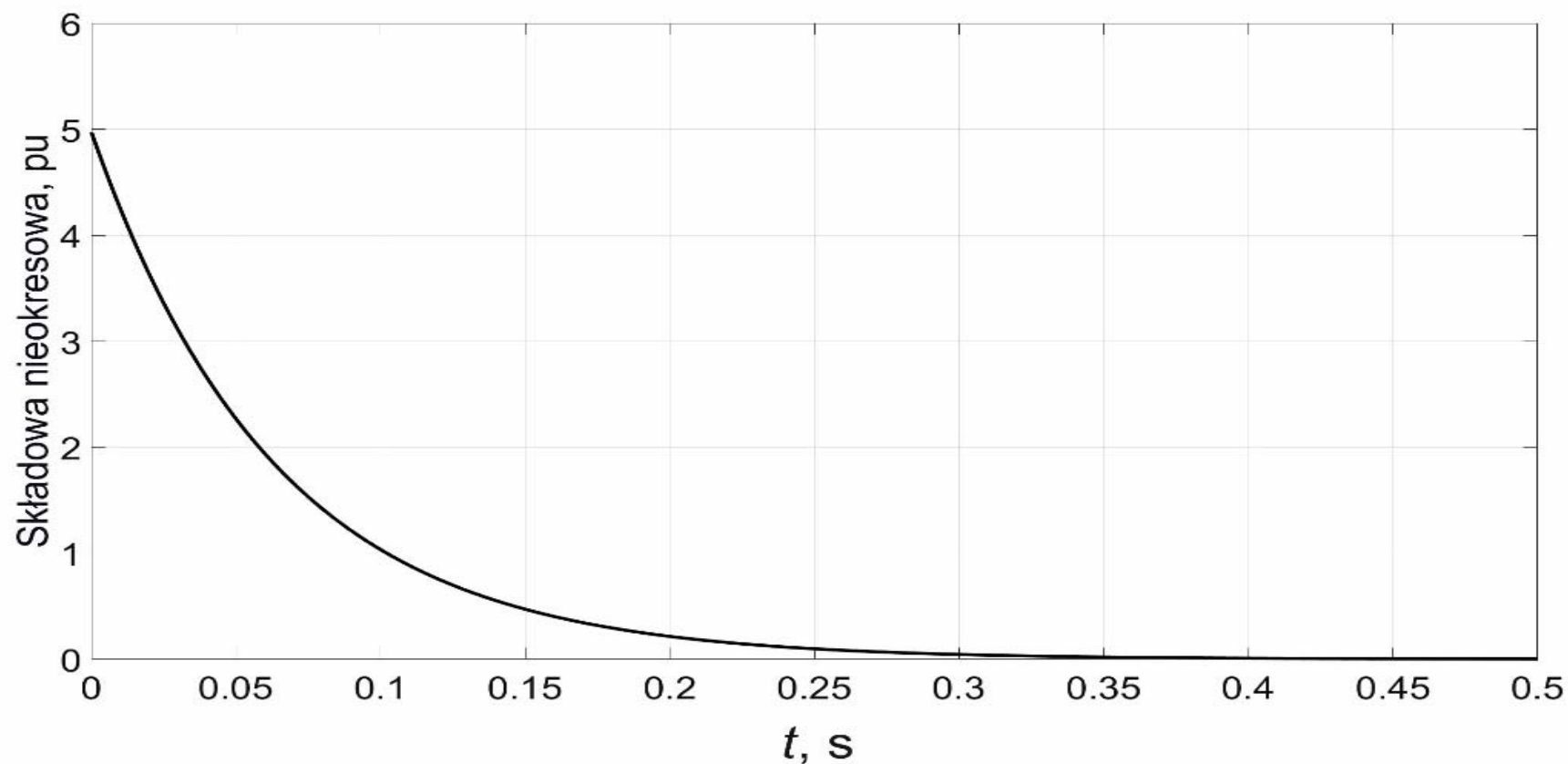


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 122. Przebieg składowej nieokresowej prądu zwarcia



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



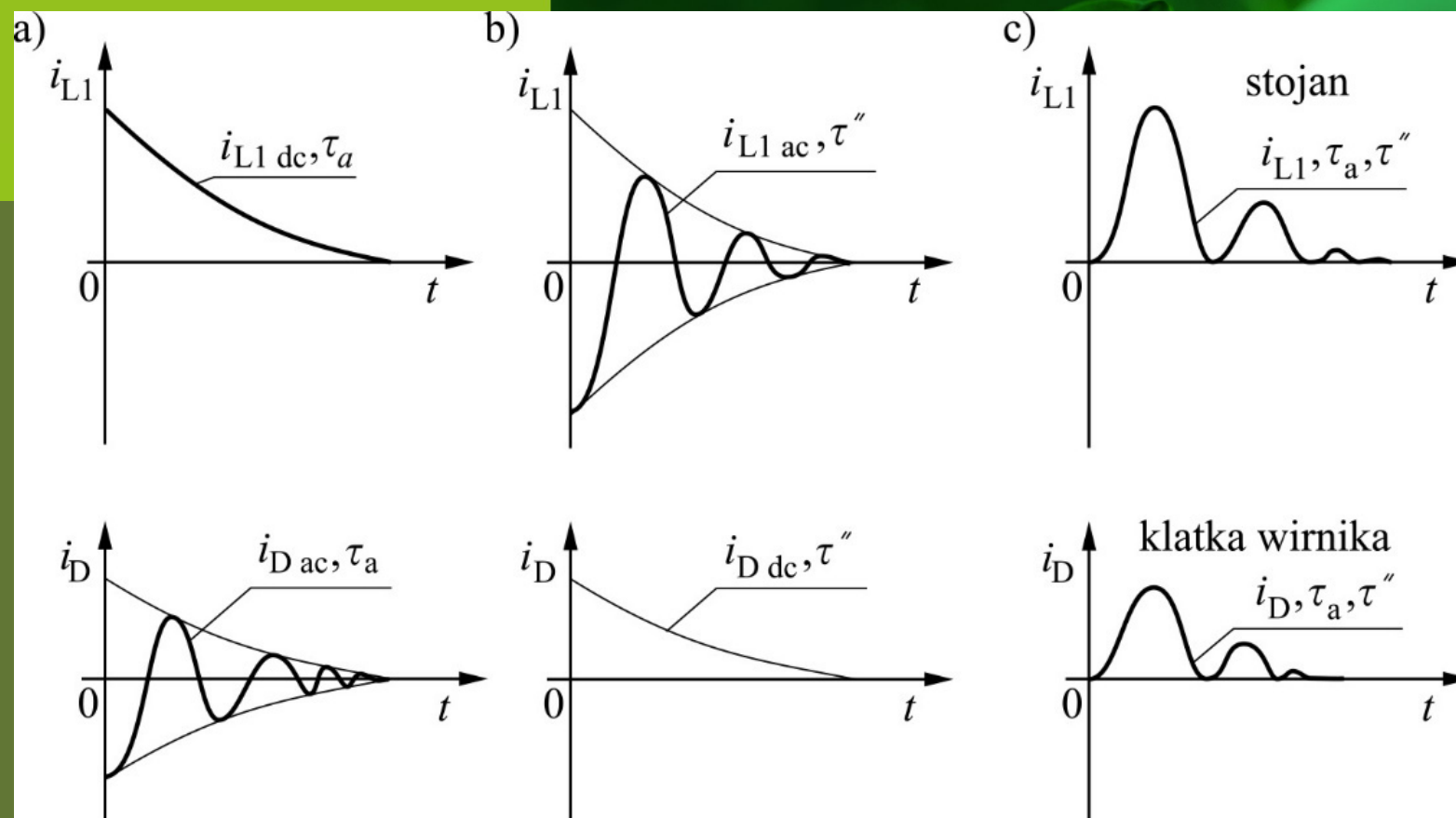
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- a) składowa nieokresowa prądu stojana (i_{L1dc}) oraz odpowiadająca jej składowa okresowa klatki wirnika (i_{Dac})
- b) składowa nieokresowa klatki wirnika (i_{Ddc}) oraz odpowiadająca jej składowa okresowa prądu stojana (i_{L1ac})
- c) prądy wypadkowe (suma a, b)



Rys 123. Przykładowe przebiegi prądów w fazie L1 stojana i klatce wirnika podczas zwarcia trójfazowego na zaciskach silnika indukcyjnego [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



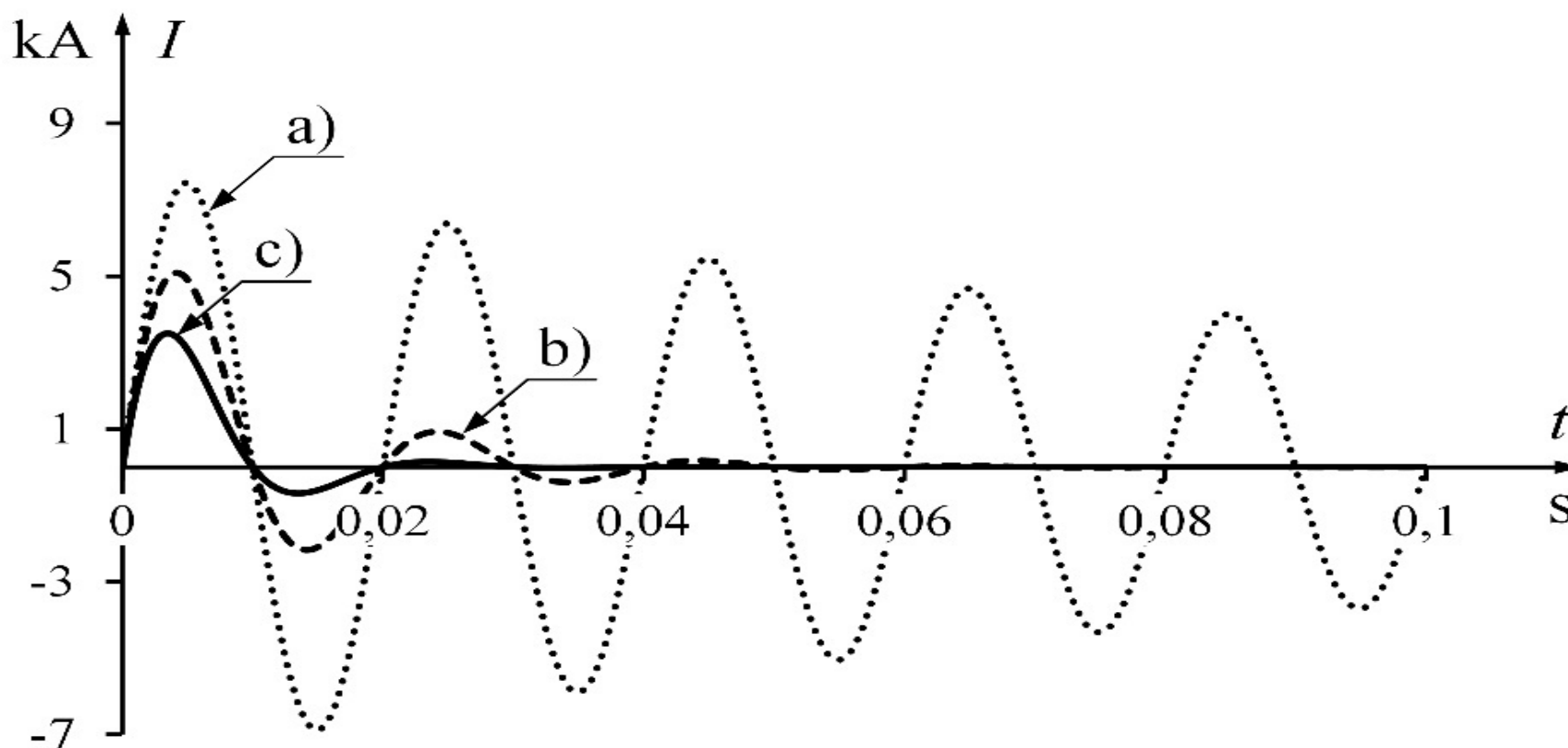
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- a) rezystancja
 $R_e = 0 \Omega$
- b) rezystancja
 $R_e = 10 R_r$
- c) rezystancja
 $R_e = 20 R_r$



Rys 124. Przebieg prądu zwarcia trójfazowego na zaciskach generatora elektrowni wiatrowej typu III [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

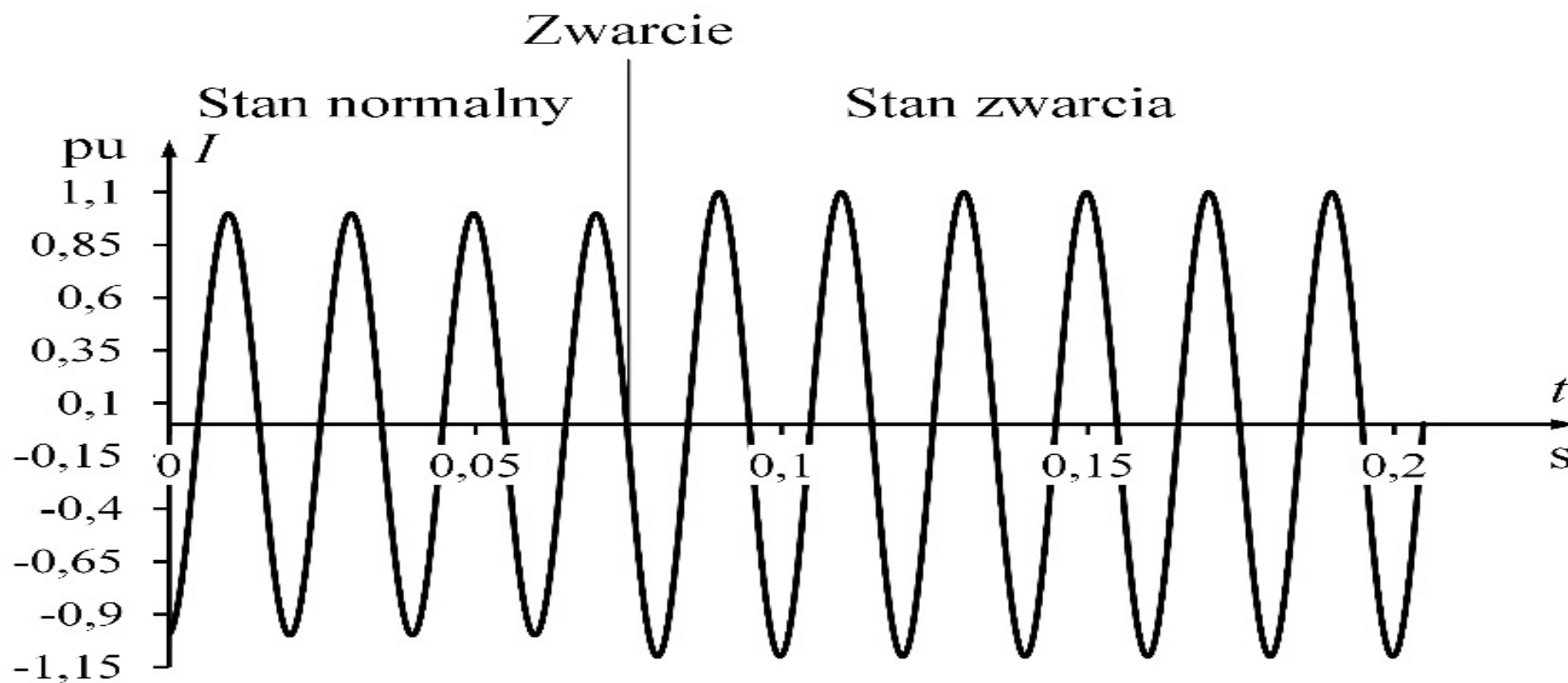


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 125. Przykładowy przebieg prądu zwarcia trójfazowego dla elektrowni wiatrowej typu IV [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Teoretyczne podstawy wyznaczania zwarć symetrycznych i niesymetrycznych



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



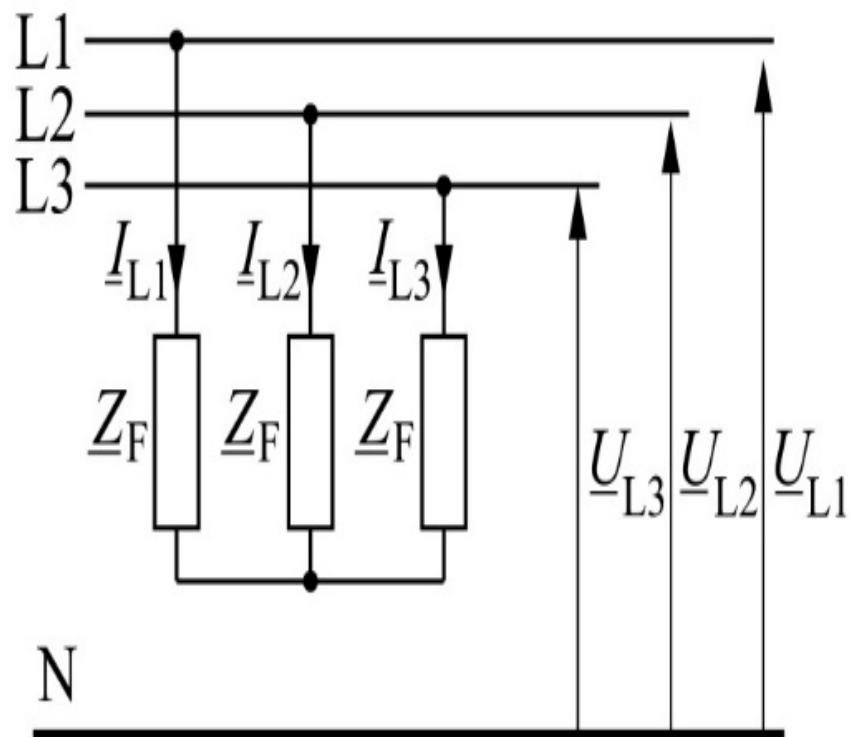
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

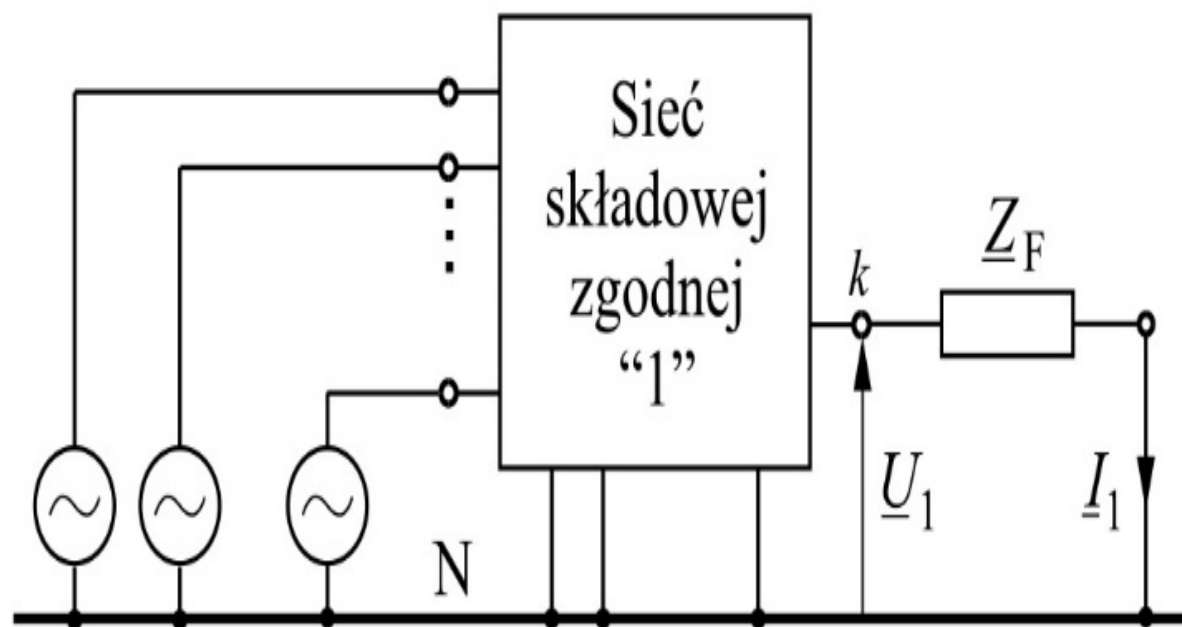


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

a)



b)



Rys 126. Zwarcie trójfazowe : a) schemat fazowy (tylko węzeł k), b) schemat sieci składowej zgodnej [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

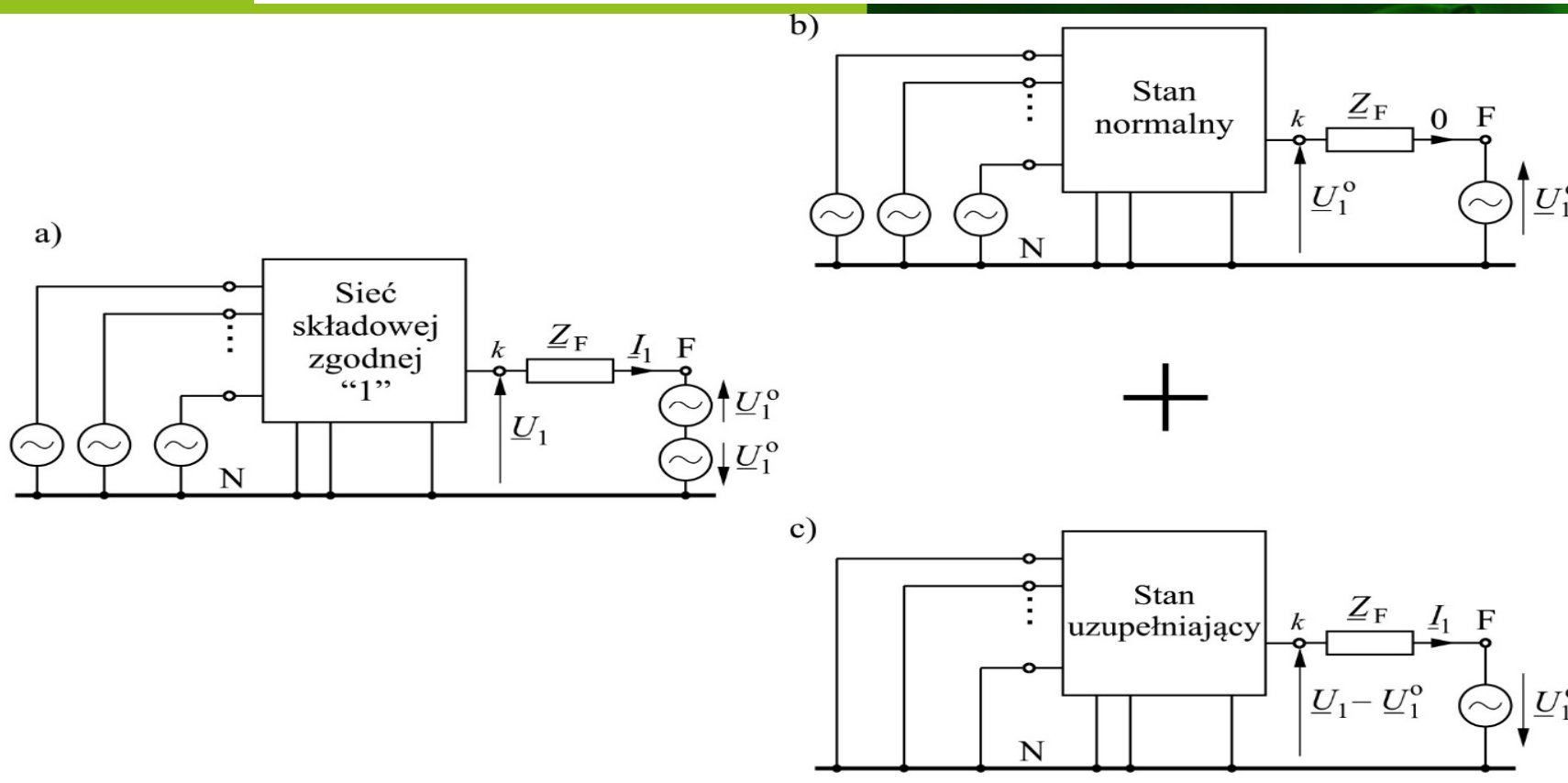


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 127. Zastąpienie sieci ze zwarcie dwoma sieciami zastępczymi (zasada superpozycji) : a) rozpatrywana sieć zwarta, b) schemat zastępczy stanu normalnego, c) schemat zastępczy sieci uzupełniającej [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

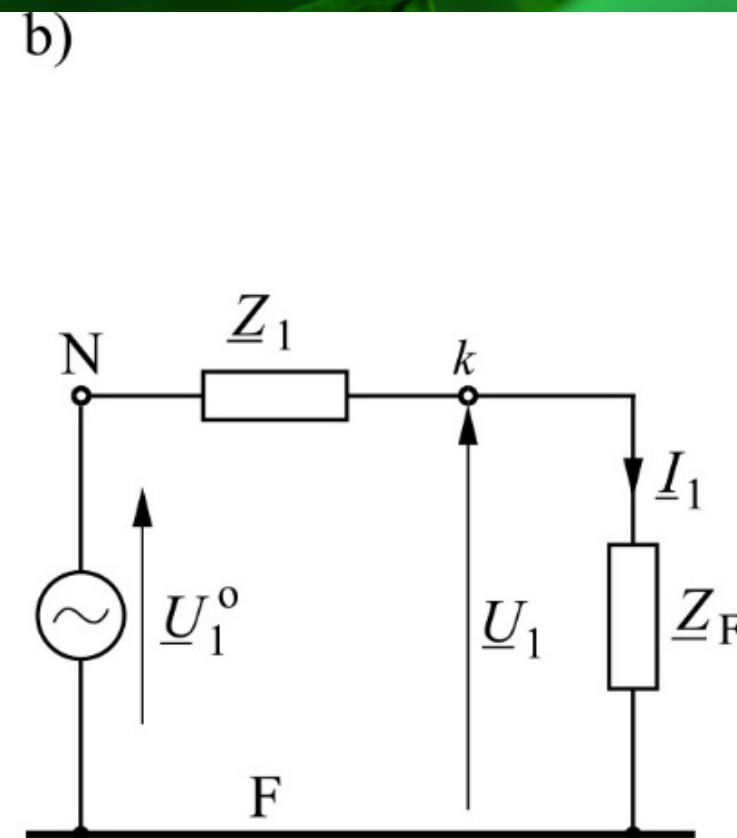
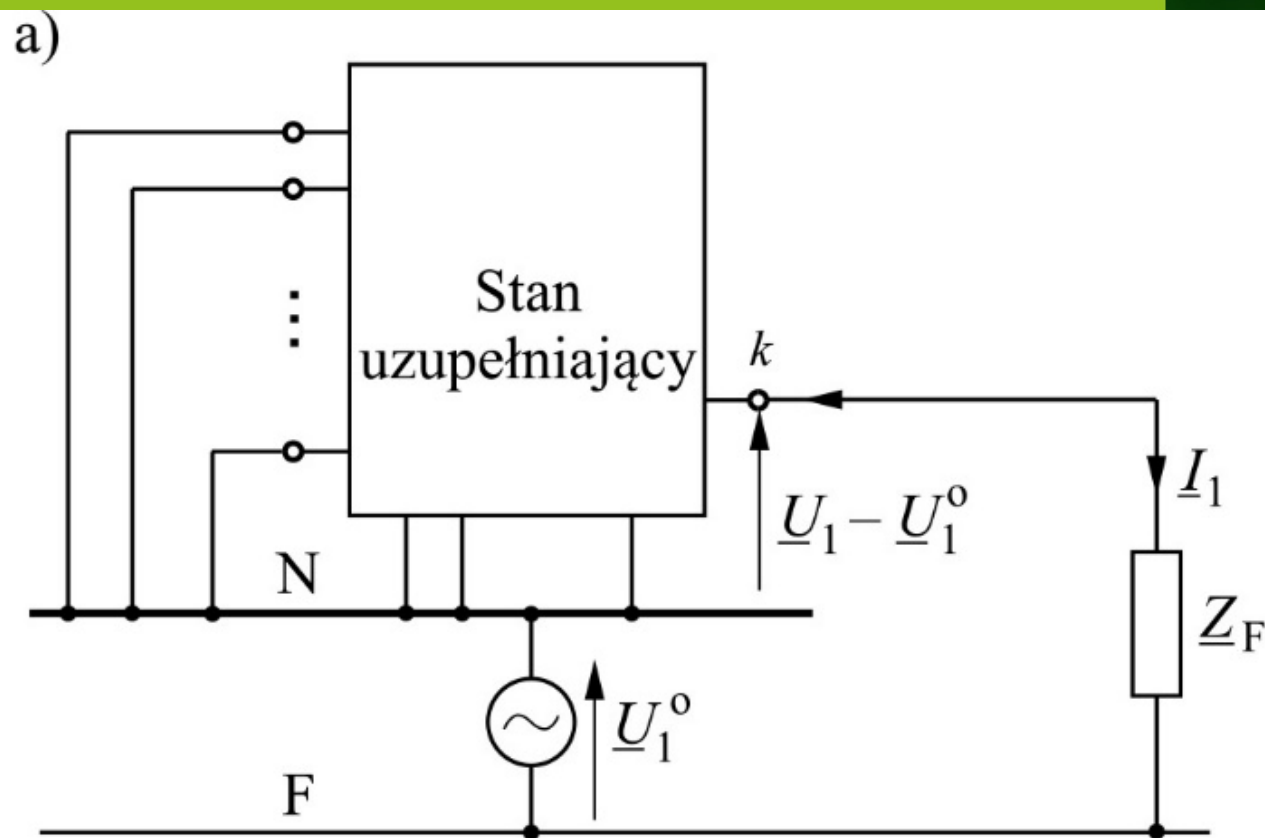


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 128. Schemat sieci uzupełniającej : a) schemat blokowy, b) schemat zastępczy Thevenina [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Obliczenie składowej zgodnej prądu i napięcia na podstawie otrzymanego schematu zastępczego jest bardzo proste. Z praw Ohma i Kirchhoffa dla tego obwodu otrzymuje się:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1^0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_F}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_1^0 - \underline{Z}_1 \underline{I}_1$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

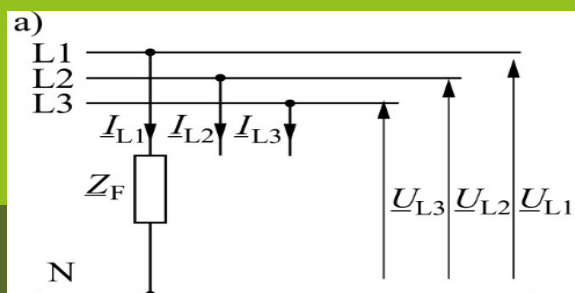


Rzeczpospolita
Polska

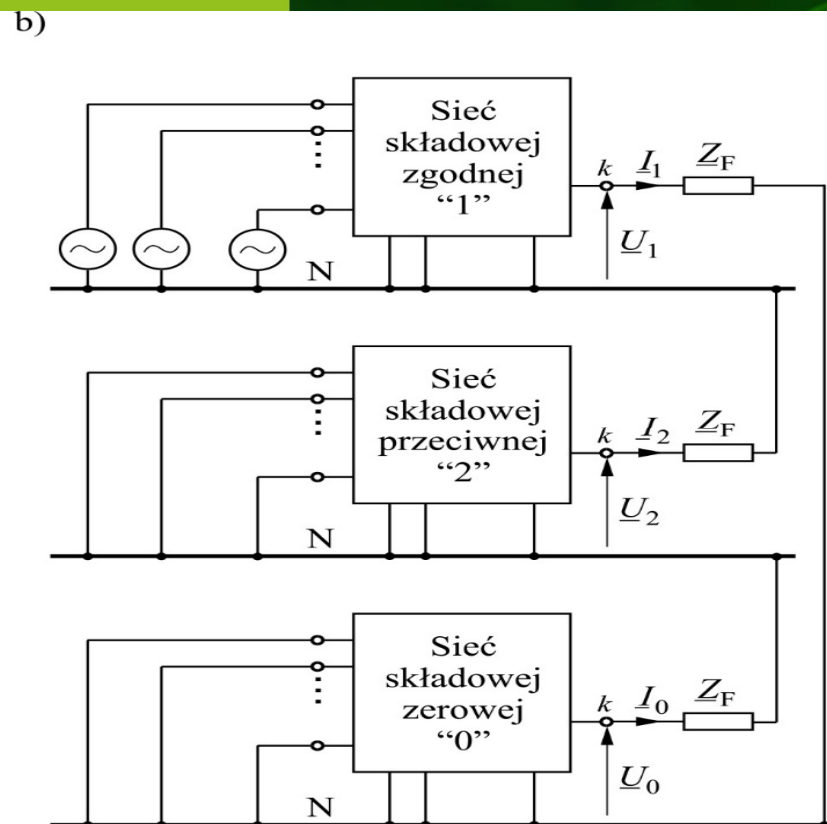
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



$$\begin{aligned} I_{L1} &\neq 0 \\ I_{L2} &= 0 \\ I_{L3} &= 0 \\ U_{L1} &= Z_F I_{L1} \end{aligned}$$



Rys 129. Zwarcie jednofazowe fazy L1 : a) schemat fazowy (tylko węzeł k), b) schemat połączenia sieci składowych symetrycznych [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

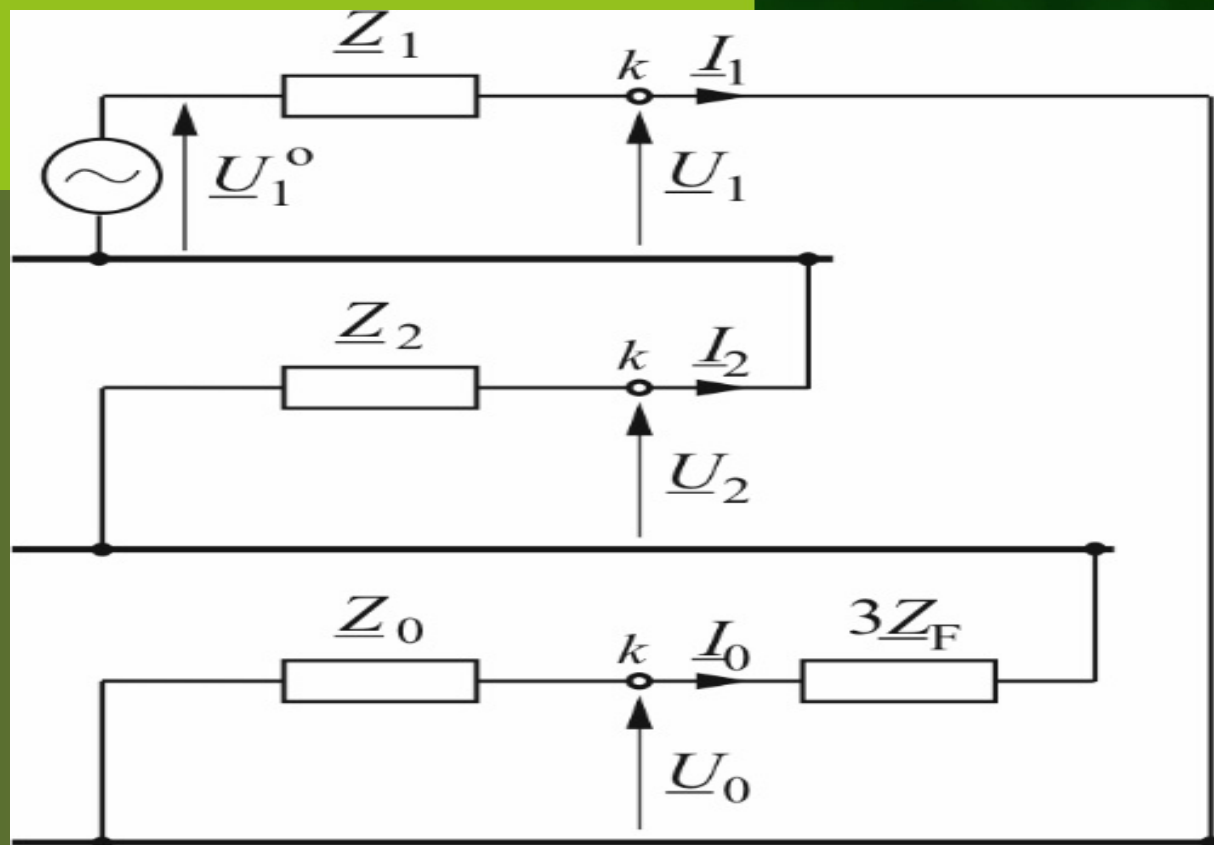


Rzeczpospolita
Polska

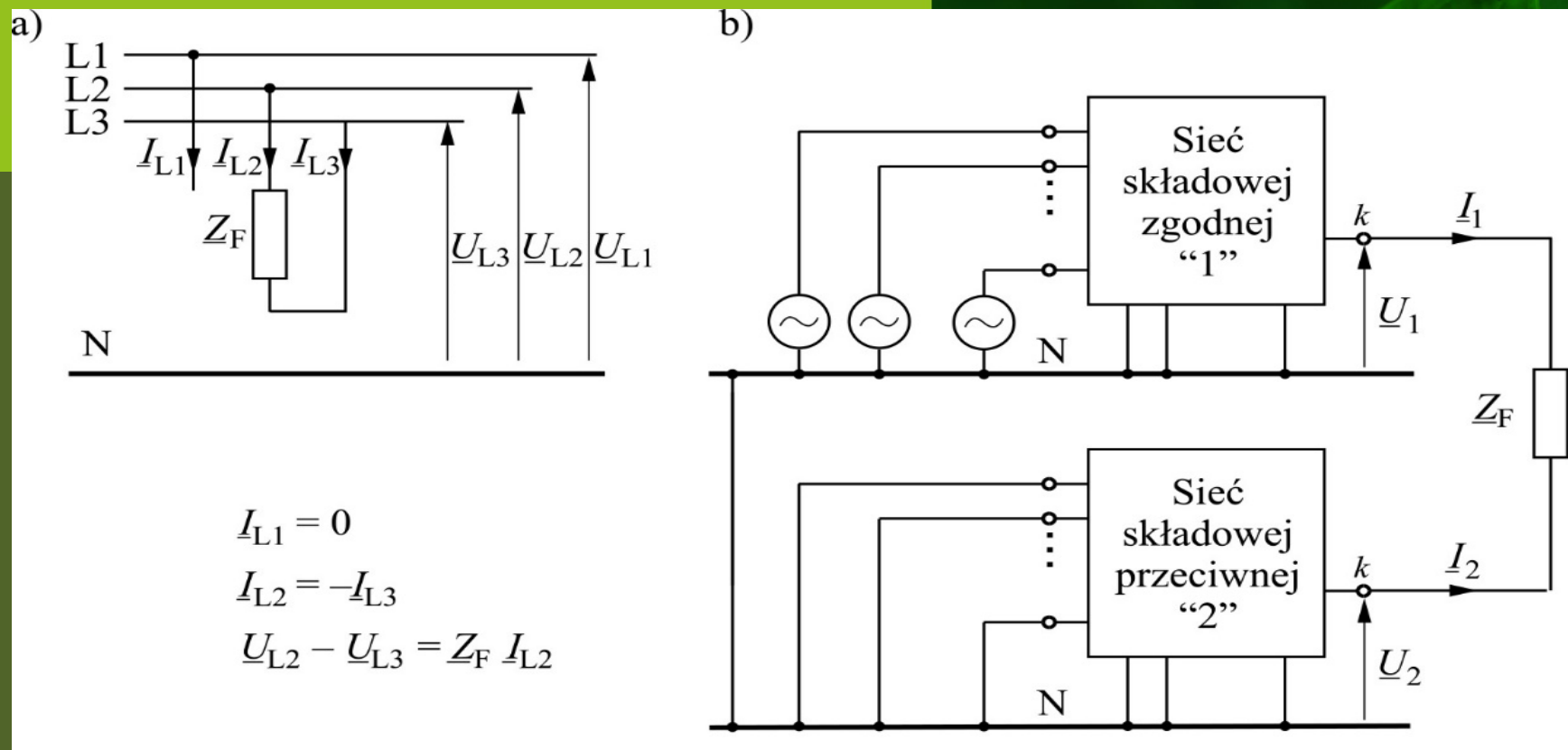
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 130. Schemat połączenia impedancji Thevenina w przypadku zwarcia
jednofazowego fazy L1 [22]



Rys 131. Zwarcie dwufazowe faz L2,L3 : a) schemat fazowy (tylko węzeł k), b) schemat połączenia sieci składowych symetrycznych [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

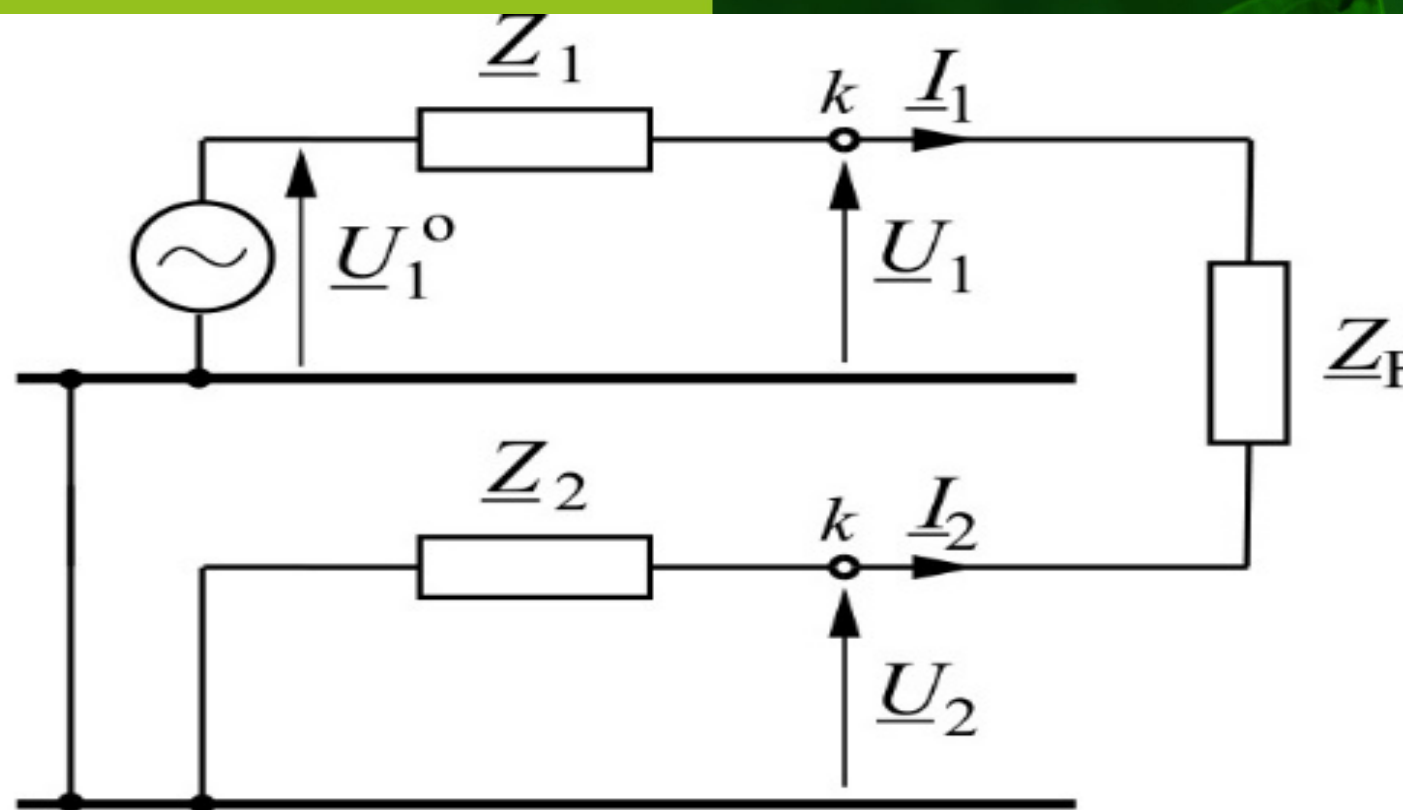


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 132. Schemat połączeń impedancji Thevenina w przypadku zwarcia dwufazowego faz L2, L3 [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

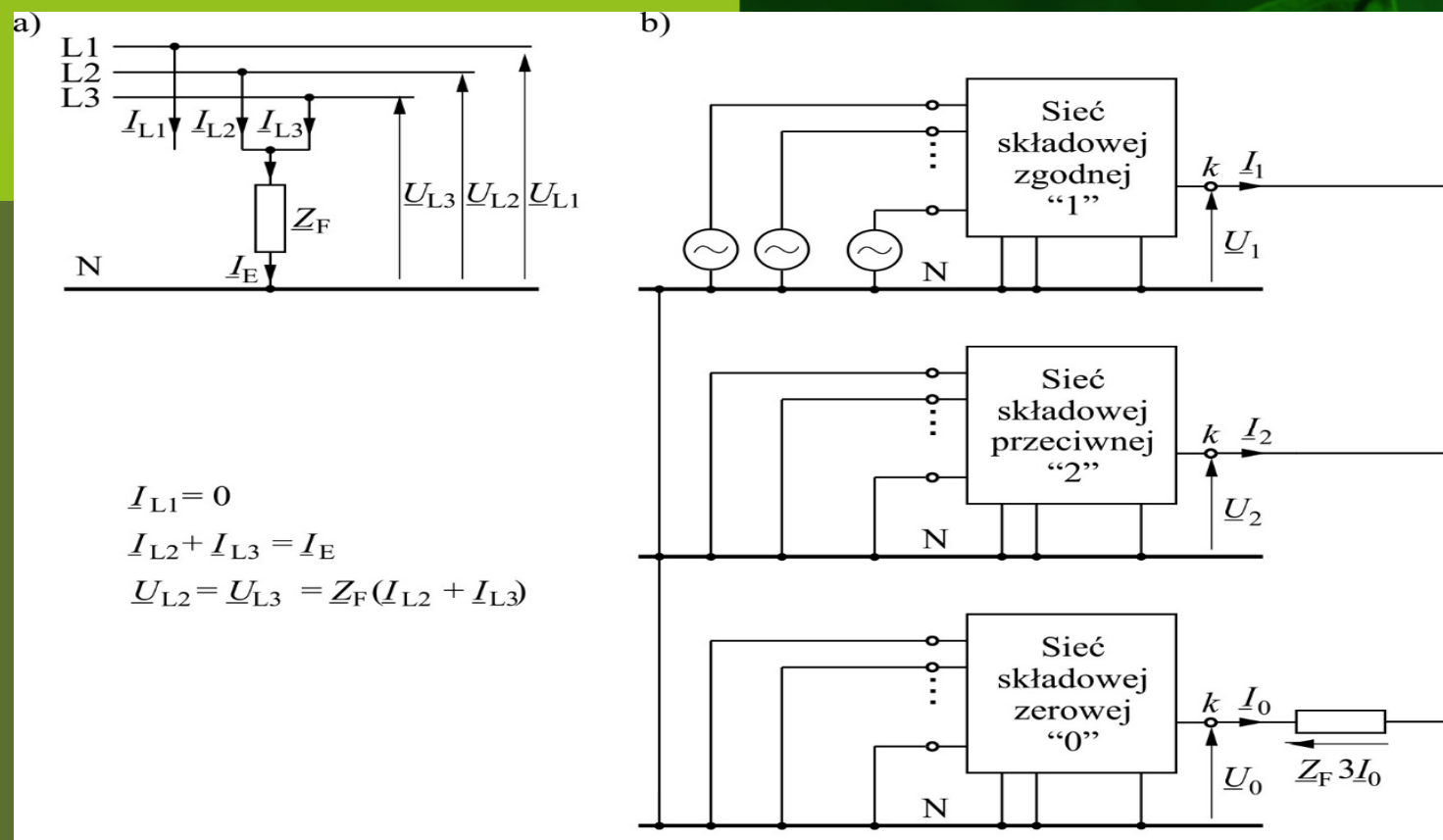


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 133. Zwarcie dwufazowe z ziemią faz L2, L3 : a) schemat fazowy (tylko węzeł k), b) schemat połączenia sieci składowych symetrycznych [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

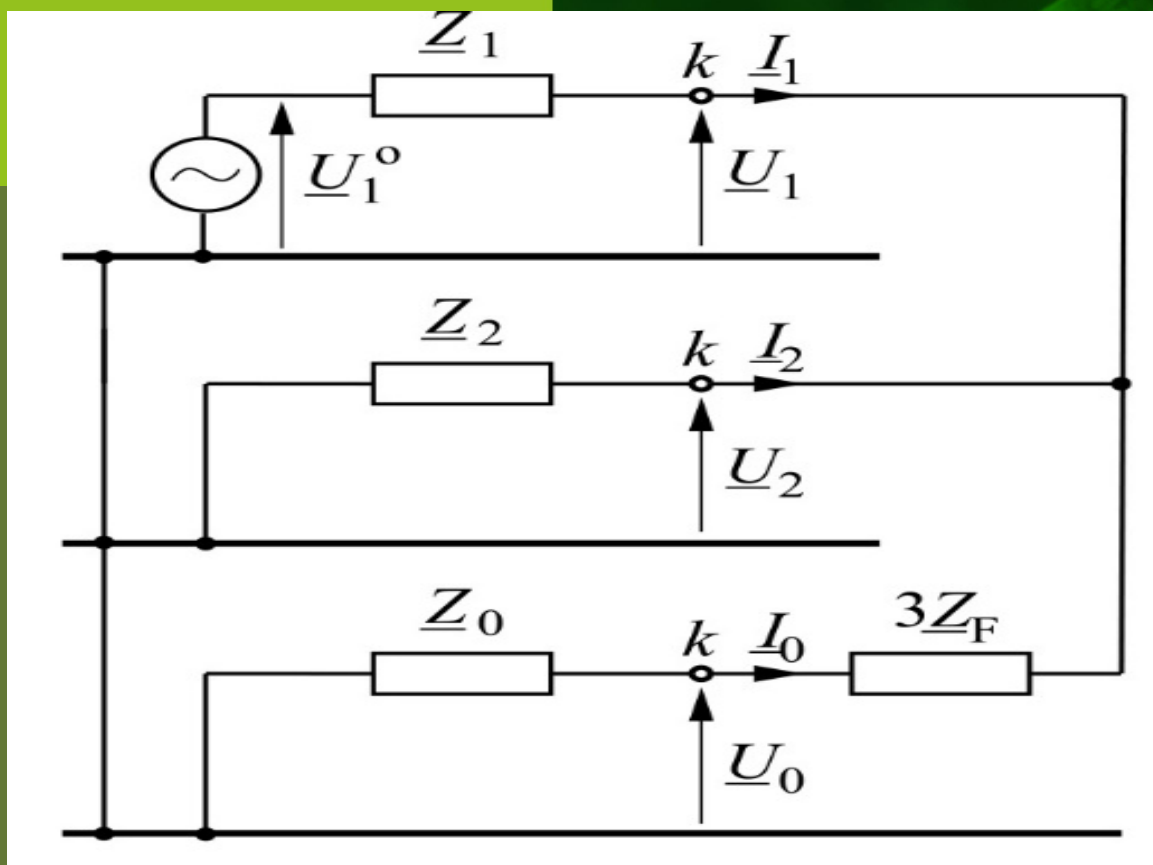


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 134. Schemat połączenia impedancji Thevenina dla zwarcia dwufazowego faz L2, L3 z ziemią [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

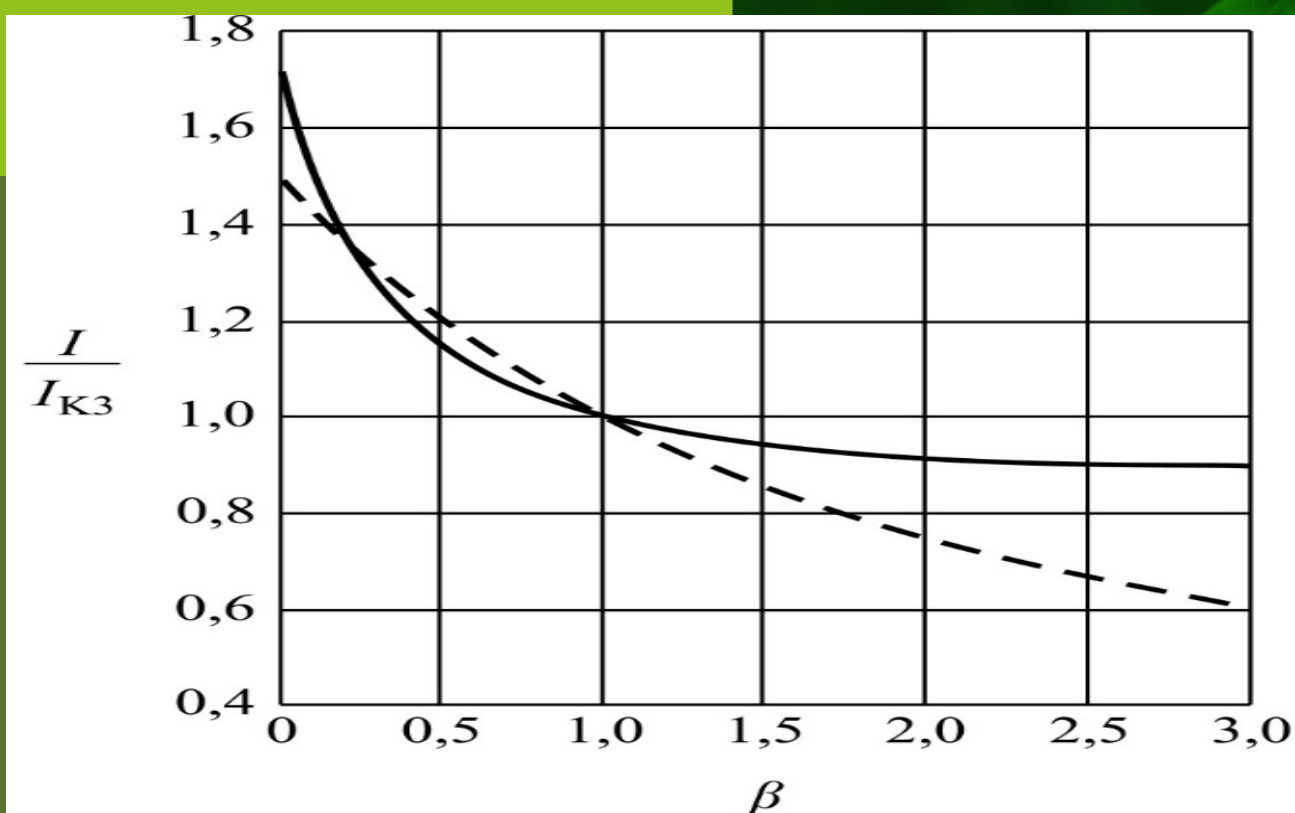


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 135. Zależność prądu zwarcia dwufazowego z ziemią (linia ciągła) oraz prądu zwarcia jednofazowego (linia przerywana) od stosunku reaktancji $\beta = X_0/X_1$ (wartości obu prądów odniesiono do prądu zwarcia 3-fazowego) [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przy małej wartości rezystancji można wykazać, że napięcie faz zdrowych nie przekracza 80% napięcia międzyfazowego, gdy $\beta \leq 3$. Można to zapisać w następujący sposób :

$$U_{L2} \leq 0,8 (\sqrt{3} U^0) \quad \text{gdy} \quad \frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad \text{oraz} \quad \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

Sieć, dla której spełnione są te warunki, nazywa się o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym lub po prostu *siecią skutecznie uziemioną*. Dla takiej sieci izolacja fazowa może być ograniczona do 80% napięcia międzyfazowego.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Warunek prądowy i napięciowy zapisuje się łącznie w postaci nierówności:

$$1 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

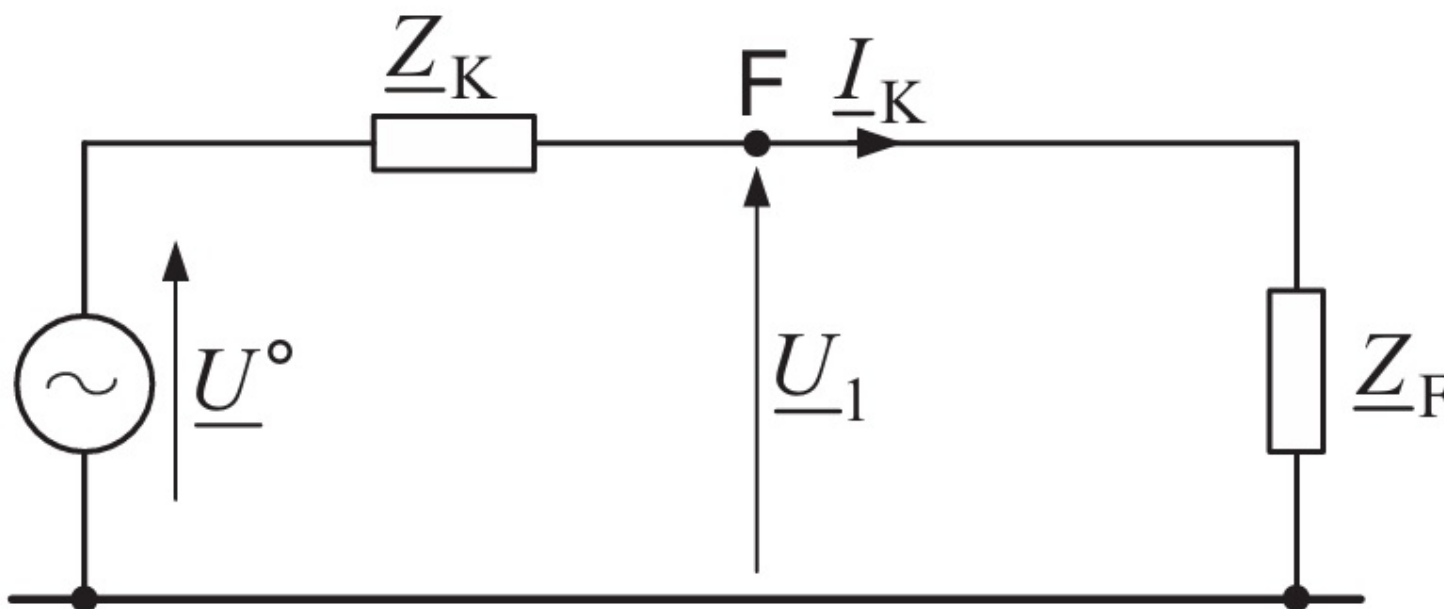


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 136. Schemat zastępczy obwodu elektrycznego, wynikający z twierdzenia Thevenina



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Początkowy prąd zwarcia trójfazowego I''_K wyraża się zależnością:

$$I''_K = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K}$$

Gdzie:

Z_K - oznacza impedancję zwarcia.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

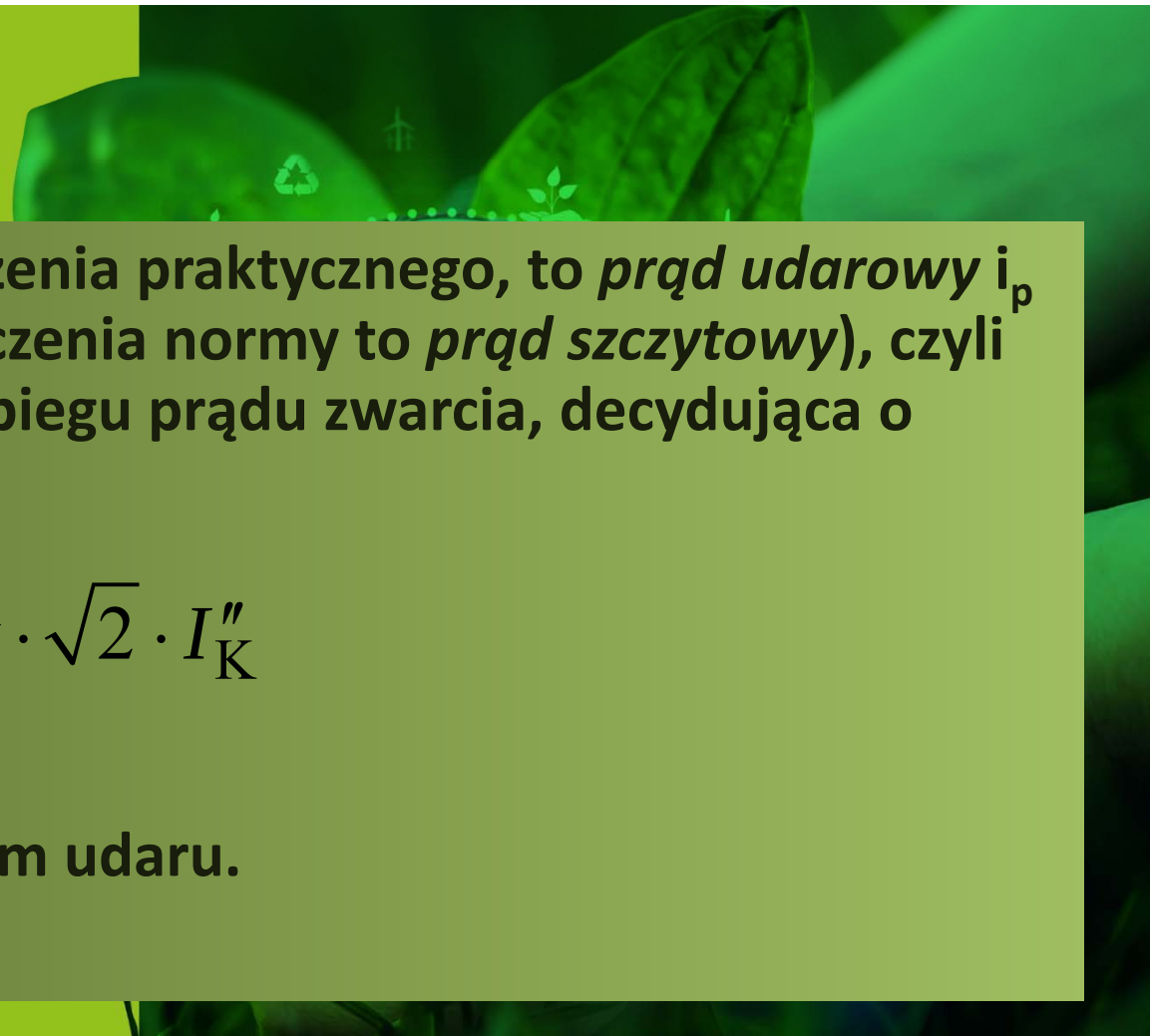


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Kolejna wielkość, istotna z punktu widzenia praktycznego, to *prąd udarowy* i_p (poprawna nazwa, wynikająca z tłumaczenia normy to *prąd szczytowy*), czyli maksymalna wartość chwilowa w przebiegu prądu zwarcia, decydująca o dynamicznych skutkach zwarcia.

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_K''$$

Gdzie:

$\chi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_K}{X_K}}$ - jest współczynnikiem udaru.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

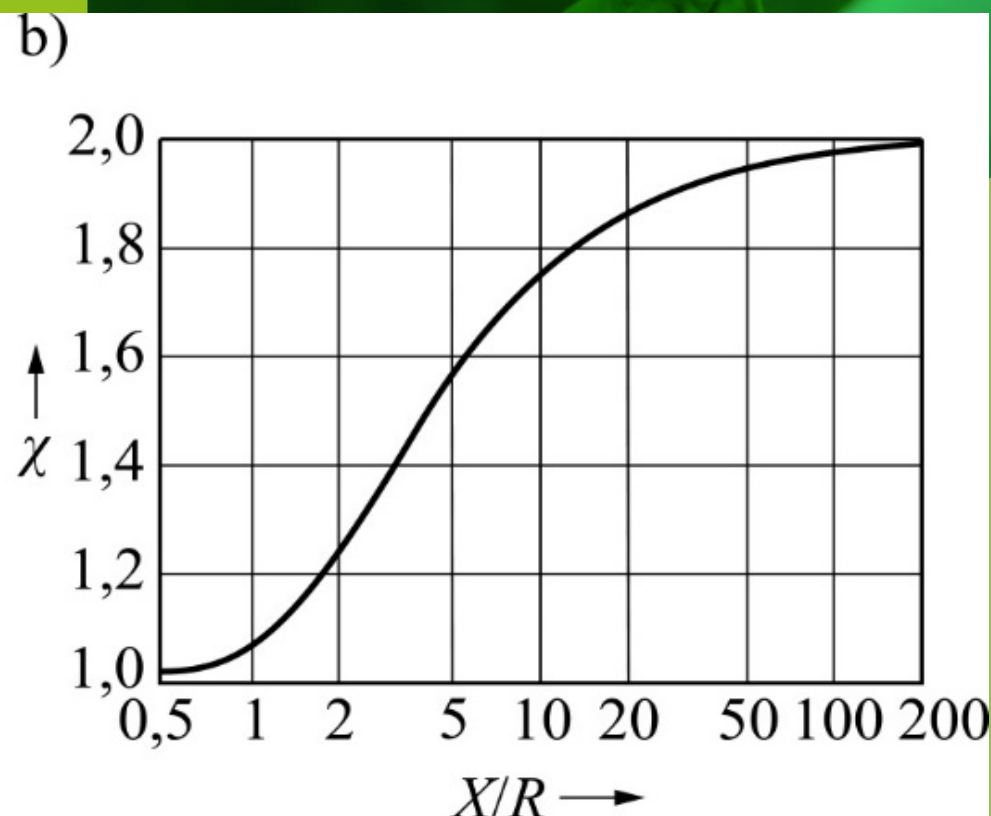
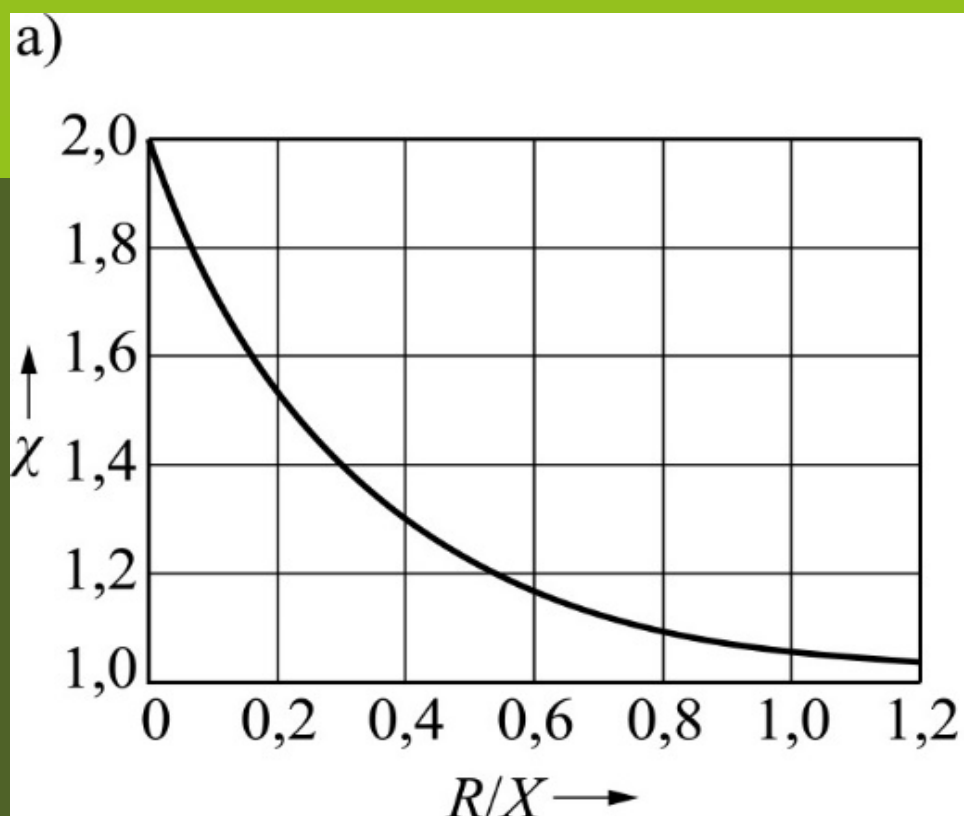


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 137. Współczynnik χ dla obwodów szeregowych w zależności od wartości a) R/X oraz b) X/R [22, 36]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

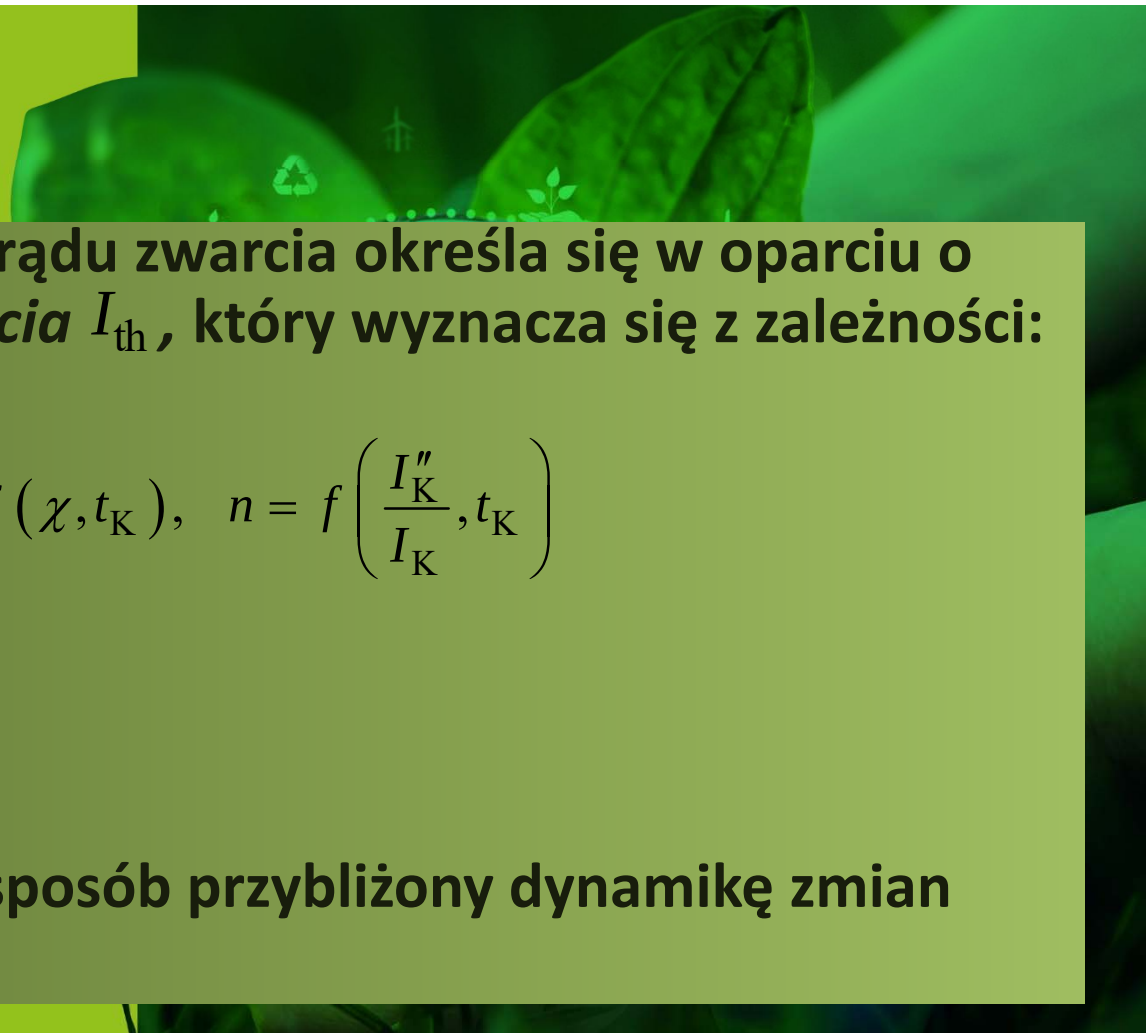


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Efekt cieplny wynikający z przepływu prądu zwarcia określa się w oparciu o wielkość zwaną *cieplnym prądem zwarcia* I_{th} , który wyznacza się z zależności:

$$I_{th} = I_K'' \cdot \sqrt{m + n}, \quad m = f(\chi, t_K), \quad n = f\left(\frac{I_K''}{I_K}, t_K\right)$$

gdzie:

I_K - ustalony prąd zwarcia,

m, n , – parametry charakteryzujące w sposób przybliżony dynamikę zmian przebiegu zwarciovego



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

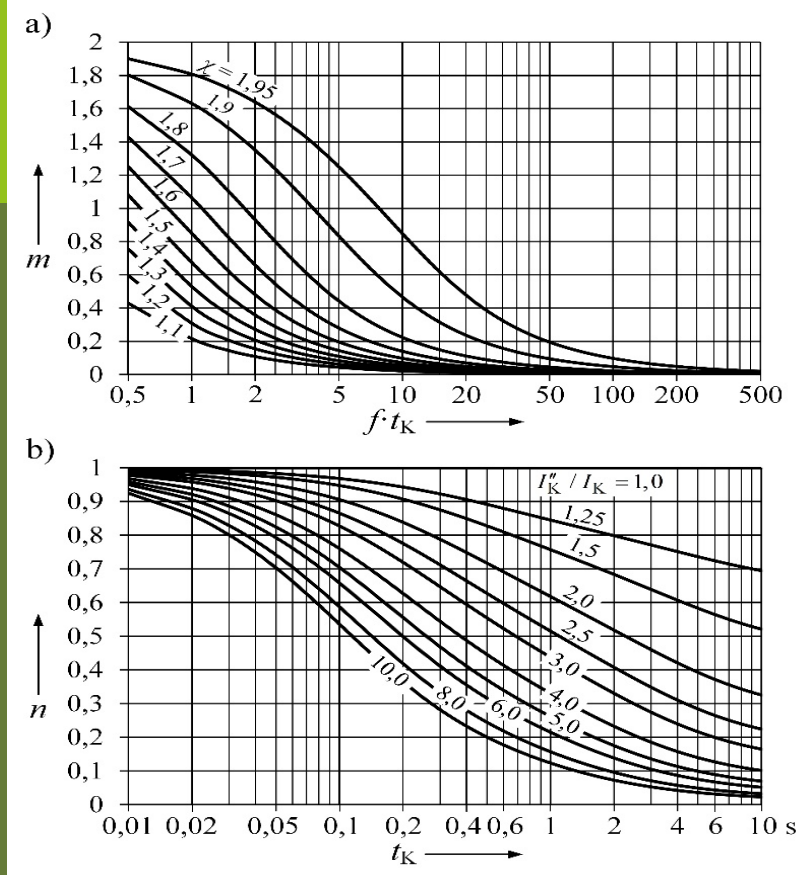


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 138. Wyznaczanie współczynników do obliczania prądu zwarcowego cieplnego I_{th} w funkcji czasu trwania zwarcia t_K : a) współczynnik m (stała χ jak dla prądu udarowego), b) współczynnik n [22, 36]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Kolejna wielkość, istotna z punktu widzenia doboru wyłączników to symetryczny prąd wyłączeniowy I_b który wyznacza się z zależności:

$$I_b = \mu \cdot I_K'', \quad \mu = f\left(\frac{I_K''}{I_{nG}}, t_{\min}\right)$$

Gdzie:

I_{nG} - prąd znamionowy generatora, A;

μ - współczynnik uzależniony od stosunku I_K'' / I_{rG} , który można odczytać z wykresów przedstawionych na Rys. 139;

$t_{\min}$ – minimalny czas własny wyłącznika, s.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

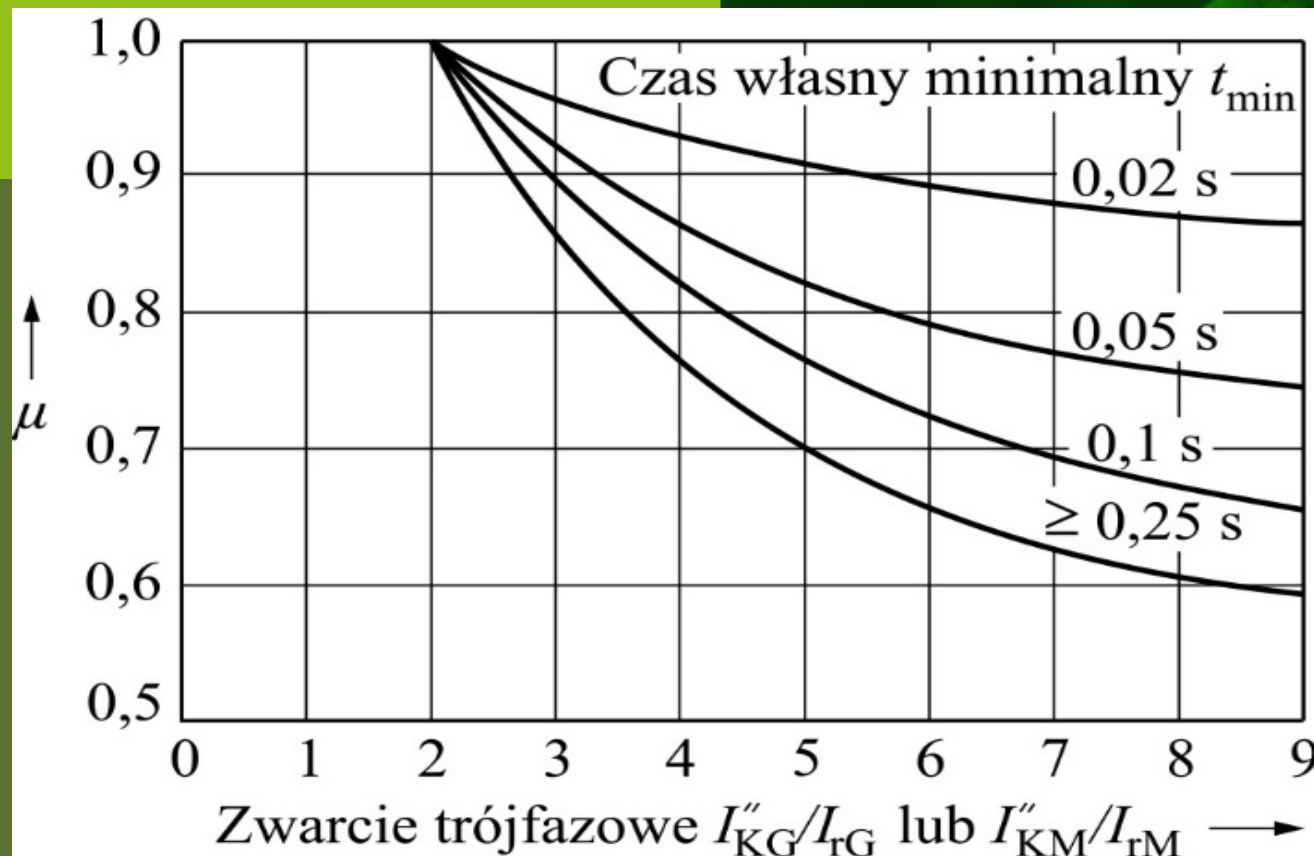


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 139. Współczynnik μ do obliczania prądu zwarcia wyłączeniowego I_B [22, 36]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Uwzględniając składową i_{DC} prądu zwarcia wyznaczyć można niesymetryczny prąd wyłączeniowy I_{basym} , według zależności :

$$I_{basym} = \sqrt{I_b^2 + i_{DC}^2}$$

$i_{DC} = \sqrt{2} \cdot I_K'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ - składowa nieokresowa prądu zwarcia;

$\tau = \frac{X_K}{\omega \cdot R_K}$ - stała czasowa obwodu, s;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – pulsacja, 1/s;

t – czas, s.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

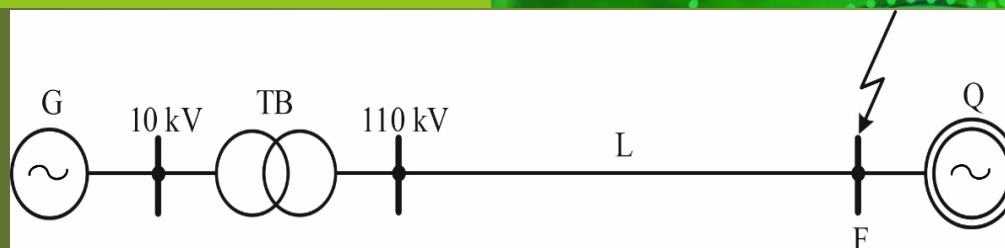
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 23.

Dla układu przedstawionego na rysunku obliczyć maksymalny początkowy prąd zwarcia trójfazowego w węźle F oraz moc zwarciovą. W obliczeniach pominąć rezystancję elementów.



Rys 140. Schemat rozpatrywanego układu w zadaniu

Dane:

System zastępczy (Q) – $S''_{KQ} = 1500 \text{ MVA}$, $U_n = 110 \text{ kV}$

Generator (G) – $S_{nG} = 150 \text{ MVA}$, $U_{nG} = 10,5 \text{ kV}$, $X''_{d\%} = 12\%$

Transformator blokowy (TB) – $S_{nT} = 160 \text{ MVA}$, $\vartheta = \frac{121}{10,5} \text{ kV/kV}$, $u_K = 10\%$

Linia (L) – AFL 6-240, $l = 30 \text{ km}$, $U_{nG} = 110 \text{ kV}$, $X' = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}}$



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

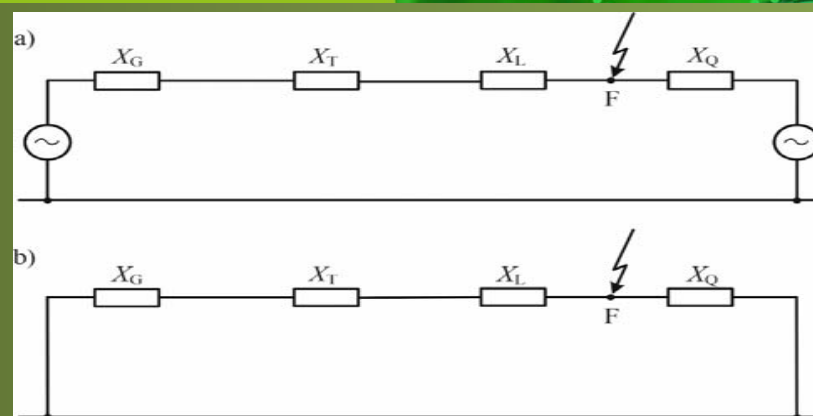


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zadanie zostanie rozwiązane dwoma sposobami.

Pierwszy sposób polega na „zwinięciu” schematu do jednej reaktancji zwarcia X_K i obliczeniu początkowego prądu zwarcia trójfazowego I_K'' .

Schemat układu dla składowej zgodnej przedstawiono na Rys. 142.



Rys 141. Schemat rozpatrywanego układu w zadaniu a) schemat sieci składowej symetrycznej zgodnej b) schemat pasywny sieci składowej symetrycznej zgodnej

Reaktancje elementów, przeliczone na poziom 110 kV (czyli napięcie, na poziomie którego wystąpiło zwarcie), wyznacza się według następujących zależności:

$$X_Q = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{KQ}''} = \frac{1,1 \cdot (110 \cdot 10^3)^2}{1500 \cdot 10^6} = 8,87 \, \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

$$X_G = \frac{X_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{ng}} \cdot 9_{TB}^2 = \frac{12 \cdot (10,5 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 150 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{121 \cdot 10^3}{10,5 \cdot 10^3} \right)^2 = 11,71 \Omega$$

$$X_T = \frac{\Delta u_{z\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}} = \frac{10 \cdot (121 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 160 \cdot 10^6} = 9,15 \Omega$$

$$X_L = X' \cdot l = 0,4 \cdot 30 = 12 \Omega$$

Reaktancja zwarcia X_K , wyznaczona na podstawie schematu z Rys. 141 wynosi:

$$X_K = (X_G + X_T + X_L) \parallel X_Q = 6,99 \Omega$$

Początkowy prąd zwarcia trójfazowego I_K'' wynosi:

$$I_K'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_K} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 6,99} = 10 \text{ kA}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

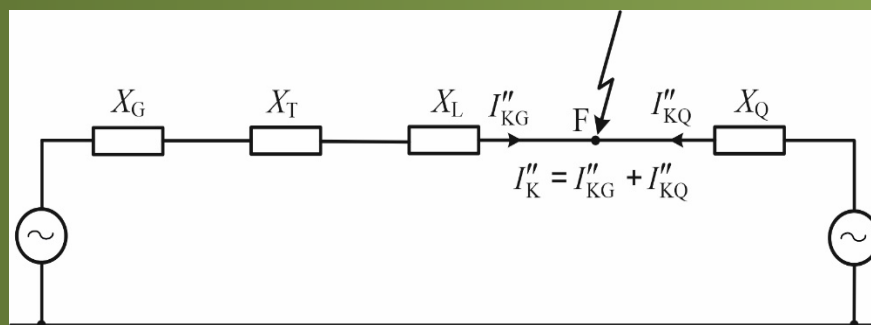


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Moc zwarciova w punkcie F zostaje wyznaczona zgodnie z zależnością:

$$S''_{KF} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_K = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10 = 1903 \text{ MVA}$$

Drugi sposób rozwiązania polega na wyznaczeniu udziałów prądów zwarciovych od systemu i generatora, a następnie ich zsumowaniu. Schemat układu dla składowej zgodnej, wraz z zaznaczeniem udziałów prądów zwarciovych, przedstawiono na Rys. 142.



Rys 142. Schemat rozpatrywanego układu w zadaniu wraz z zaznaczeniem udziałów prądów zwarciovych



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Udział prądu zwarciovego I''_{KG} od generatora G wynosi:

$$I''_{KG} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{KG}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 32,86} = 2,13 \text{ kA}$$

$$X_{KG} = X_G + X_T + X_L = 11,71 + 9,15 + 12 = 32,86 \Omega$$

Udział prądu zwarciovego I''_{KQ} od systemu zastępczego Q wynosi:

$$I''_{KQ} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{KQ}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 8,87} = 7,87 \text{ kA}$$

$$X_{KQ} = X_Q = 8,87 \Omega$$

Prąd w miejscu zwarcia stanowi sumę udziałów prądów zwarciovych od poszczególnych źródeł (generatora i systemu):

$$I''_K = I''_{KG} + I''_{KQ} = 2,13 + 7,87 = 10 \text{ kA}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Problematyka zwarć z ziemią w sieciach średniego napięcia



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

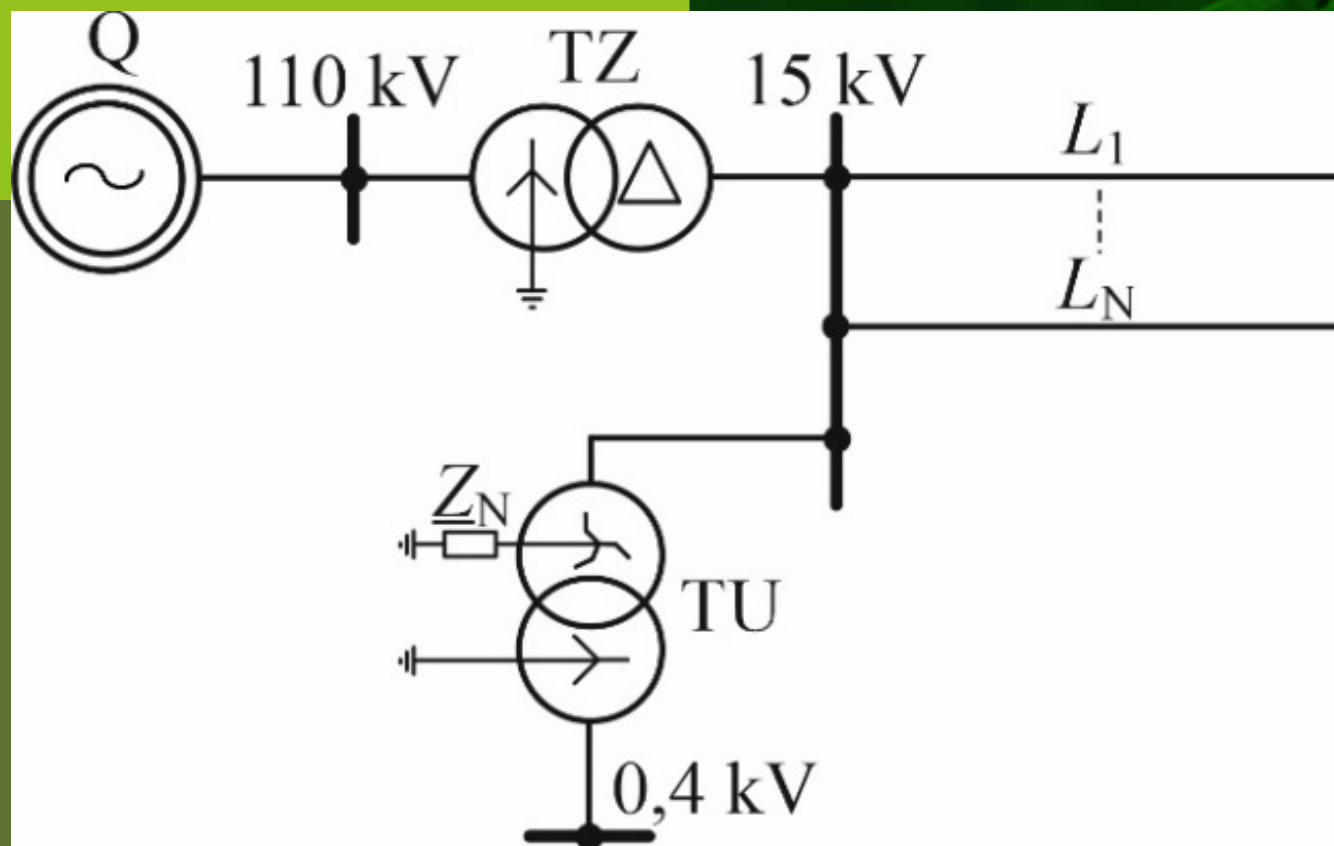


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 143. Sposób zasilania sieci SN



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

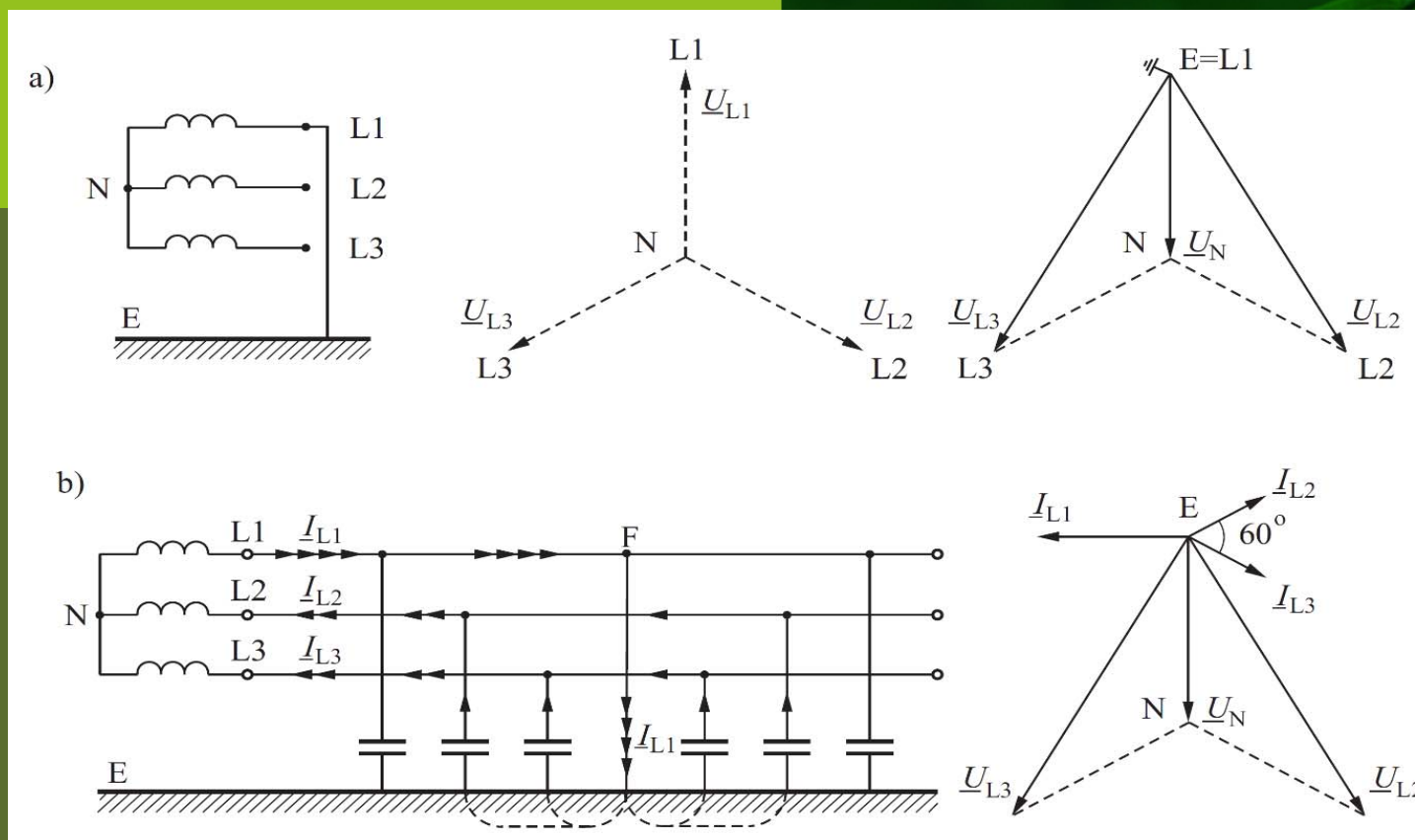


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 144. Zwarcie jednofazowe z ziemią w sieci pracującej z izolowanym punktem neutralnym:
a) transformator bez połączenia z siecią, b) transformator zasila sieć o określonej pojemności [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Prąd zwarcia doziemnego I_{L1} (fazy L1 z ziemią) można wyznaczyć z następującej zależności :

$$I_{zC} = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_0$$

lub ze wzoru przybliżonego:

$$I_{zC} \approx U_n \cdot (0,1 \cdot l_k + 0,003 \cdot l_n), A$$

Gdzie:

U_n – napięcie znamionowe linii, kV;

U_f – napięcie fazowe linii, V;

l_k – sumaryczna długość odcinków linii kablowych, km;

l_n – sumaryczna długość odcinków linii napowietrznych, km;

C_0 – pojemność dla składowej zerowej sieci, F.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Indukcyjność dławika (L_N) wyznacza się z następującej zależności:

$$L_N = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0}$$

W praktyce trudno jest uzyskać kompensację dokładną ze względu na to, że:

- indukcyjność dławika jest dostrojona tylko do częstotliwości sieciowej; dla wyższych harmonicznnych kompensacja nie zachodzi,
- topologia sieci podlega zmianom (wyłączenia, przyłączanie nowych odcinków sieci),
- występuje zjawisko upływności linii, powodujące istnienie składowej czynnej prądu zwarcia.

W rezultacie powstaje prąd resztkowy I_r o charakterze czynnym, który można obliczyć z następującej zależności:

$$I_r = 9 \cdot U_f \cdot R_N \cdot (\omega \cdot C_0)^2 = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \frac{R_N}{X_N}$$

gdzie:

L_N i R_N – to odpowiednio indukcyjność i rezystancja dławika kompensacyjnego.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 24.

Susceptancja doziemna sieci o napięciu 15 kV wynosi 1539,6 μS . Obliczyć:

- zastępczą pojemność zerową sieci C_0 :

$$B_0 = \omega \cdot C_0 \Rightarrow C_0 = \frac{B_0}{\omega} = \frac{1539,6}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 4,9 \mu\text{F}$$

- wartość prądu zwarcia jednofazowego z ziemią I_{zC} :

$$I_{zC} = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_0 = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot B_0 = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 1539,6 \cdot 10^{-6} = 40 \text{ A}$$

- indukcyjność kompensującą L_N , zapewniającą dokładną kompensację tego prądu ziemnozwarciowego:

$$L_N = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-6}} = 0,689 \text{ H}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- Zakładając, że $\frac{R_N}{X_N} = 0,1$, określić prąd reszkowy:

$$I_r = 3 \cdot U_f \cdot \frac{C_0 \cdot R_N}{L_N} = 3 \cdot U_f \cdot C_0 \cdot \omega \cdot \frac{R_N}{X_N} = 3 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 4,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,1 = 4 \text{ A}$$

- Oszacuj wartość rezystancji rezystora uziemiającego R_N , umożliwiającego skuteczne tłumienie przepięć ziemnozwarciowych:

$$R_N \leq \frac{1}{3,6 \cdot \omega \cdot C_0} = \frac{1}{3,6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4,9 \cdot 10^{-6}} = 180,4 \text{ } \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 25.

W sieci o napięciu 15 kV (pracującej z izolowanym punktem neutralnym) zawierającej odcinki linii kablowych o długości 20 km i napowietrznych o długości 50 km powstało zwarcie jednofazowe fazy L1. Dla powyższych danych i założeń :

- oszacuj wartość prądu ziemnozwarciowego I_{zC} :

$$I_{zC} \approx U_N \cdot (0,1 \cdot l_k + 0,003 \cdot l_n) = 15 \cdot (0,1 \cdot 20 + 0,003 \cdot 50) = 32,25 \text{ A}$$

- wyznacz zastępczą pojemność zerową sieci C_0 :

$$I_{zC} = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C_0 \Rightarrow C_0 = \frac{I_{zC}}{3 \cdot U_f \cdot \omega} = \frac{32,25}{3 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,95 \mu\text{F}$$

- wyznacz indukcyjność kompensującą L_N , zapewniającą dokładną kompensację tego prądu ziemnozwarciowego

$$L_N = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 3,95 \cdot 10^{-6}} = 0,855 \text{ H}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zakładając, że $\frac{R_N}{X_N} = 0,1$, należy określić prąd resztkowy:

$$I_r = 3 \cdot U_f \cdot \frac{C_0 \cdot R_N}{L_N} = 3 \cdot U_f \cdot C_0 \cdot \omega \cdot \frac{R_N}{X_N} = 3 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 3,95 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,1 = 3,23 \text{ A}$$

Oszacuj wartość rezystancji rezystora uziemiającego R_N , umożliwiającego skuteczne tłumienie przepięć ziemnozwarciowych:

$$R_N \leq \frac{1}{3,6 \cdot \omega \cdot C_0} = \frac{1}{3,6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,95 \cdot 10^{-6}} = 223,96 \text{ } \Omega$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przerwy w fazach



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Do zakłóceń występujących w systemie elektroenergetycznym zalicza się także przerwy w obwodach fazowych, zwane także zakłóceniami podłużnymi. Zakłócenia tego typu zaburzające symetrię fazową mogą pojawić się w sieciach najwyższych napięć, w których wyłączniki posiadają indywidualne napędy na poszczególne fazy i dla których nastąpi (w wyniku awarii lub celowego działania) otwarcie tylko niektórych z nich (jednego lub dwóch). Takie wyłączniki stosuje się w sieciach najwyższych napięć.

Podstawy do analizy obliczeniowej to teoria składowych symetrycznych i dekompozycja sieci trójfazowej na trzy sieci składowe – zgodną, przeciwną i zerową. W celu odwzorowania przerwy należy w rozpatrywanej gałęzi wprowadzić dwa węzły. W dalszych rozważaniach węzły te oznaczono literami m , n . Schematy sieci trójfazowej i odpowiadającej jej sieci składowych symetrycznych pokazano na Rys. 140.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

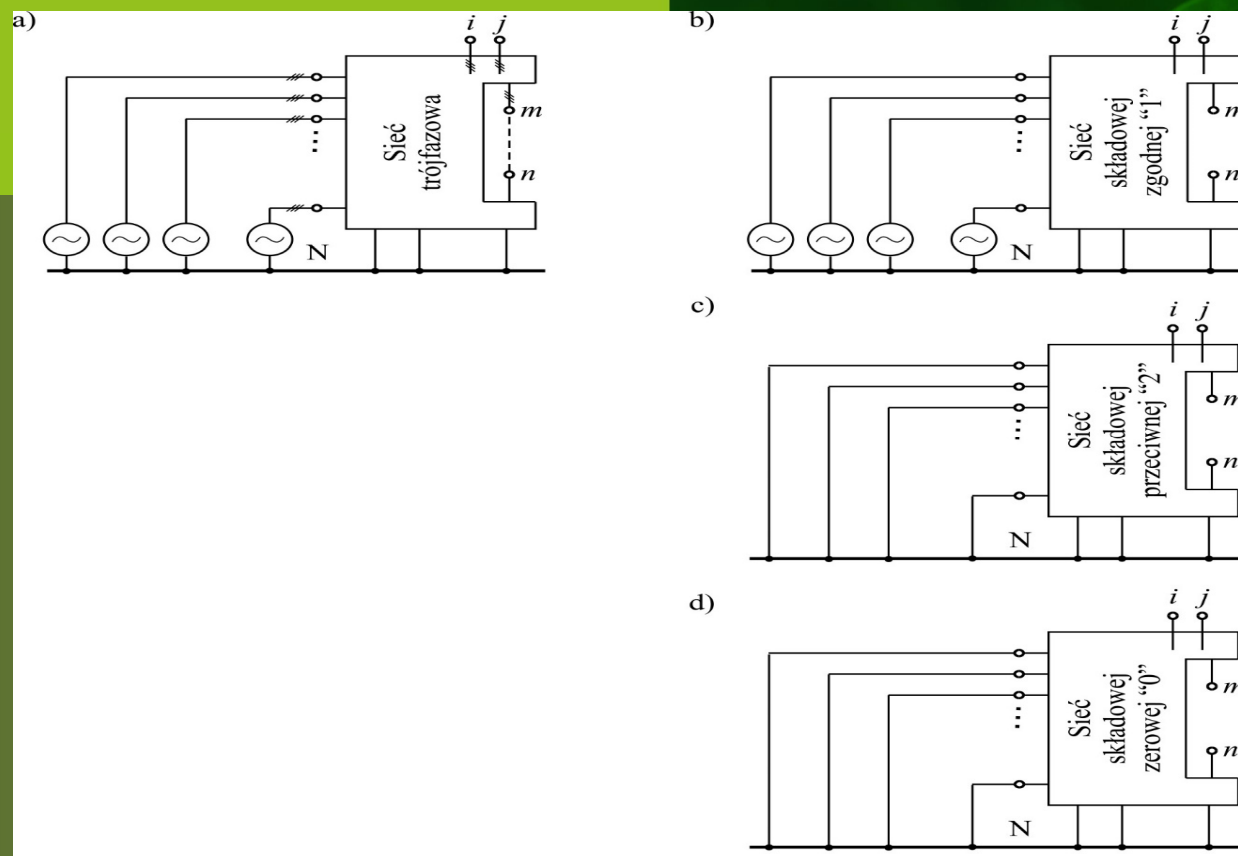


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 145. Zastępowanie sieci trójfazowej sieciami dla składowych symetrycznych z wydzieleniem pary węzłów m, n [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Ograniczanie prądów zwarcia



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

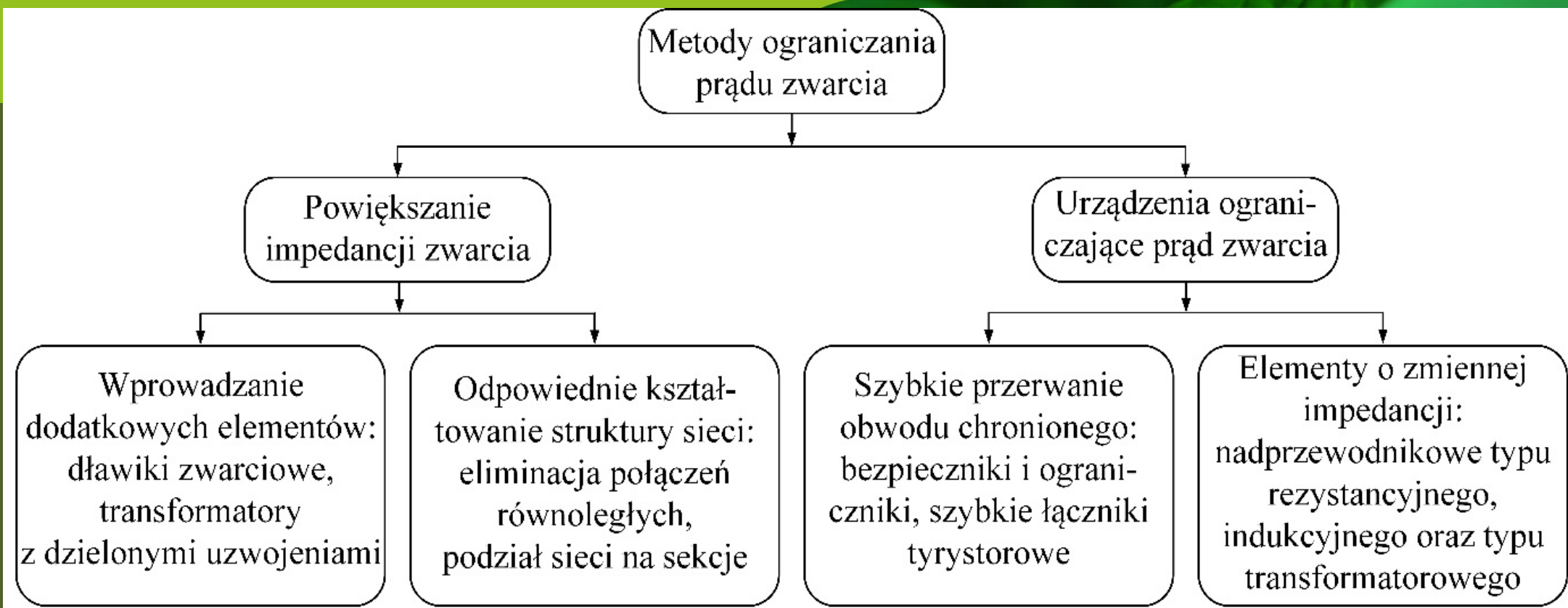
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Konieczność opanowania warunków zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych, na różnych poziomach napięcia, wynika ze wzrostu wartości prądu zwarcia z powodu takich jak np. coraz silniejsze powiązania między węzłami sieci przesyłowej, przyłączanie nowych źródeł wytwórczych. Wyróżnia się następujące metody ograniczania prądów zwarcia :

- **powiększanie impedancji zwarcia poprzez prowadzenie dodatkowych elementów (dławiki, transformatory z dzielonymi uzwojeniami) oraz odpowiednie kształtowanie struktury sieci (unikanie połączeń równoległych, sekcjonowanie sieci),**
- **stosowanie urządzeń ograniczających prąd zwarcia, które przerywają zwarty obwód w odpowiednio krótkim czasie (bezpieczniki, ograniczniki) lub urządzeń, których impedancja mająca w normalnych warunkach wartość prawie zerową, w stanie zwarcia silnie narasta, ograniczając wartość prądu (sprzęgła rezonansowe, ograniczniki nadprzewodnikowe).**



Rys 146. Metody ograniczania prądu zwarcia – podział [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

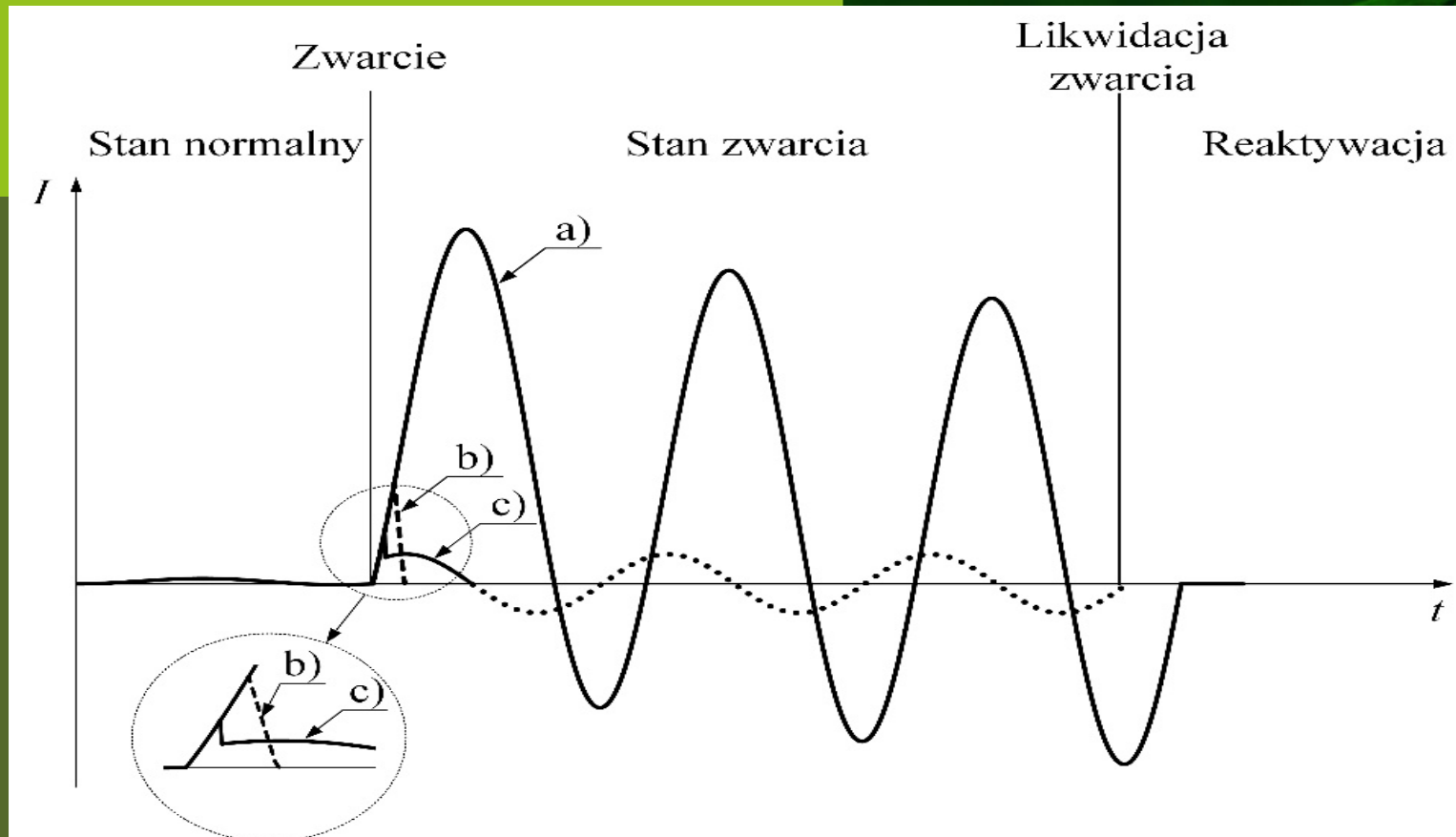


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 147. Przykładowy przebieg prądu zwarcia w obwodzie z zainstalowanym ogranicznikiem : a) bez ograniczania, b) przerwanie obwodu chronionego, c) ograniczanie prądu zwarcia [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

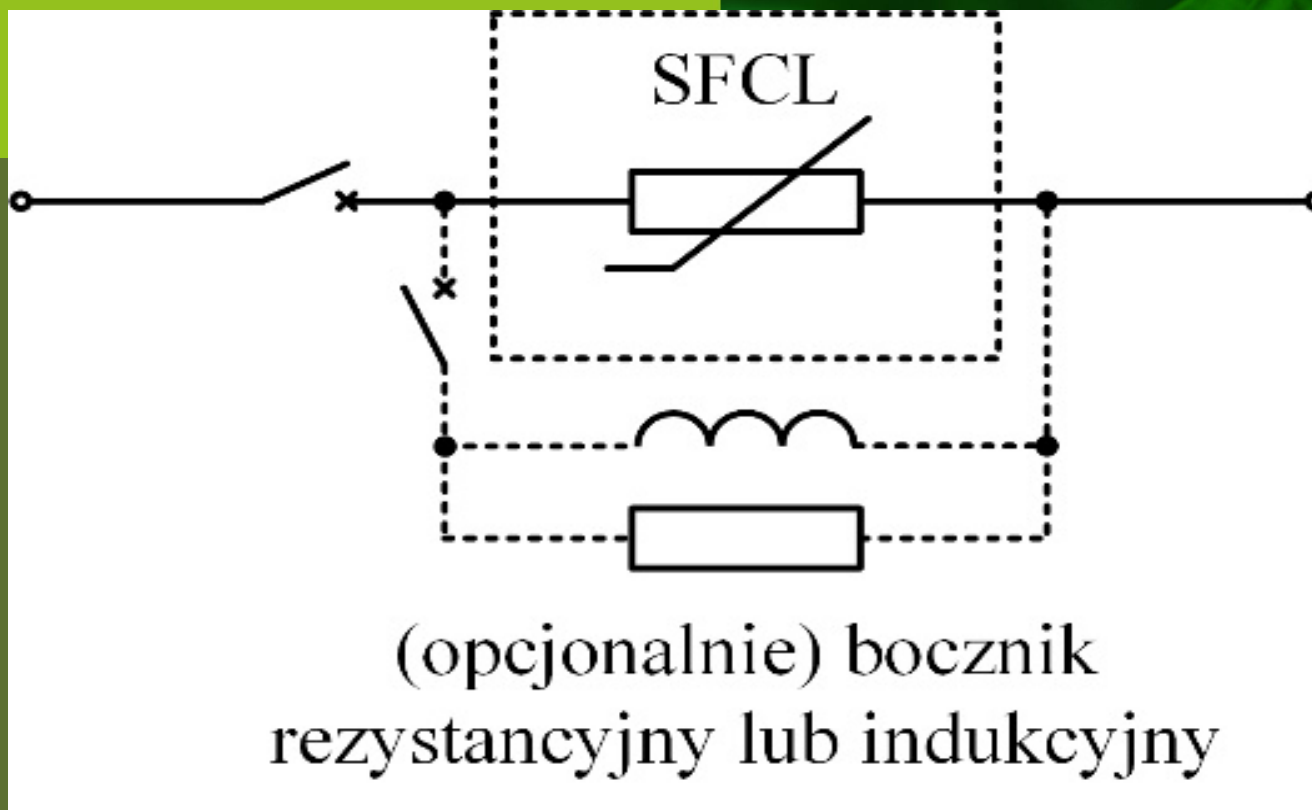


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 148. Schemat rezystancyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu
(*Superconducting Fault Current Limiter*) [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

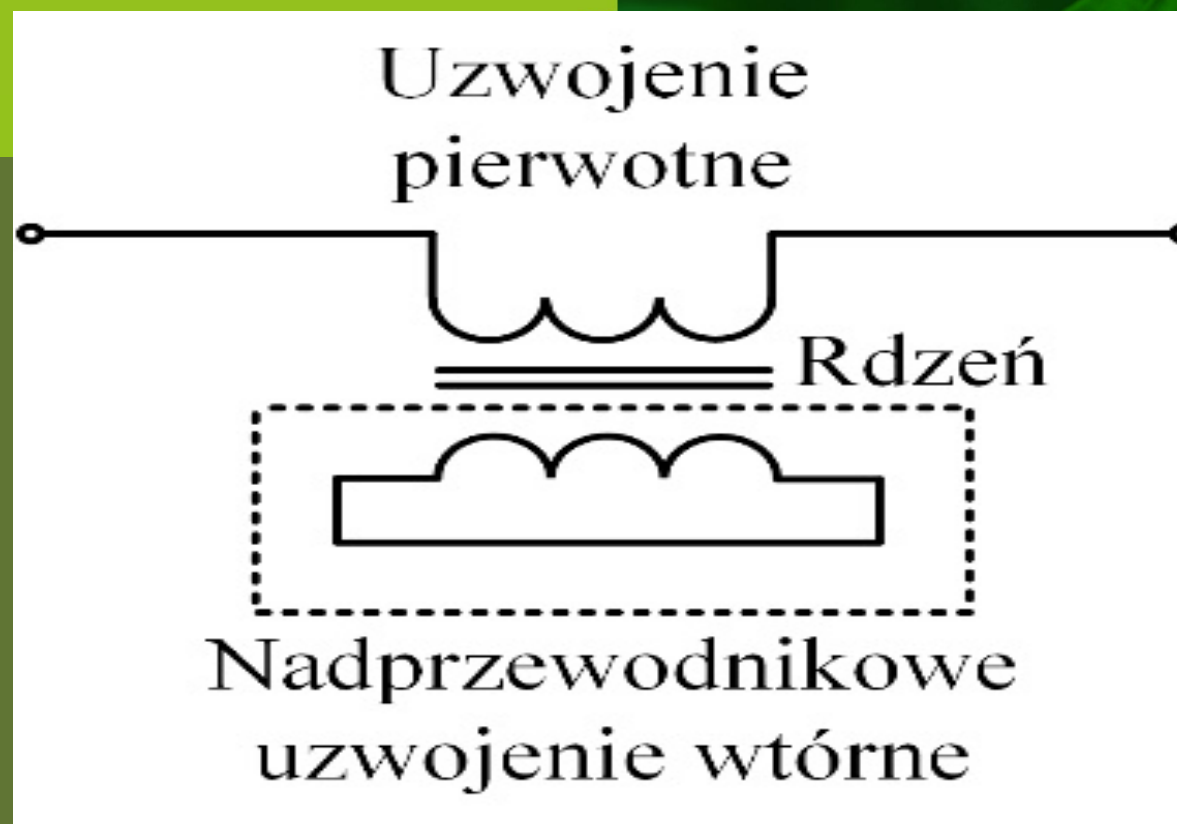


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 149. Schemat indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu [22]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Identyfikacja problemów związanych z przyłączaniem do sieci instalacji OZE



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Klasyfikacja podmiotów przyłączanych

I grupa - podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane bezpośrednio do sieci o napięciu znamionowym wyższym niż 110 kV;

II grupa - podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane bezpośrednio do sieci o napięciu znamionowym 110 kV;

III grupa - podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane bezpośrednio do sieci o napięciu znamionowym wyższym niż 1 kV, lecz niższym niż 110 kV;

IV grupa - podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane bezpośrednio do sieci o napięciu znamionowym nie wyższym niż 1 kV oraz mocy przyłączeniowej większej niż 40 kW lub prądzie znamionowym zabezpieczenia przedlicznikowego w torze prądowym większym niż 63A;

V grupa - podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane bezpośrednio do sieci o napięciu znamionowym nie wyższym niż 1 kV oraz mocy przyłączeniowej nie większej niż 40 kW i prądzie znamionowym zabezpieczenia przedlicznikowego nie większym niż 63A;

VI grupa - podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane do sieci poprzez tymczasowe przyłącze, które będzie, na zasadach określonych w umowie, zastąpione przyłączem docelowym, lub podmioty, których urządzenia, instalacje i sieci są przyłączane do sieci na czas określony, lecz nie dłuższy niż rok.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

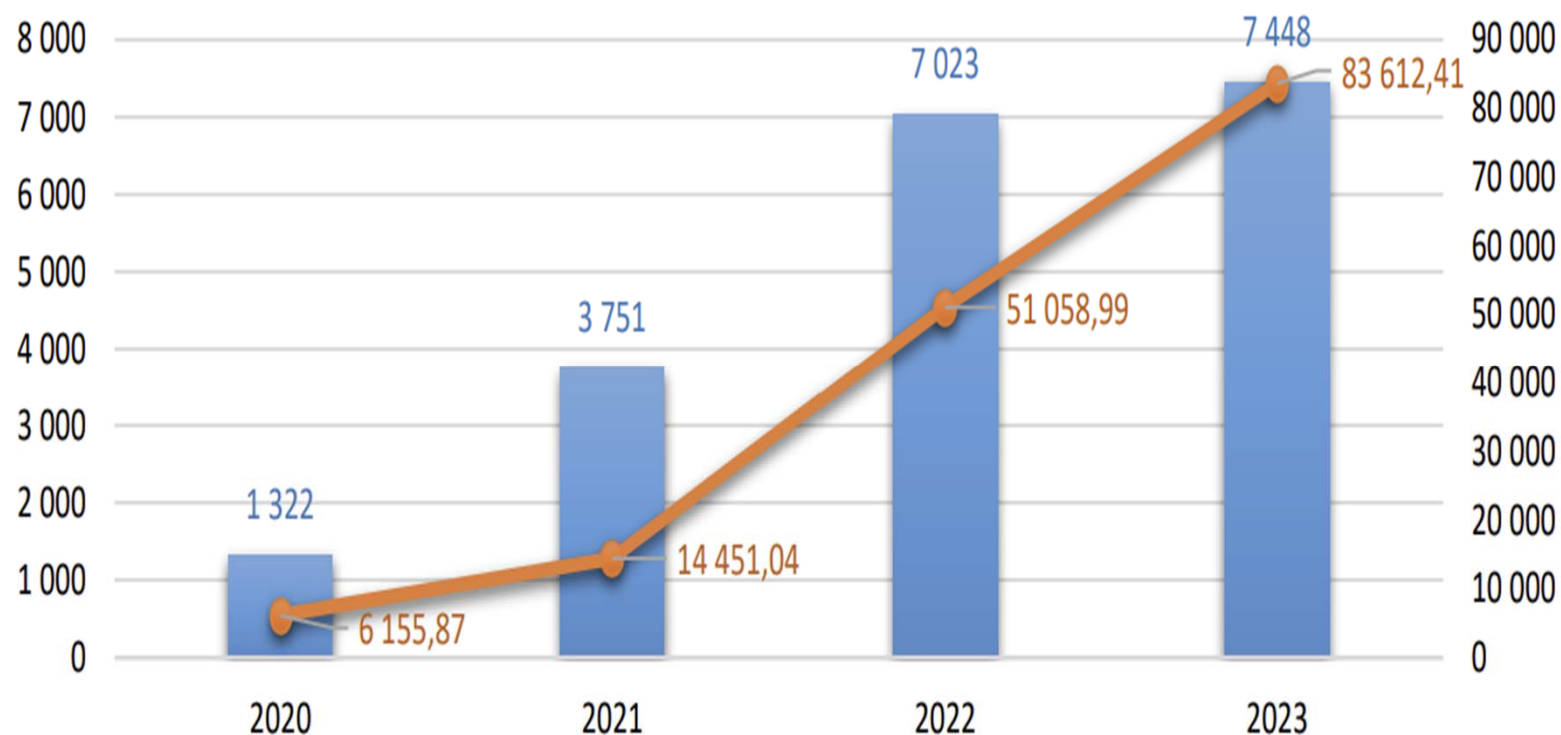


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 150. Zestawienie liczby odmów wydania warunków przyłączenia do sieci dla instalacji wytwórczych wraz z ich mocą, lata 2020 – 2023 według danych URE



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

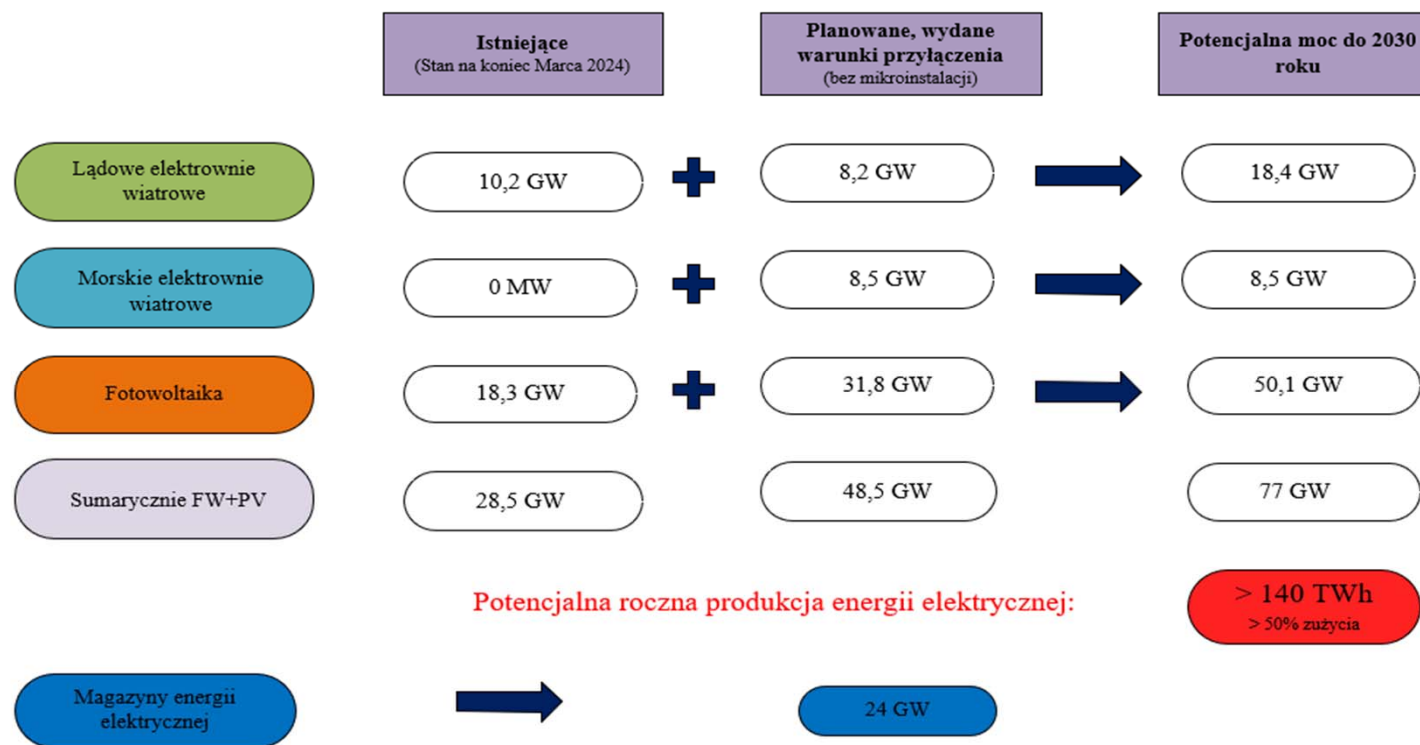


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 151. Zestawienie informacji o wydanych warunkach przyłączenia instalacji OZE wraz z danymi o obiektach istniejących według danych PSE



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Ograniczenia sieciowe



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

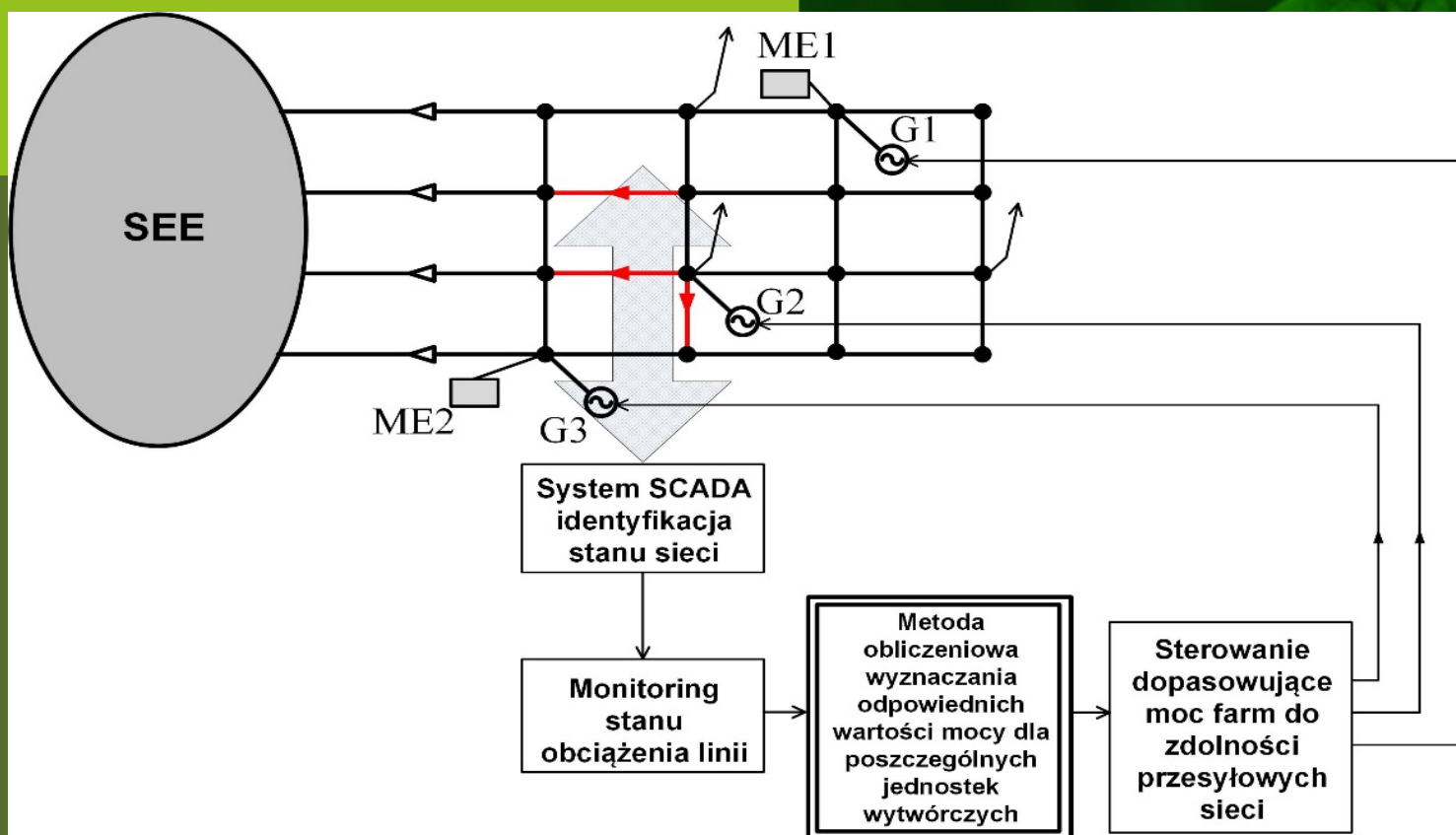


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 152. Sieć 110 kV z możliwością dynamicznego dopasowania generacji źródeł do możliwości przesyłowych linii



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



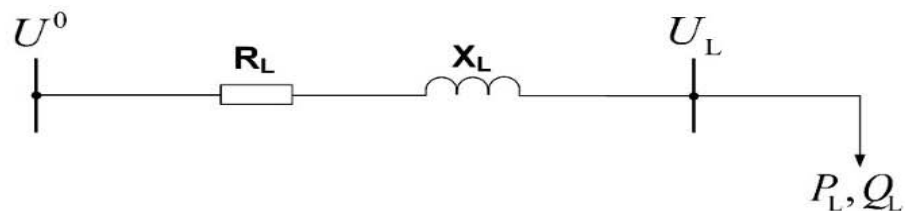
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



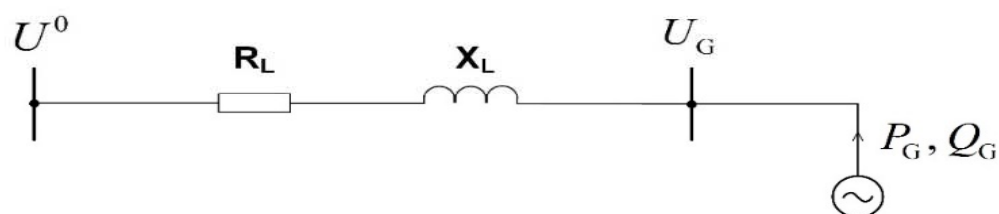
NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

a)



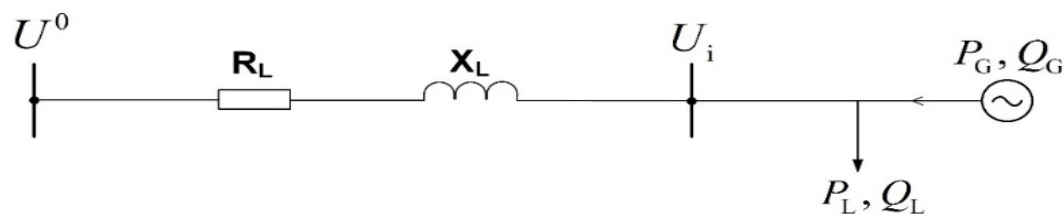
$$\Delta U_L = \frac{P_L}{U_{nn}} R_L + \frac{Q_L}{U_{nn}} X_L$$

b)



$$\Delta U_G = \frac{P_G}{U_{nn}} R_L + \frac{Q_G}{U_{nn}} X_L$$

c)



$$\Delta U = \frac{(P_L - P_G)}{U_{nn}} R_L + \frac{(Q_L - Q_G)}{U_{nn}} X_L$$

Rys 153. Linia promieniowa – z obciążeniem, z generacją oraz z obciążeniem i generacją



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

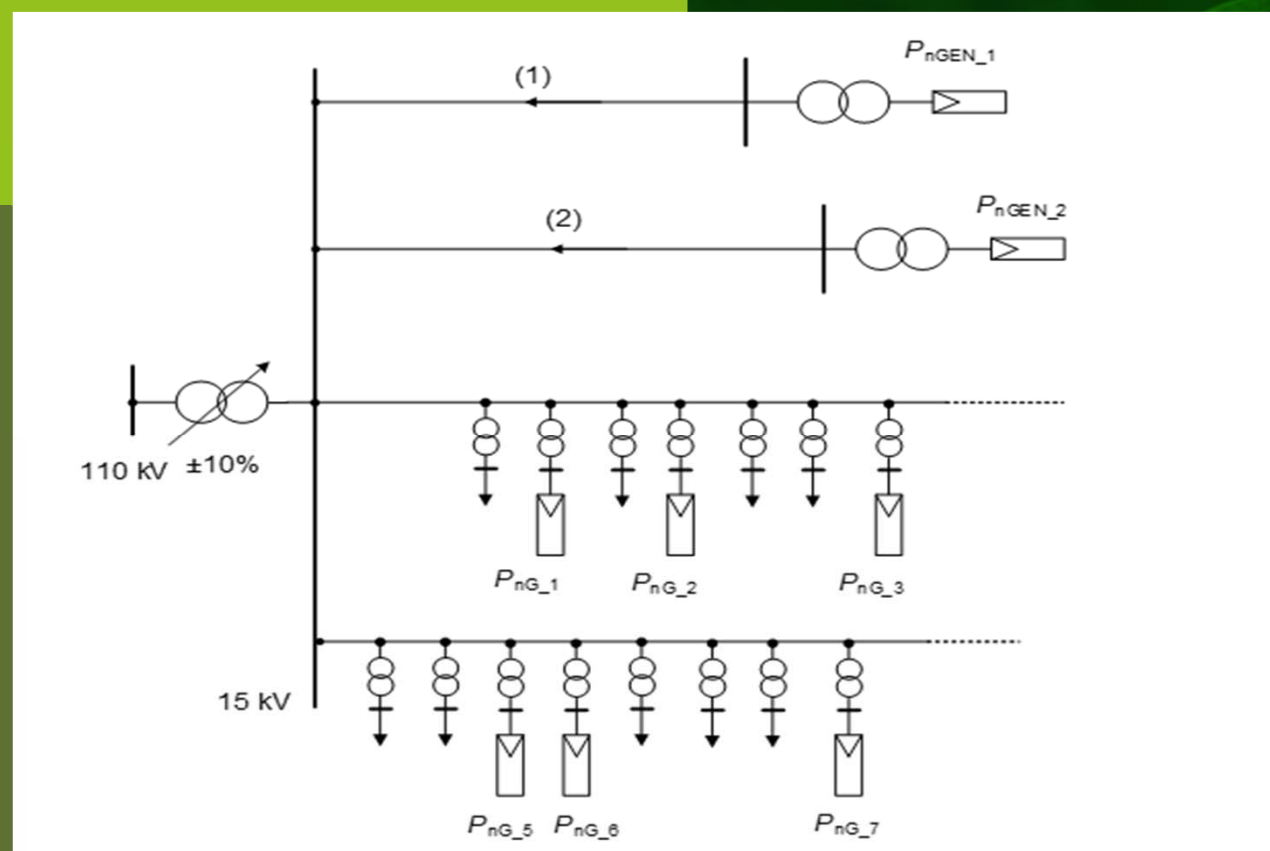


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 154. Możliwości przyłączenia instalacji OZE do sieci SN – bezpośrednio do szyn SN w GPZ za pośrednictwem linii abonenckich oraz do istniejących linii SN



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

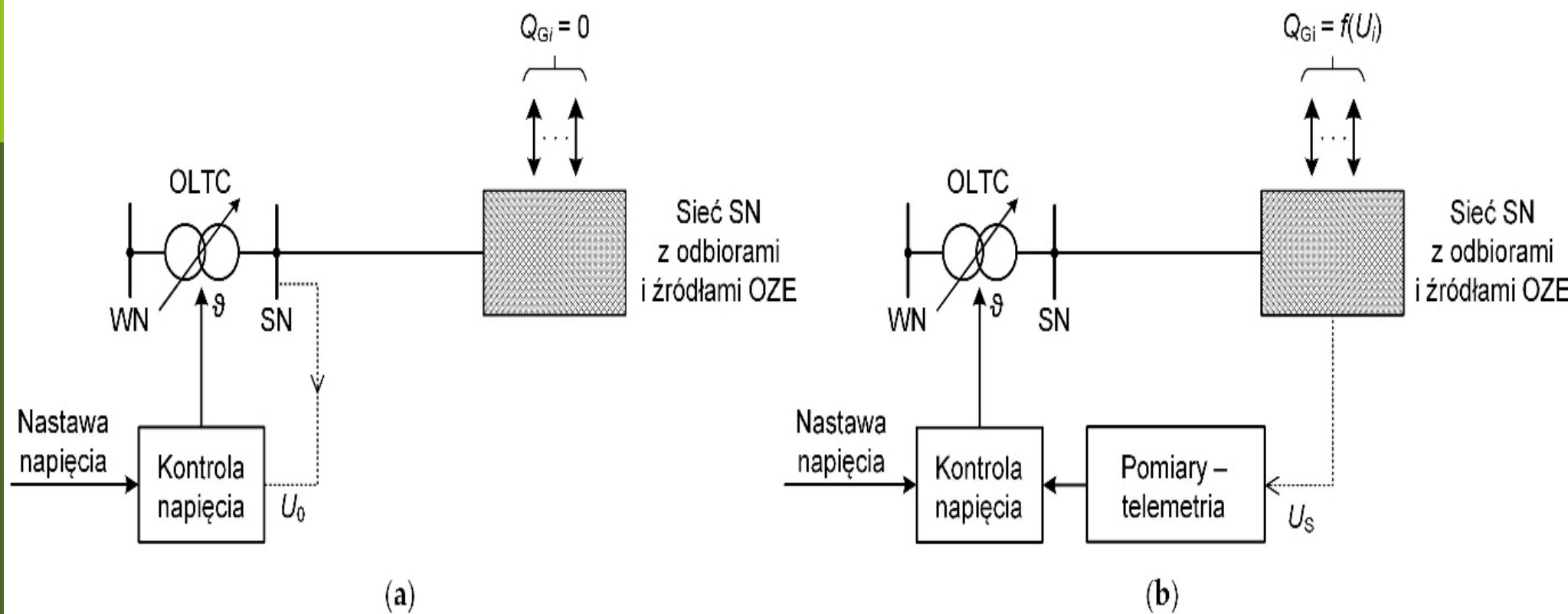


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 155. Generacja rozproszona w sieci SN, a) pasywna rola źródeł OZE, b) aktywna współpraca źródeł OZE z transformatorem 110/SN z regulacją podobciążeniową przekładni



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

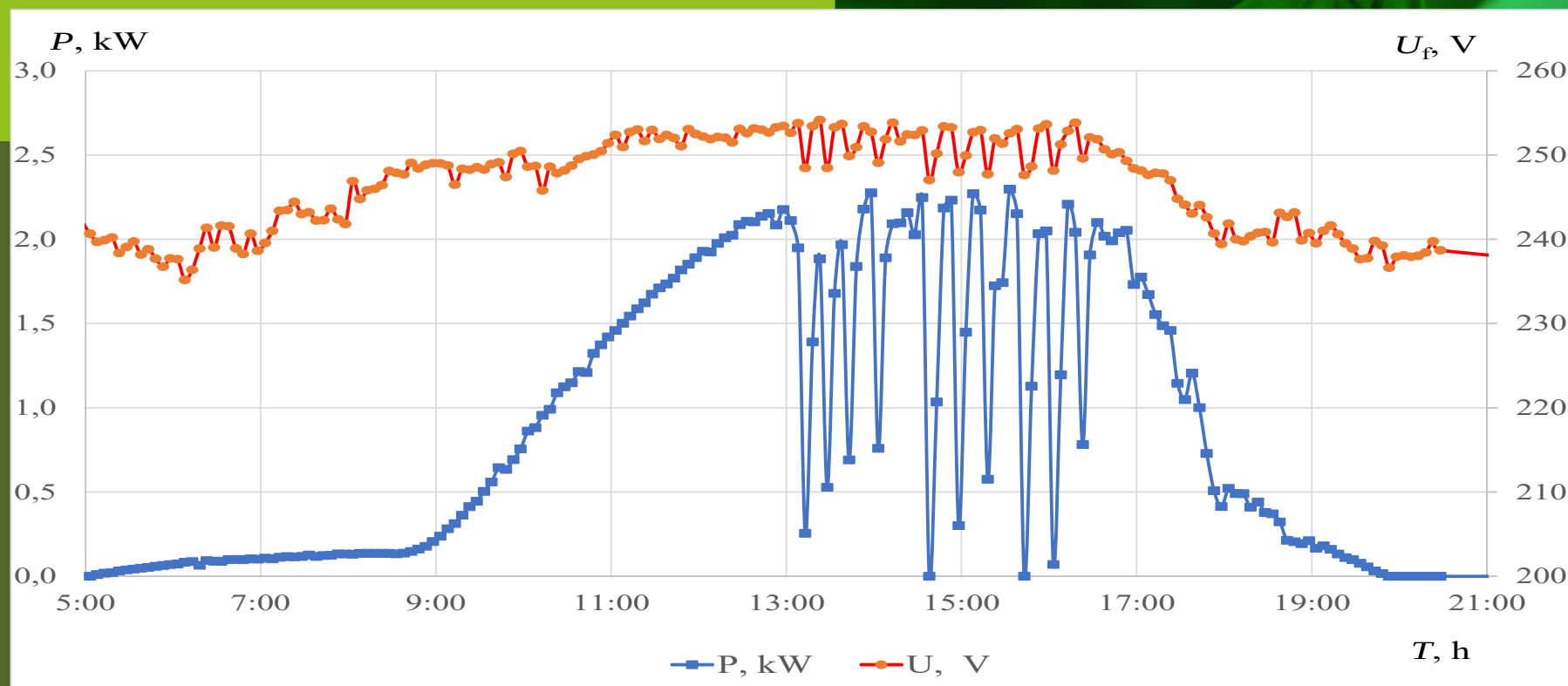


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 156. Przebieg wartości napięcia i mocy wyjściowej dla instalacji prosumenckiej w warunkach przekraczania dopuszczalnej wartości napięcia fazowego o 10% (powyżej 253 V)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

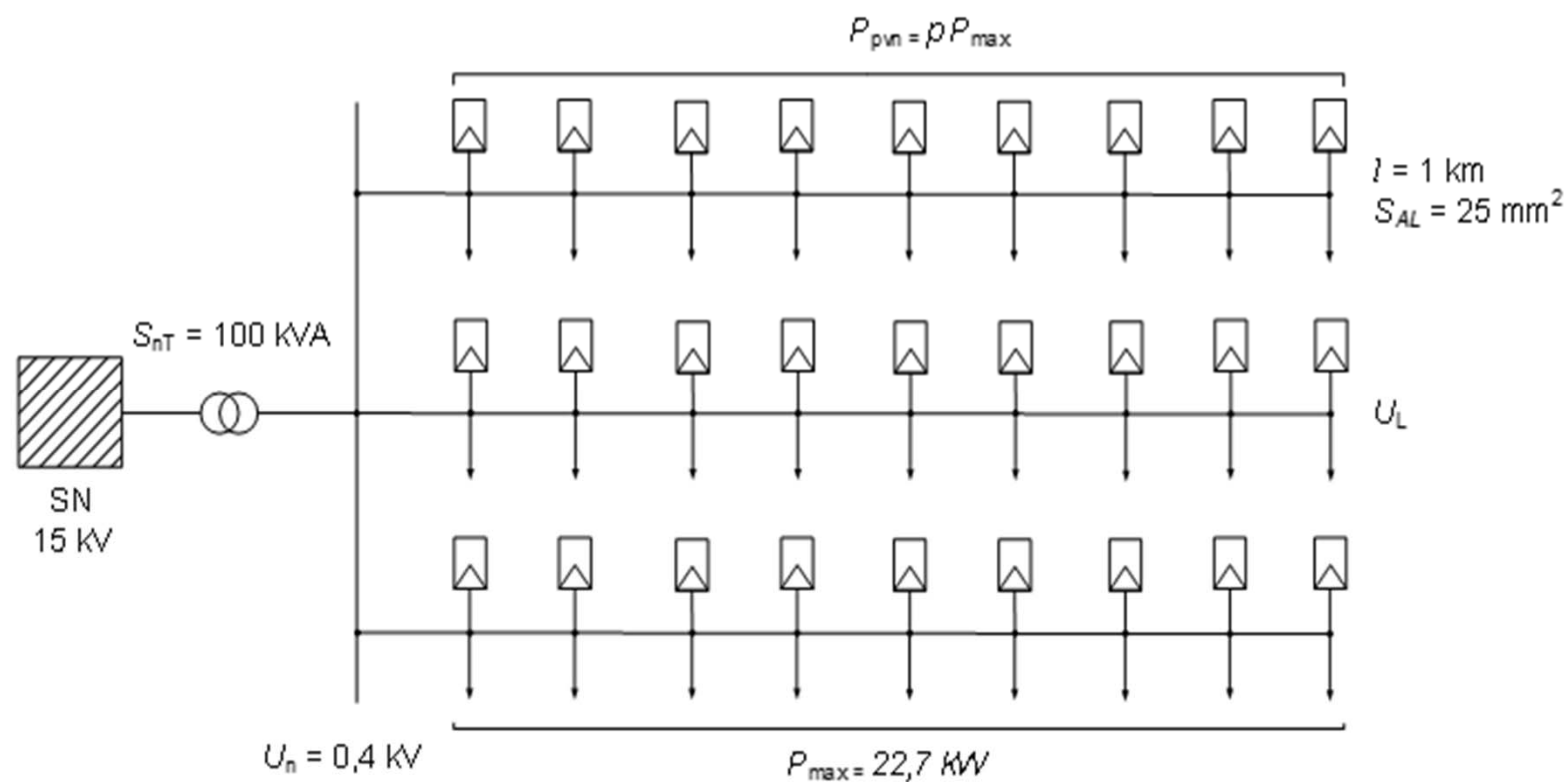


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 157. Schemat referencyjnej sieci niskiego napięcia z równomiernie rozłożonym odbiorem i generacją PV



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

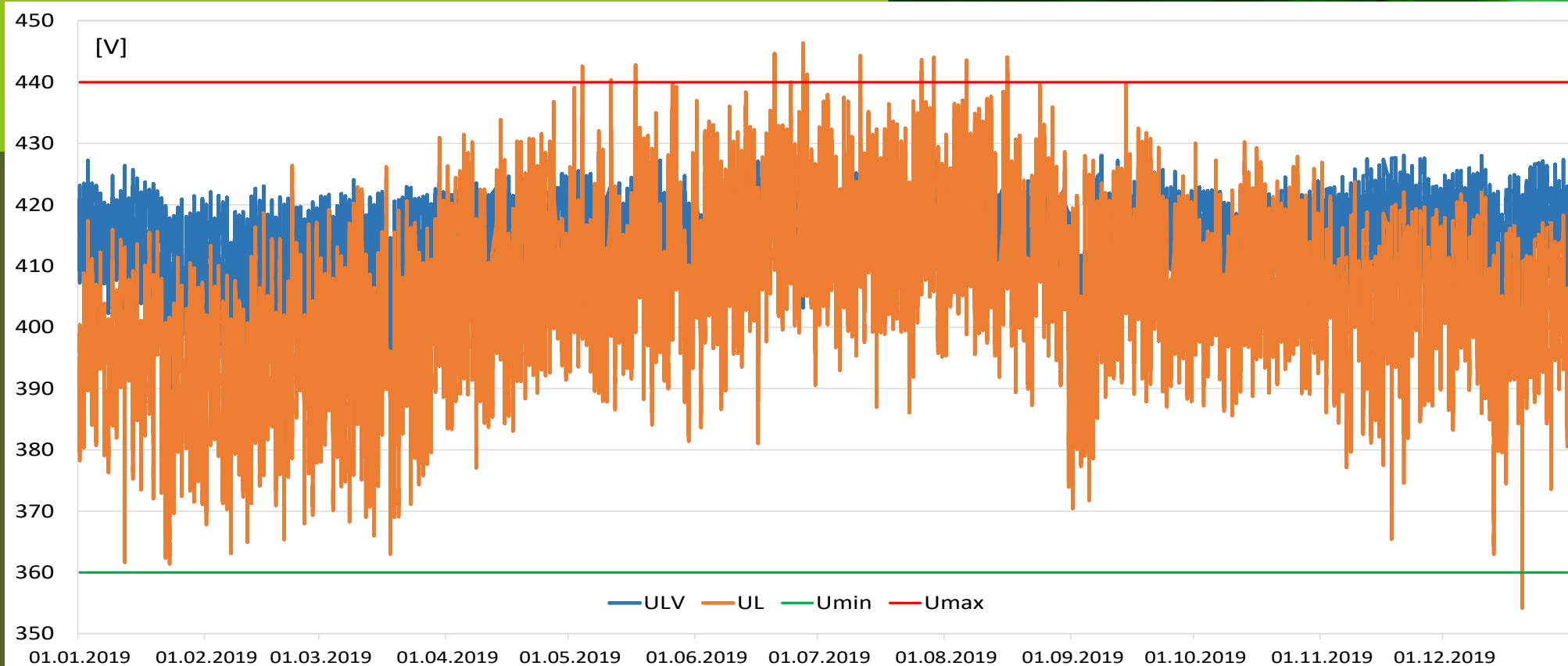


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 158. Napięcie na końcu obwodu sieci referencyjnej - bez udziału fotowoltaiki (kolor niebieski), z fotowoltaiką przy założeniu $p=1$ ($P_{PVn}=P_{max}$)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

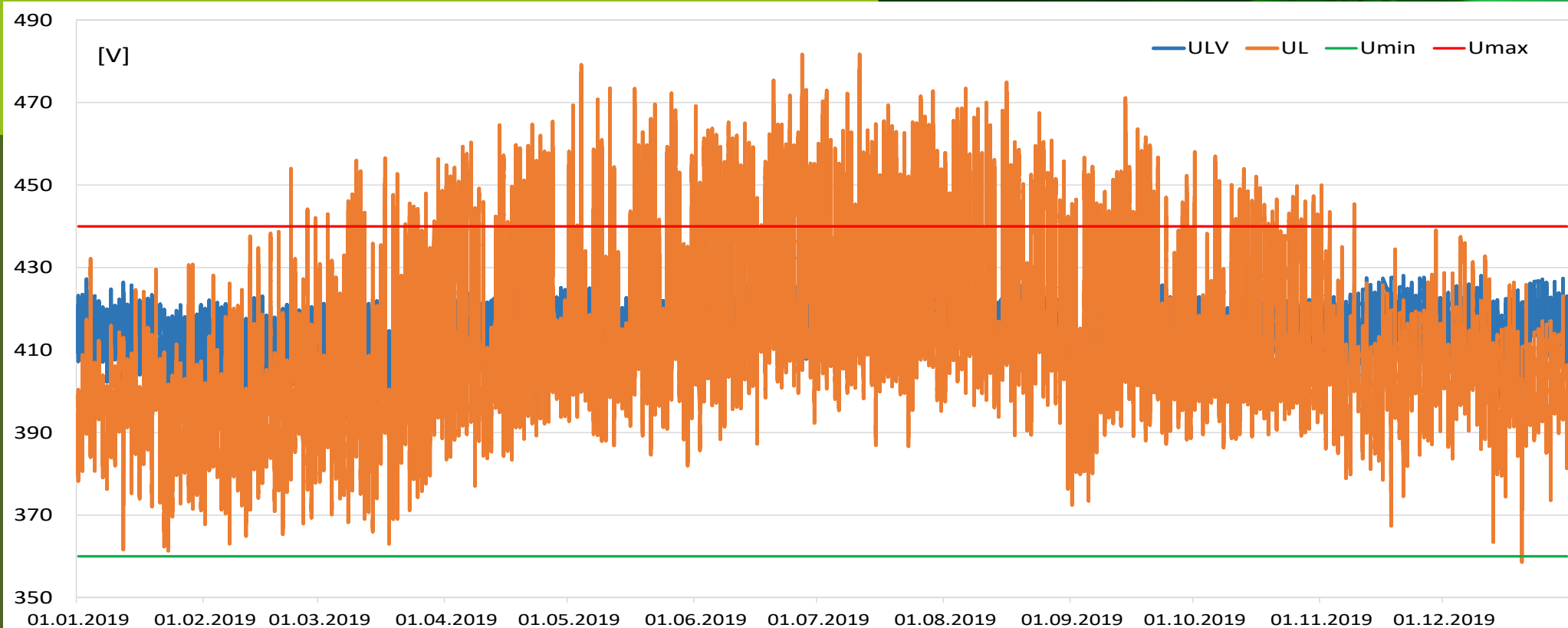


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 159. Napięcie na końcu obwodu sieci referencyjnej - bez udziału fotowoltaiki (kolor niebieski), z fotowoltaiką, przy założeniu $p=2$ ($P_{PVn}=P_{max}$)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

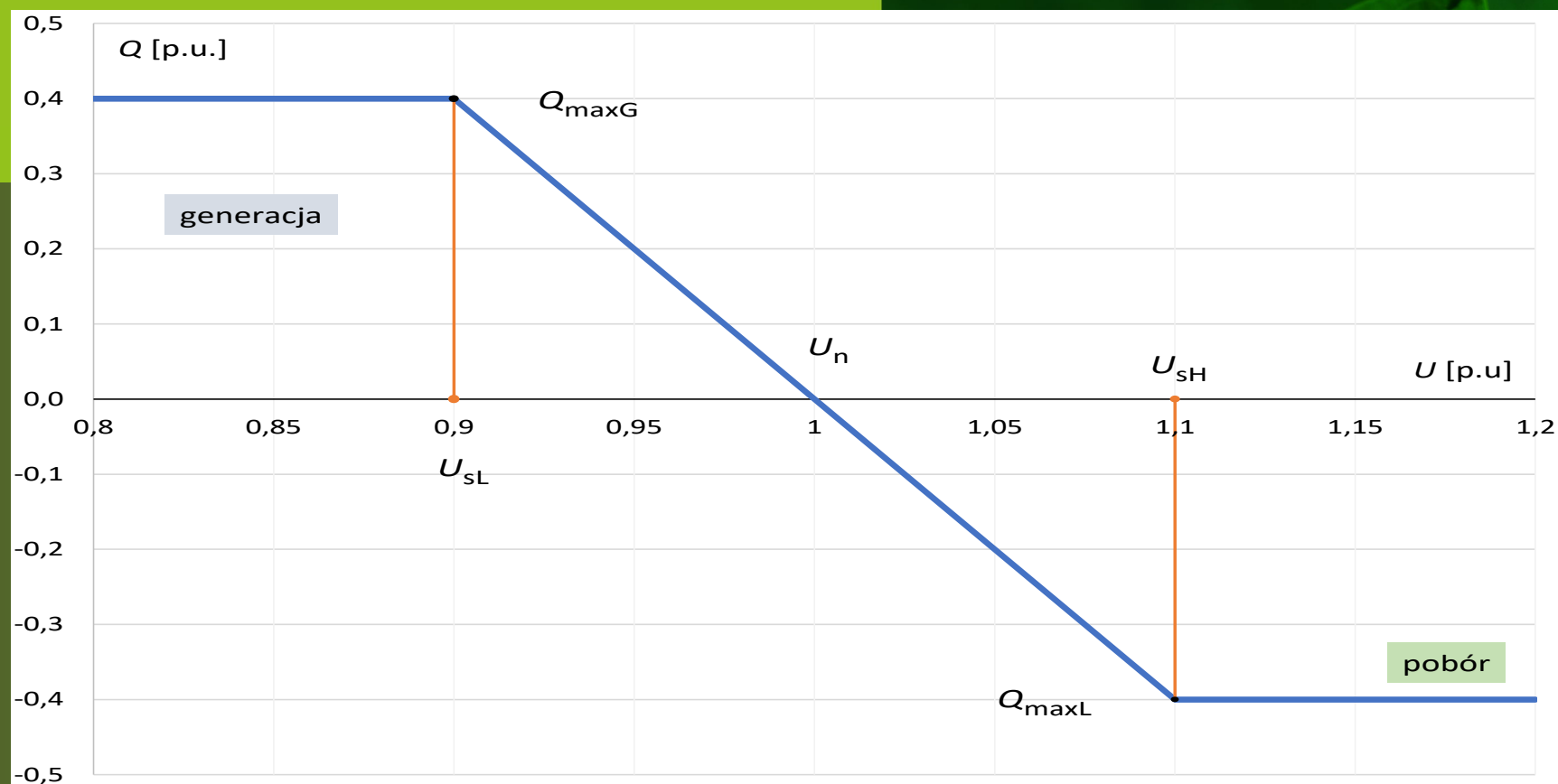


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 160. Charakterystyka układu regulacji mocy biernej inwertera instalacji PV w zależności od wartości napięcia wyjściowego (pominięto strefę martwą wokół punktu $U_n = 1$)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

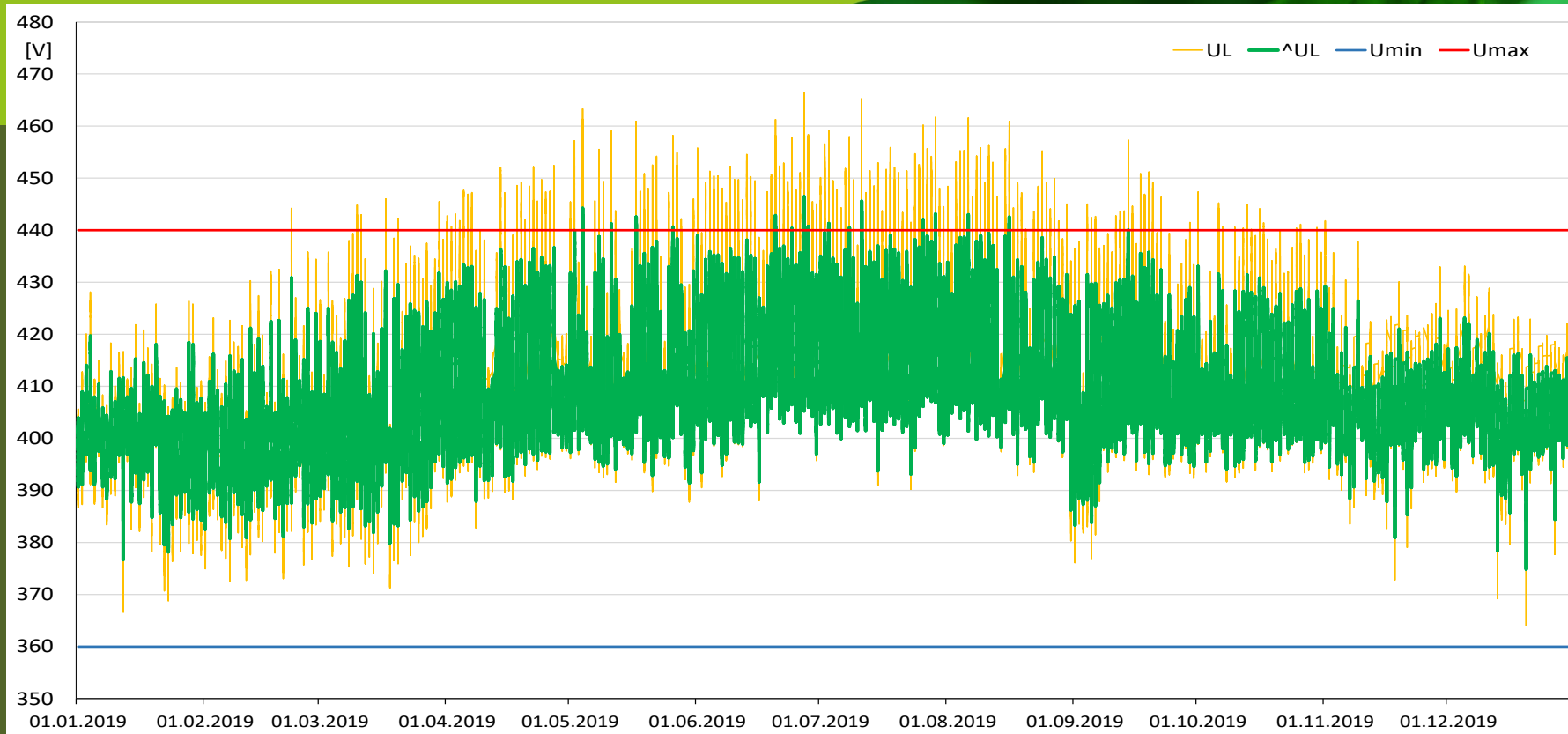


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 161. Efekt regulacji mocy biernej według charakterystyki $Q(U)$, przy ograniczaniu odbioru mocy biernej do $0,4 P_{PVn}$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Problemy bilansowania SEE z dużym udziałem generacji odnawialnej



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

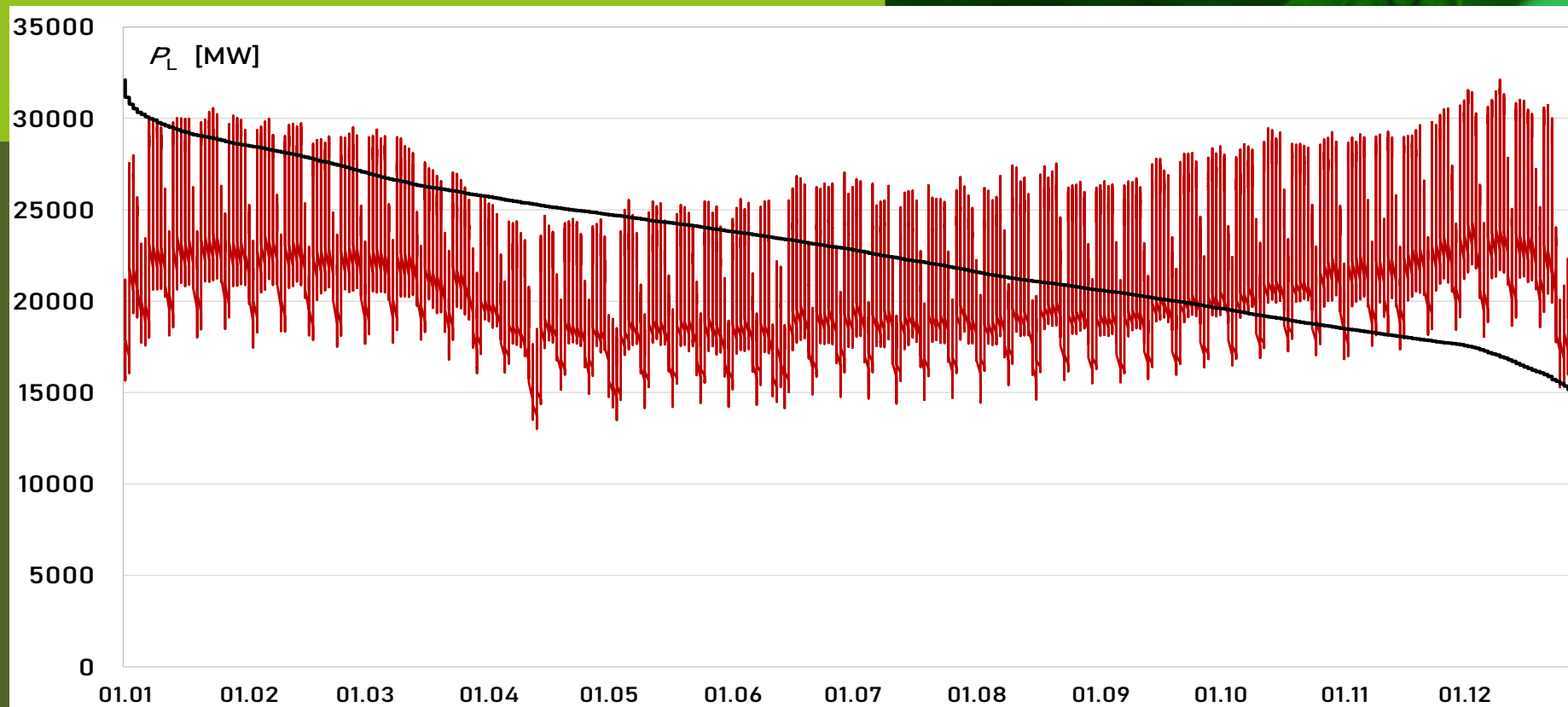


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 162. Zmienność zapotrzebowania na moc dla prognozowanego rocznego zużycia energii wynoszącego 200 TWh



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

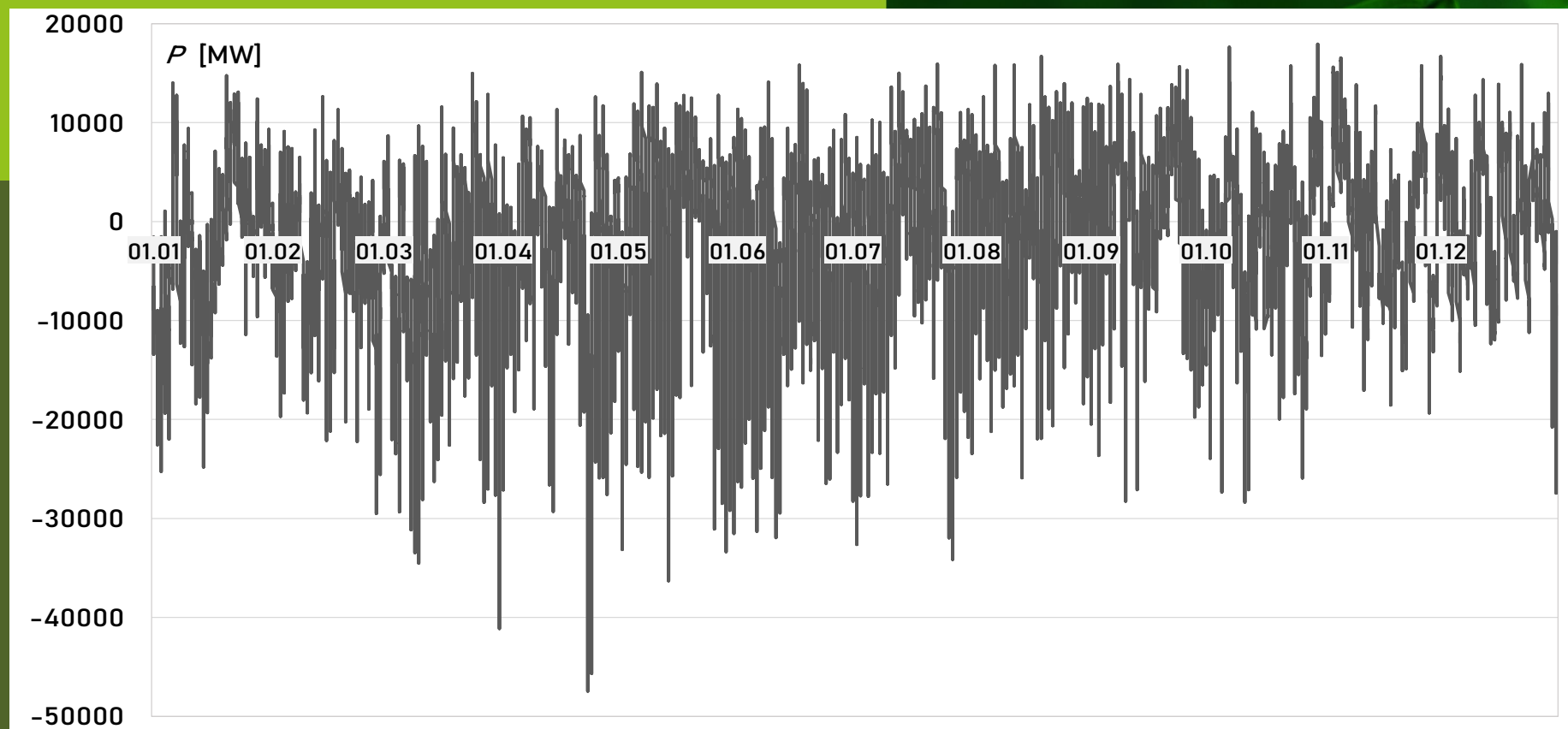


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 163. Roczny przebieg mocy niezbilansowania $P_{NB}(t)$ w rozpatrywanym systemie elektroenergetycznym (nad osią czasu deficyt mocy, pod osią nadmiar, prowadzący do konieczności ograniczania generacji)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

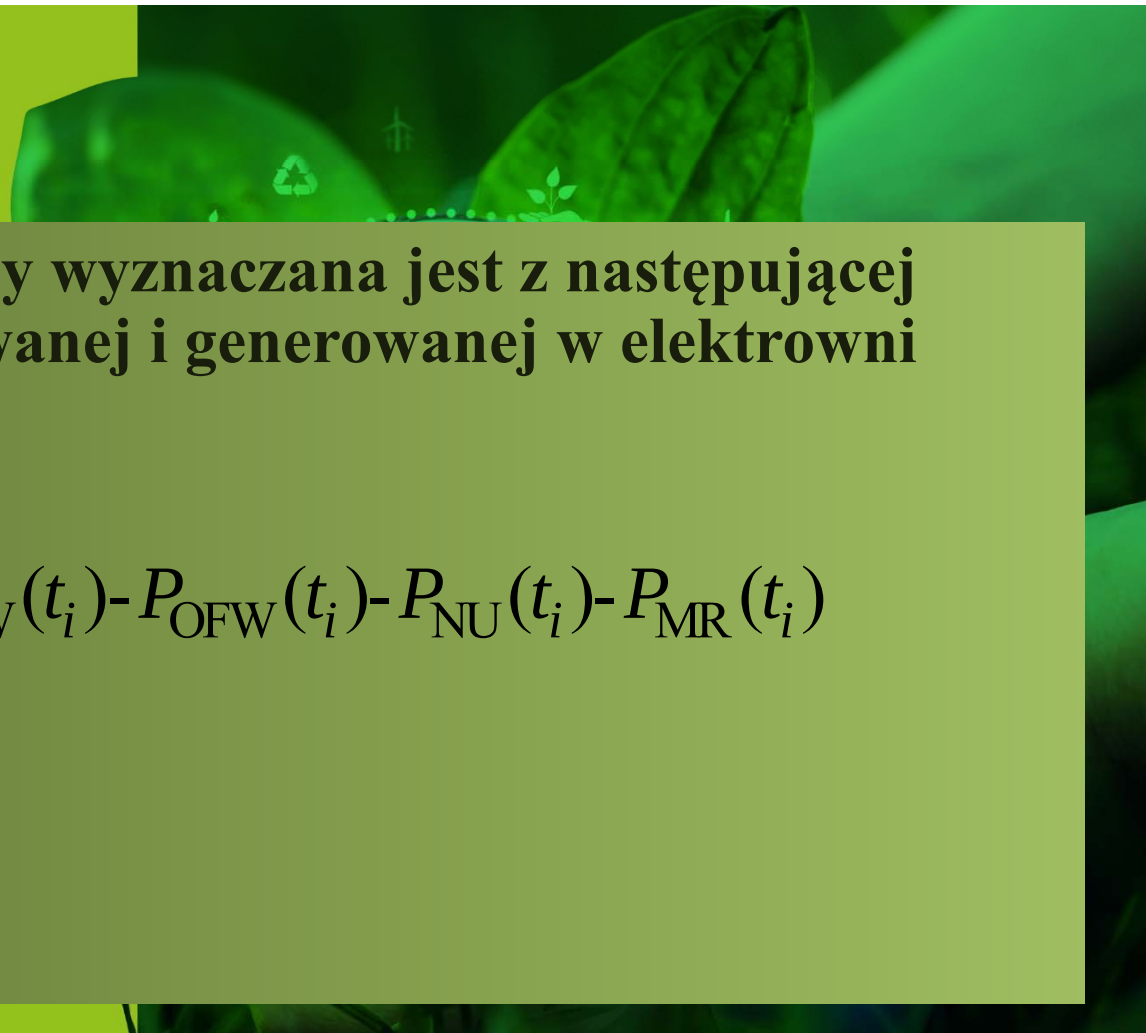


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Moc niezbilansowania dla i -tej godziny wyznaczana jest z następującej zależności (wartości mocy magazynowanej i generowanej w elektrowni jądrowej są wyzerowane):

$$P_{NB}(t_i) = P_L(t_i) - P_{PV}(t_i) - P_{ONW}(t_i) - P_{OFW}(t_i) - P_{NU}(t_i) - P_{MR}(t_i)$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

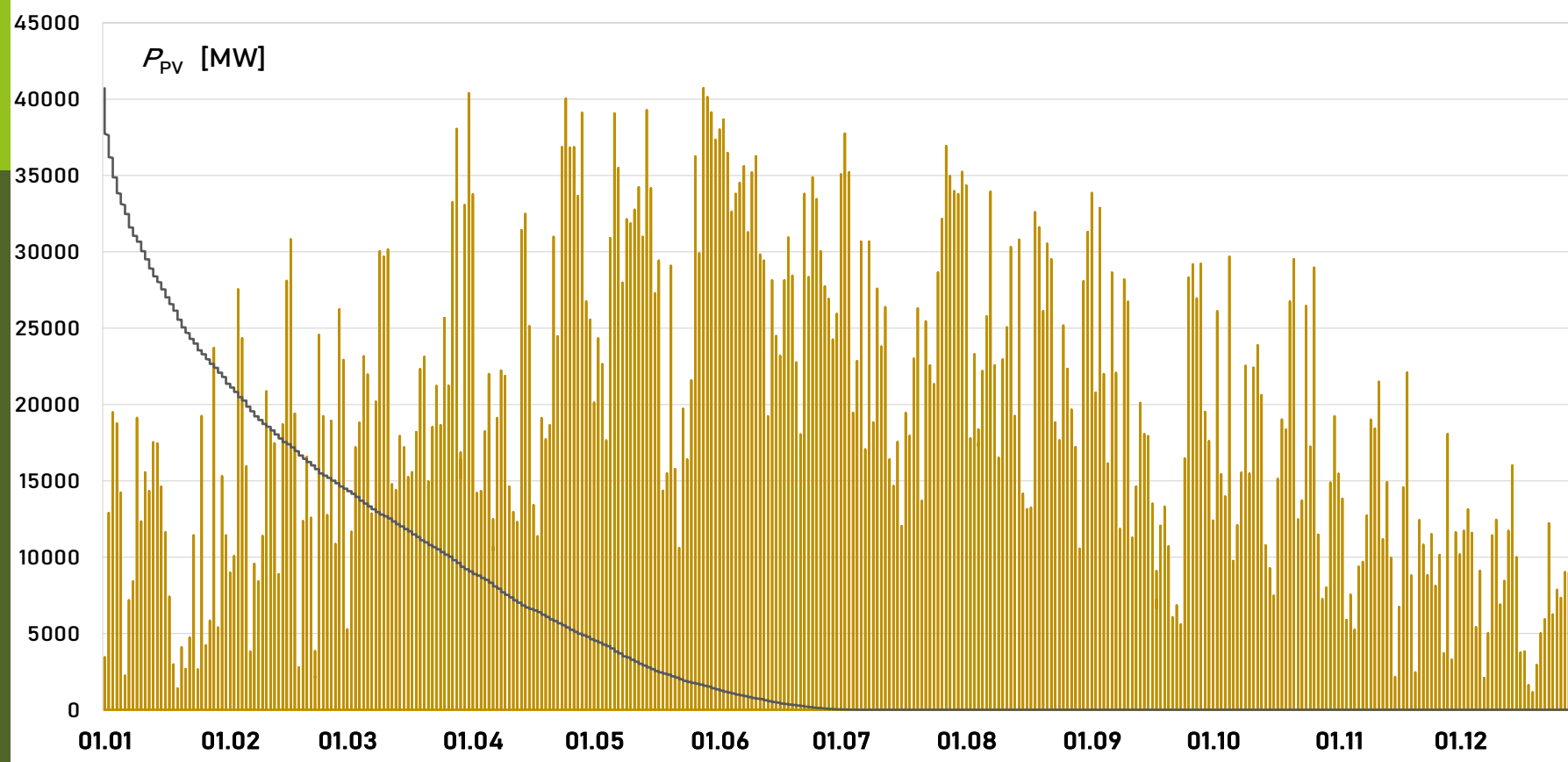


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 164. Zmienność generacji farm fotowoltaicznych w Polsce, prognozowana moc zainstalowana 45 GW



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

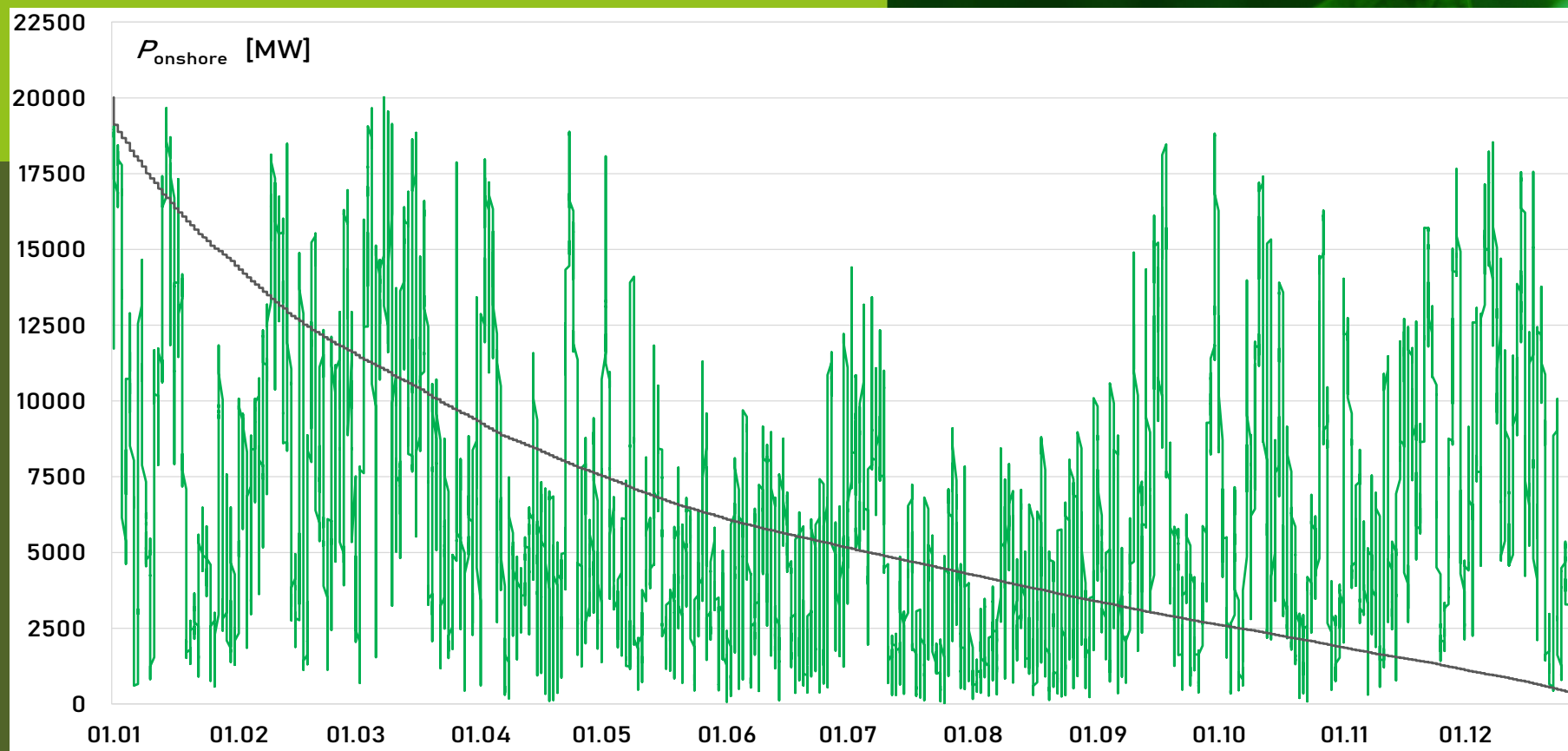


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 165. Zmienność generacji farm wiatrowych w Polsce na lądzie, prognozowana
moc zainstalowana 20 GW



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

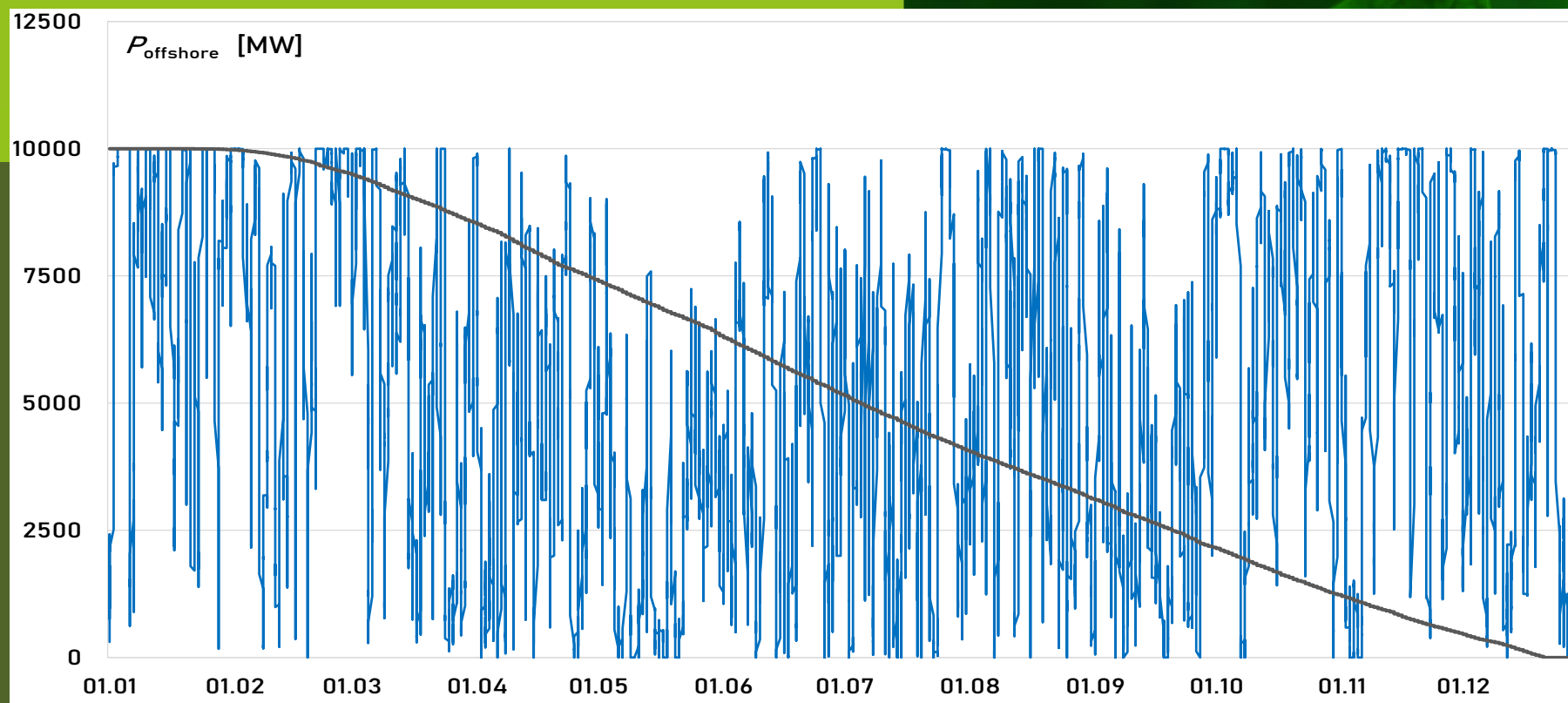


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 166. Zmienność generacji farm wiatrowych planowanych na Bałtyku, prognozowana moc zainstalowana 10 GW



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

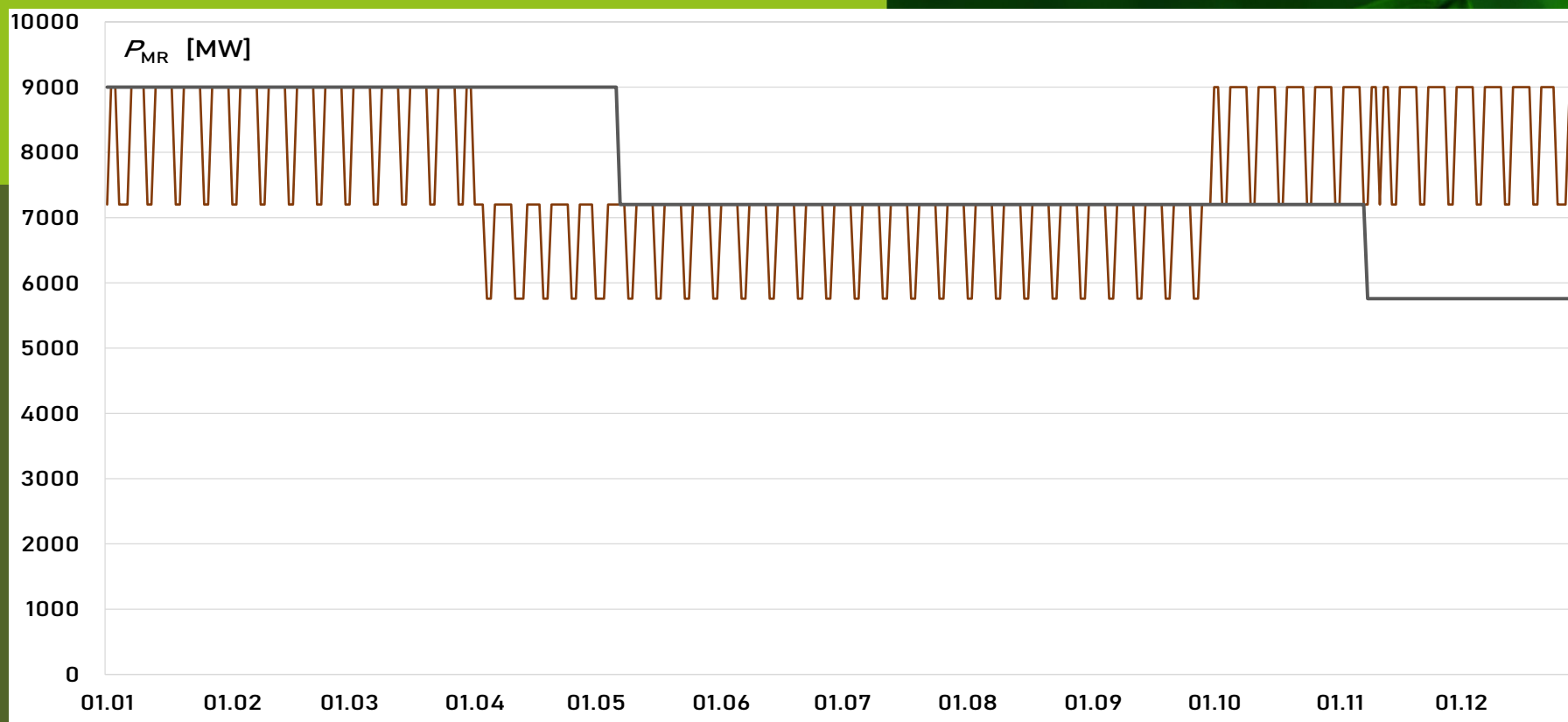


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 167. Szacowana zmienność generacji wymuszonej jednostek konwencjonalnych, maksymalnie 9 GW (mniejsze wartości podczas okresu letniego i podczas weekendów); MR oznacza *must run*



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 168. Uporządkowany wykres zapotrzebowania systemu (kolor czerwony) wraz z obszarami niedoboru mocy (powyżej osi - 22,1 TWh) oraz generacją nadmiarową (poniżej osi poziomej - 40 TWh) – kolor czarny; założenia: generacja PV 45 GW, generacja wiatrowa na lądzie 20 GW, generacja wiatrowa na morzu 10 GW, wymuszona generacja konwencjonalna 9 GW, zapotrzebowanie roczne 200 TWh



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

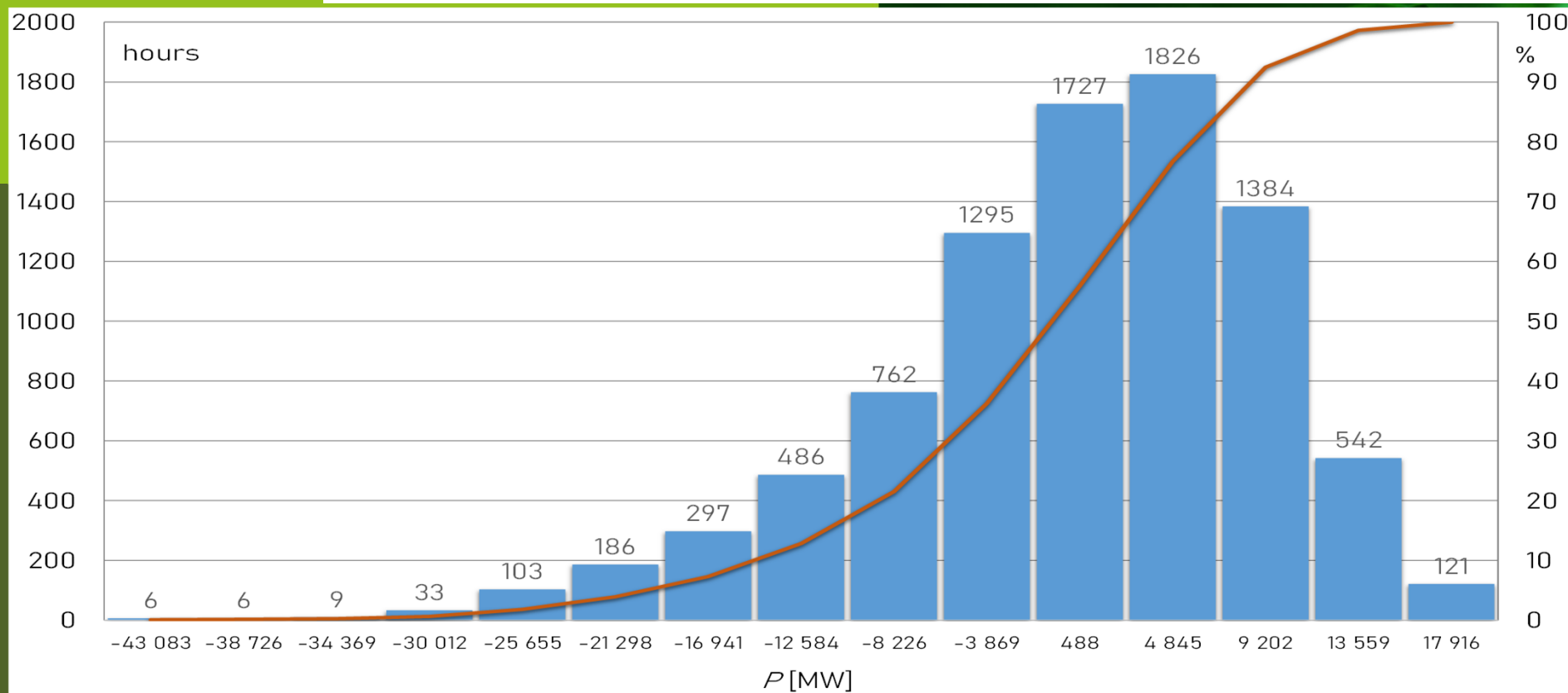


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 169. Histogram niedoborów (wartości dodatnie) i nadmiarów (wartości ujemne); założenia: generacja fotowoltaiczna 45 GW, zapotrzebowanie roczne 200 TWh; generacja wiatrowa na lądzie 20 GW, generacja wiatrowa na morzu 10 GW, wymuszona generacja konwencjonalna 9 GW



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

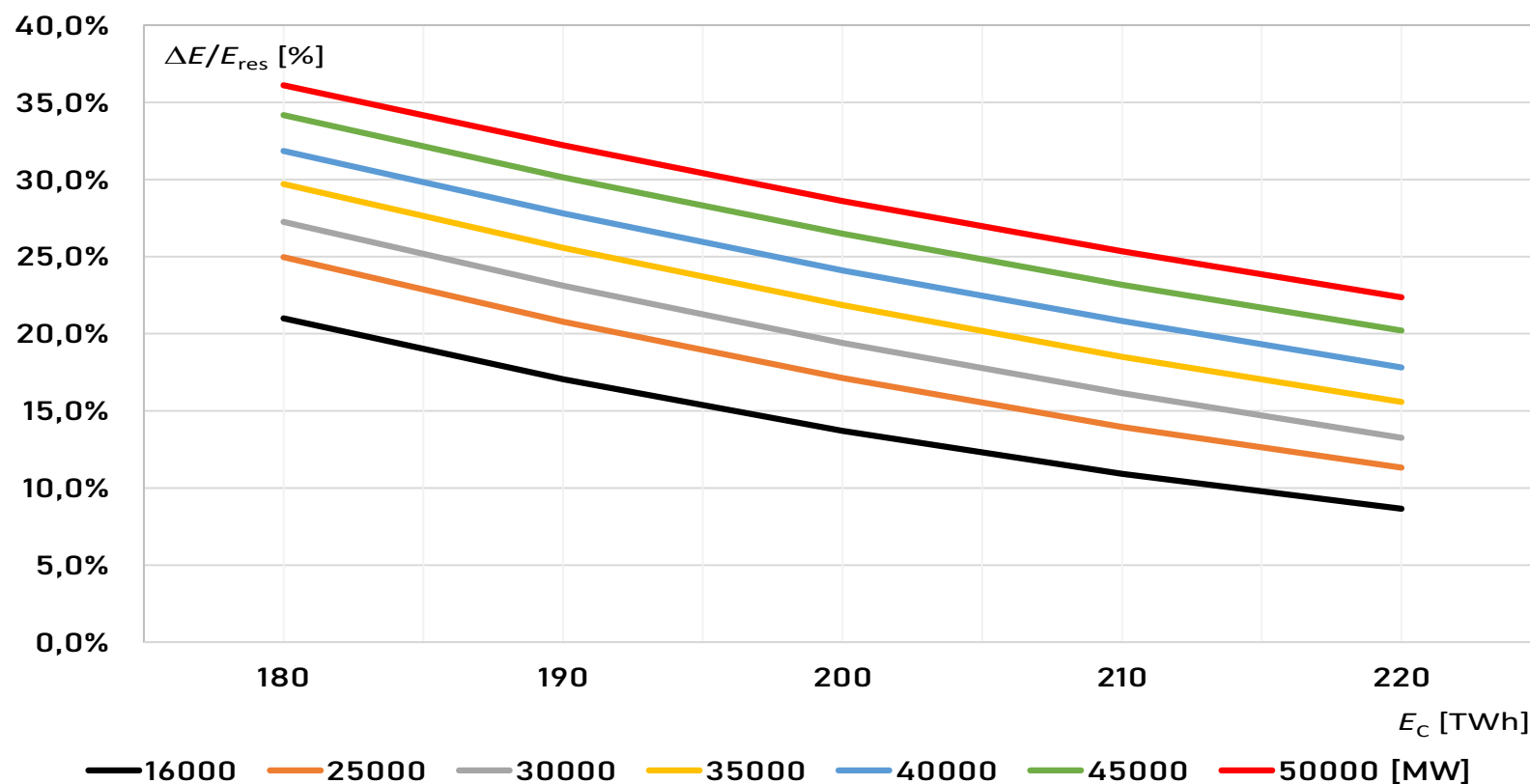


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 170. Zależności procentowe nadmiarowej energii z OZE podlegającej redukcji w funkcji całkowitego rocznego zapotrzebowania w systemie elektroenergetycznym; generacja wiatrowa na lądzie – wartość docelowa 20 GW, generacja wiatrowa na morzu 10 GW, wymuszona generacja konwencjonalna 9 GW



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 171. Uporządkowany wykres zapotrzebowania w systemie (kolor czerwony) wraz z obszarami niedoboru mocy (powyżej osi poziomej) oraz generacją namiarową (poniżej osi poziomej) – kolor czarny; założenia: generacja fotowoltaiczna 45 GW, zapotrzebowanie roczne 200 TWh; generacja wiatrowa na lądzie 20 GW, generacja wiatrowej na morzu 10 GW, wymuszona generacja konwencjonalna 9 GW, pojemność magazynu 0,1 TWh – kolor niebieski



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

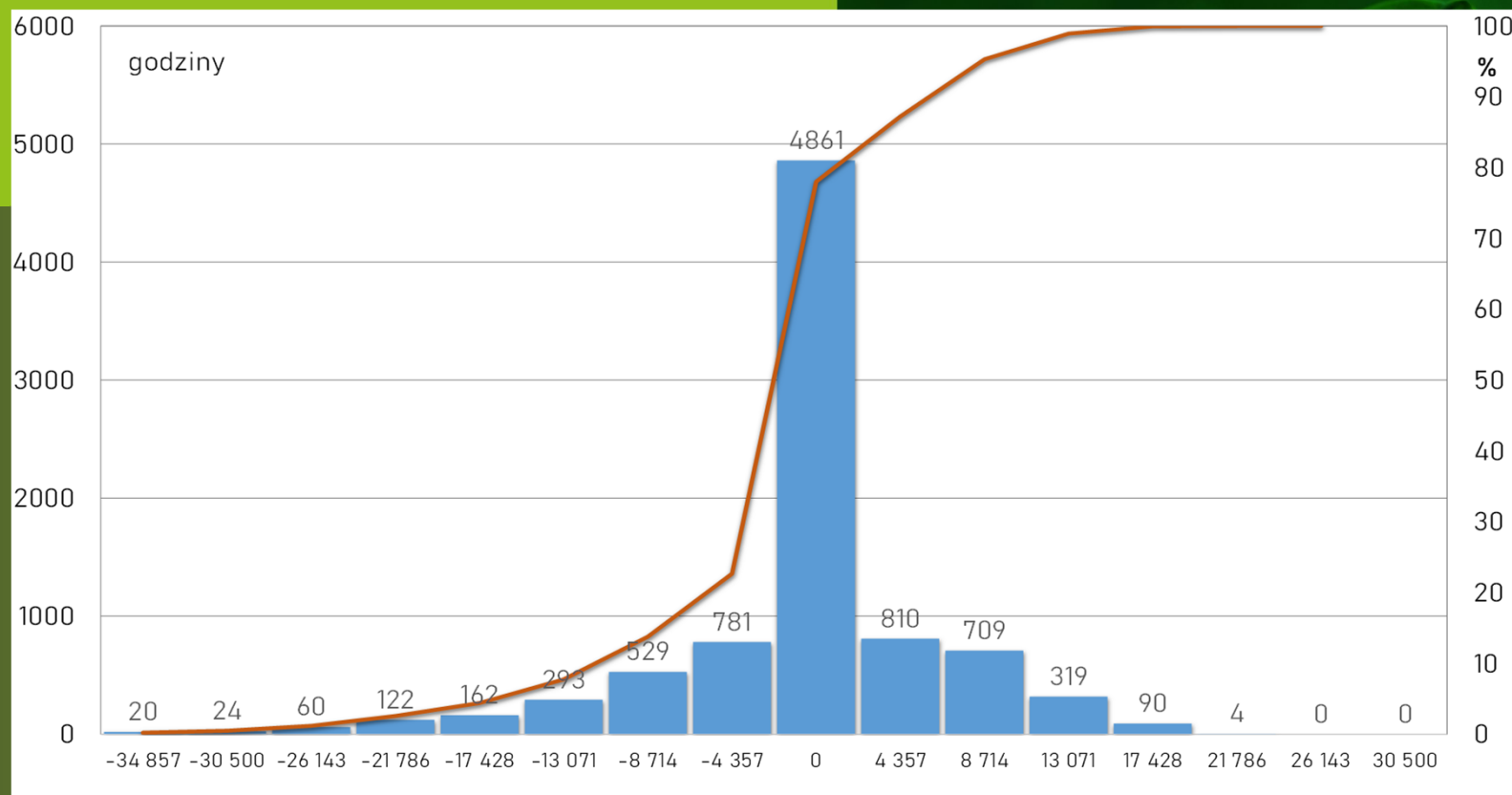


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 172. Histogram niedoborów (wartości dodatnie) i nadmiarów (wartości ujemne); generacja fotowoltaiczna 45 GW, zapotrzebowanie roczne 200 TWh; generacja wiatrowa na lądzie 20 GW, generacja wiatrowa na morzu 10 GW, wymuszona generacja konwencjonalna 9 GW, pojemność magazynu 0,1 TWh



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

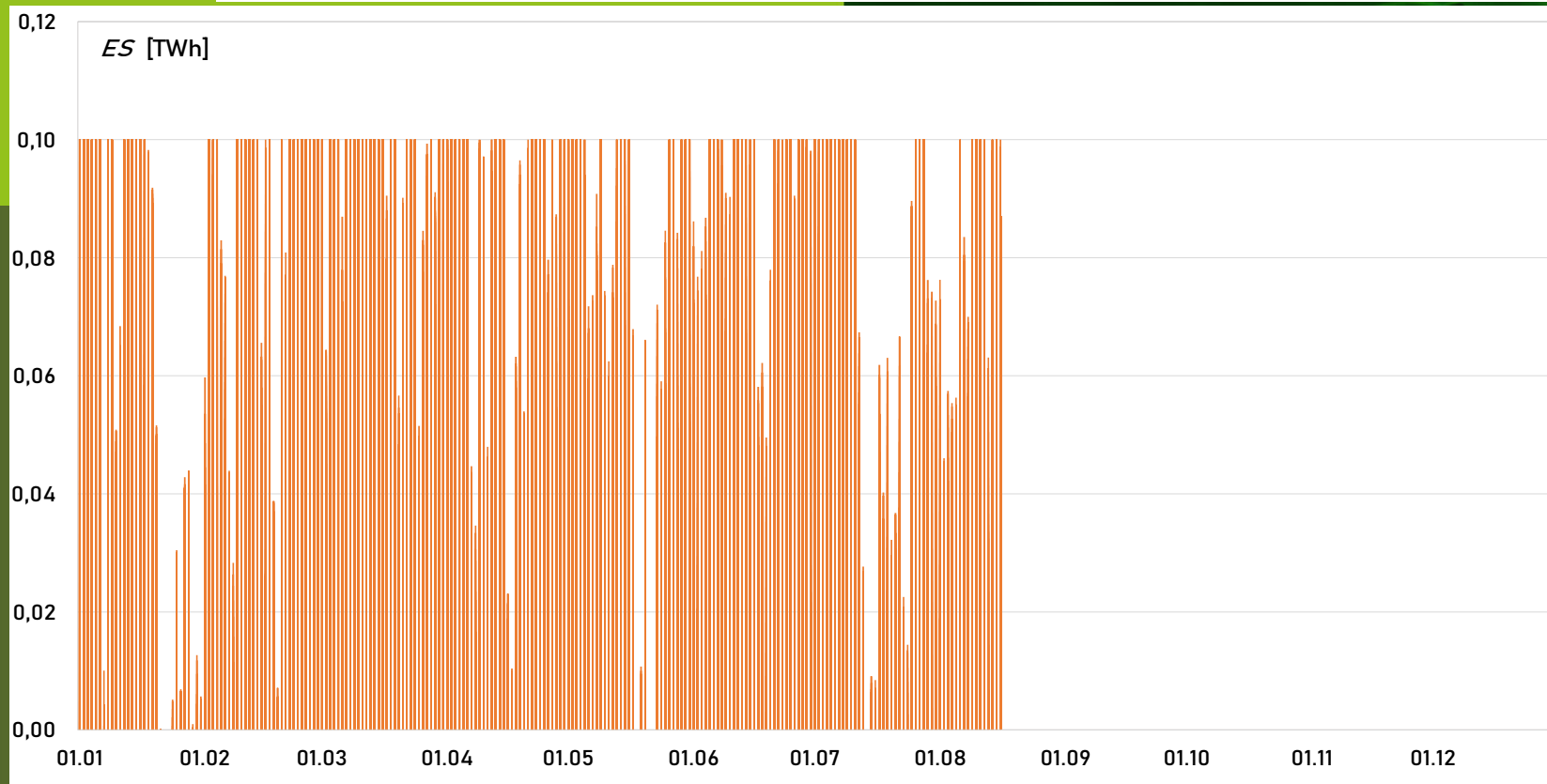


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 173. Praca magazynu energii o mocy 20 GW i pojemności 0,1 TWh. generacja fotowoltaiczna 45 GW, zapotrzebowanie roczne 200 TWh; generacja wiatrowa na lądzie 20 GW, generacja wiatrowej na morzu 10 GW, wymuszona generacja konwencjonalna 9 GW



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

NC RFG – podstawowe wymagania dla otrzymania FON



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

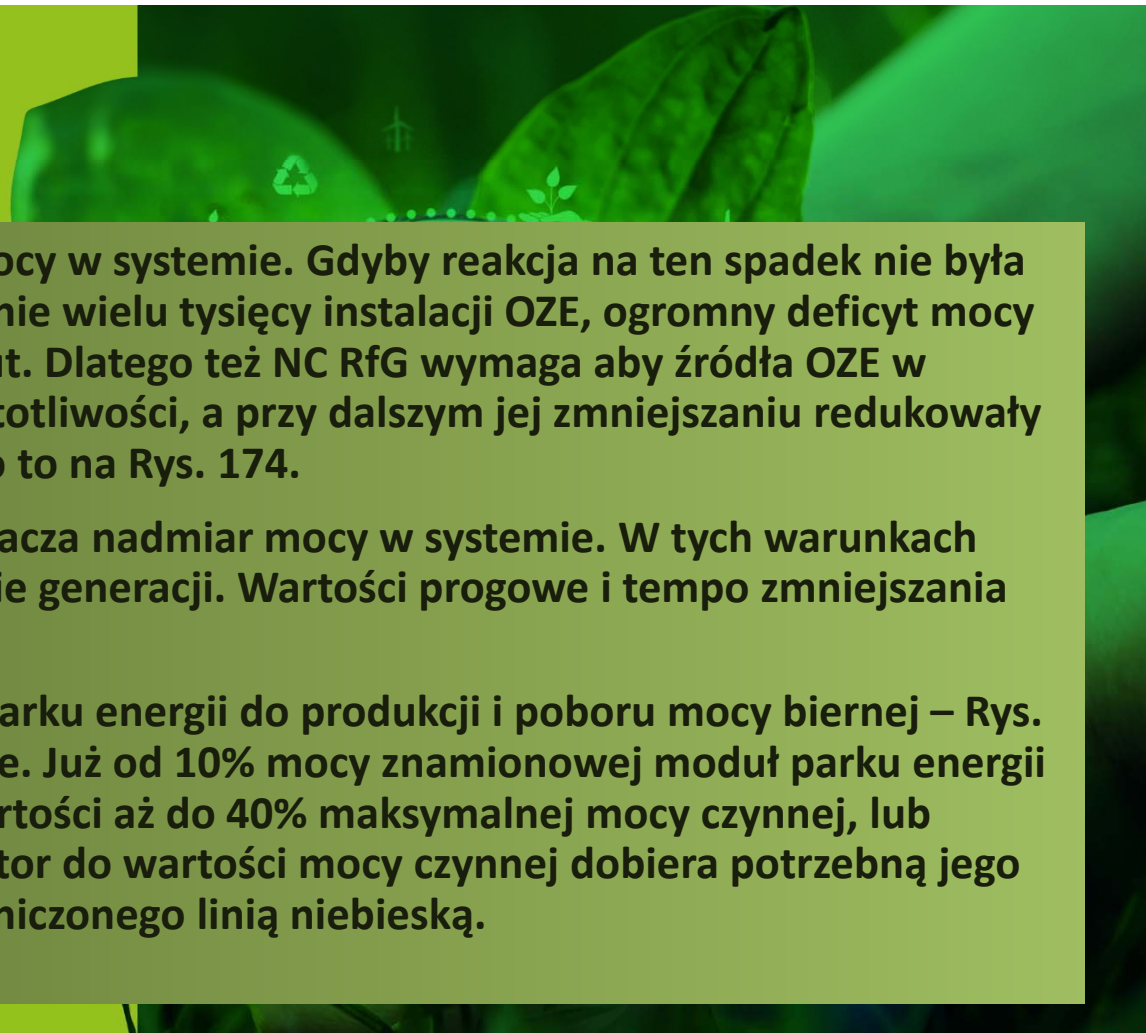


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Spadek częstotliwości oznacza wystąpienie deficytu mocy w systemie. Gdyby reakcja na ten spadek nie była odpowiednia mogłoby nastąpić przedwczesne odłączenie wielu tysięcy instalacji OZE, ogromny deficyt mocy w systemie i w efekcie zjawisko określone jako blackout. Dlatego też NC RfG wymaga aby źródła OZE w przedziale 49 Hz – 50 Hz nie reagowały na zmianę częstotliwości, a przy dalszym jej zmniejszaniu redukowały generację w tempie nie większym niż 2%/Hz. Pokazano to na Rys. 174.

Wzrost częstotliwości ponad wartość znamionową oznacza nadmiar mocy w systemie. W tych warunkach powyżej pewnego progu powinno nastąpić ograniczanie generacji. Wartości progowe i tempo zmniejszania generacji ustalają operatorzy – Rys. 175.

Drugie istotne wymaganie dotyczy zdolności modułu parku energii do produkcji i poboru mocy biernej – Rys. 176. Wymagania NC RfG są w tym zakresie bardzo ostre. Już od 10% mocy znamionowej moduł parku energii powinien mieć możliwość generacji mocy biernej o wartości aż do 40% maksymalnej mocy czynnej, lub poboru mocy biernej do wartości 35% tej mocy. Operator do wartości mocy czynnej dobiera potrzebną jego zdaniem wartość mocy biernej z wnętrza obszaru ograniczonego linią niebieską.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

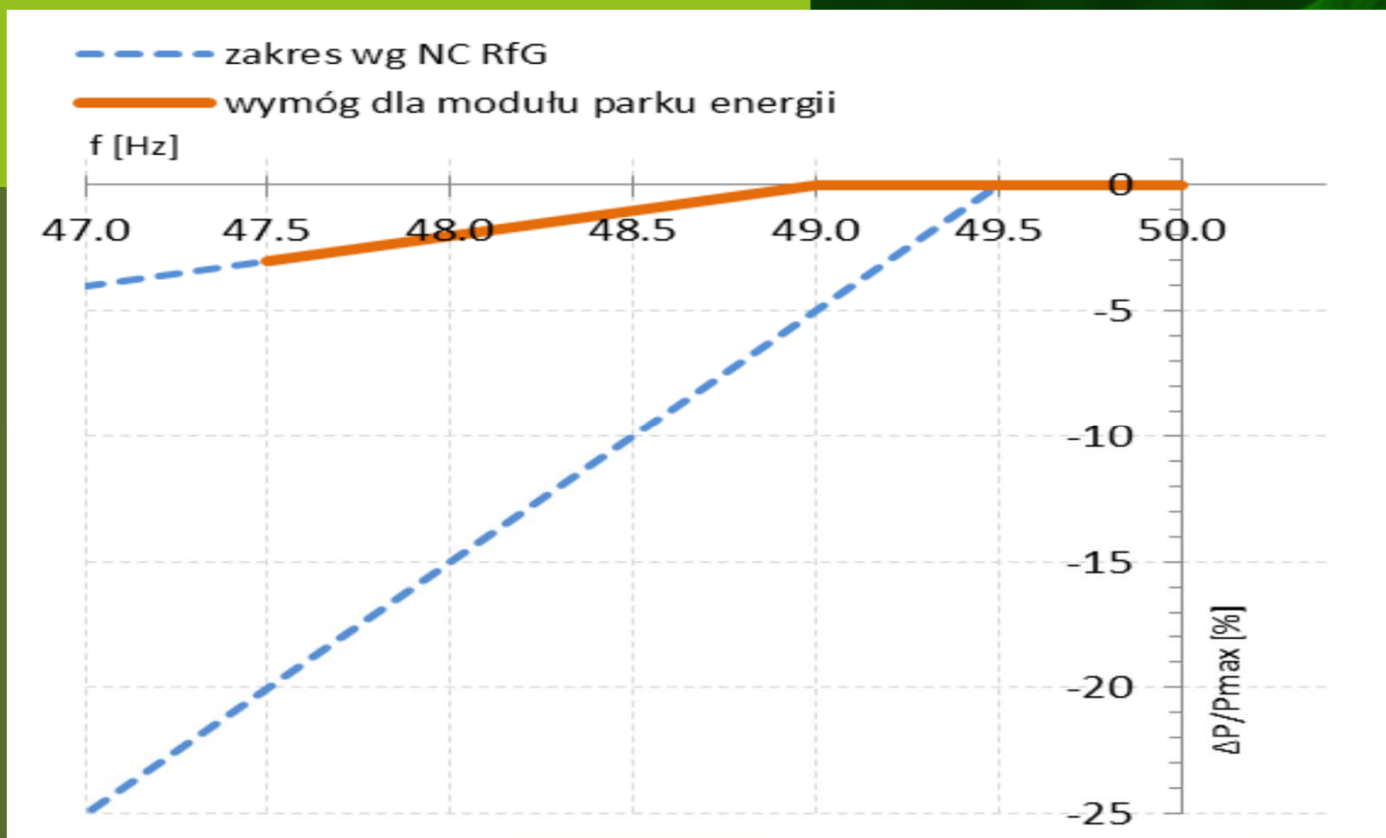


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 174. Wymagana zdolność modułu parku energii do pracy w warunkach obniżonej częstotliwości (LFSSM – U, ang. *Limited Frequency Sensitive Mode - Underfrequency*)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

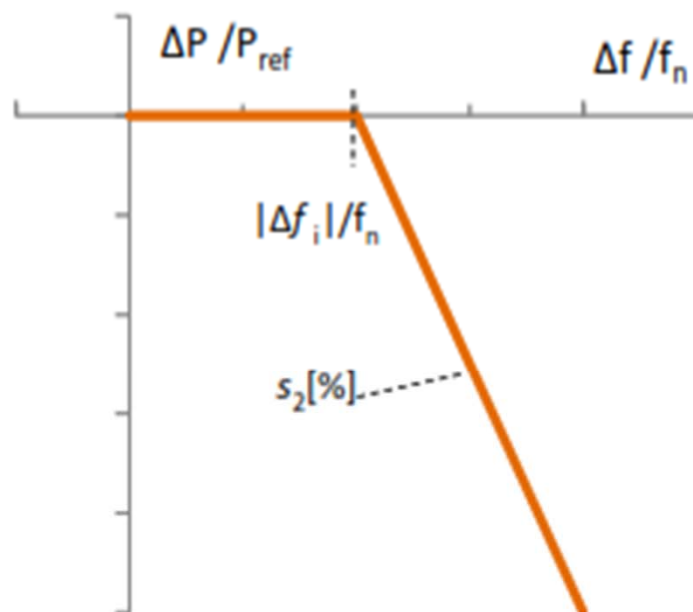


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 175. Wymagana zdolność modułu parku energii do pracy w warunkach obniżonej częstotliwości (LFSM – O ang. *Limited Frequency Sensitive Mode - Overfrequency*))



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



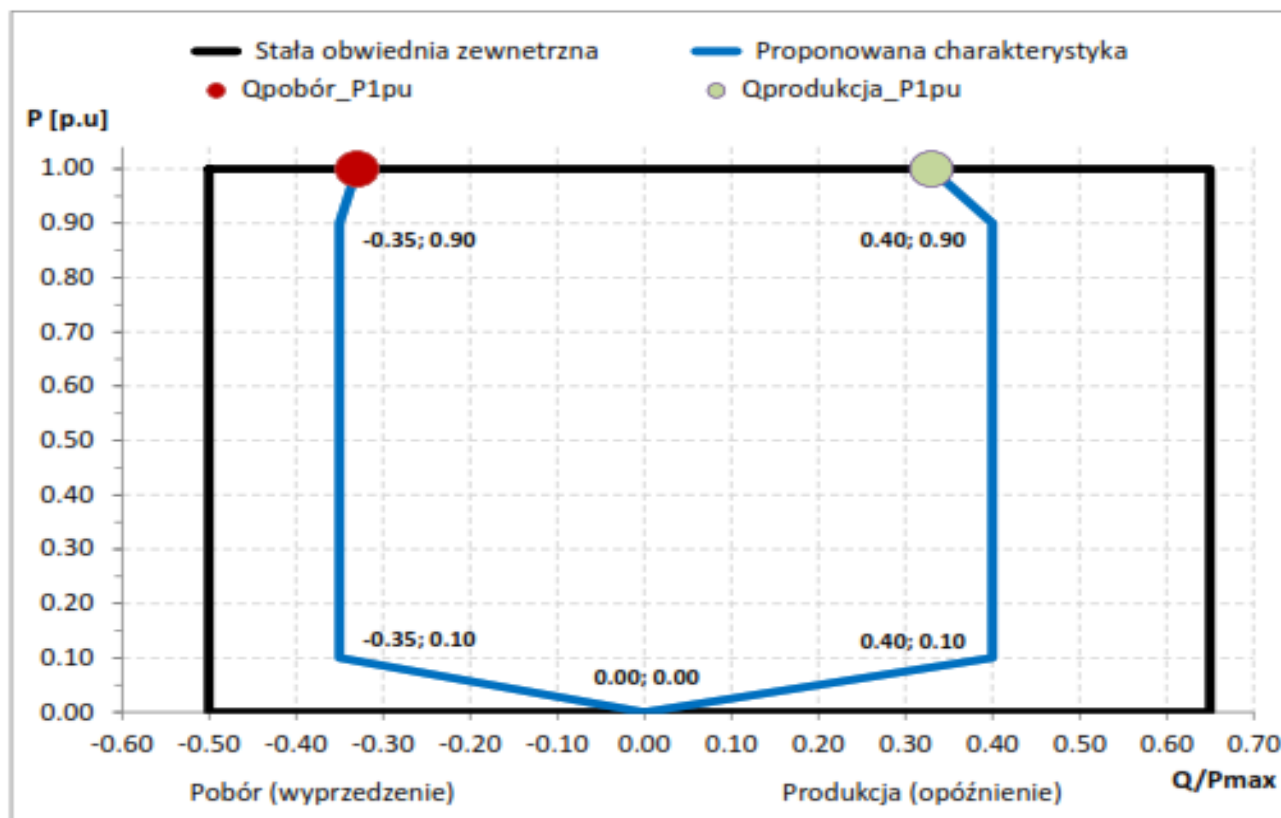
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Profil P-Q/P_{max} modułu parku energii



Rys 176. Wymagana zdolność modułu parku energii do poboru i generacji mocy biernej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przyszły system elektroenergetyczny – kluczowa rola inwerterów GFM



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

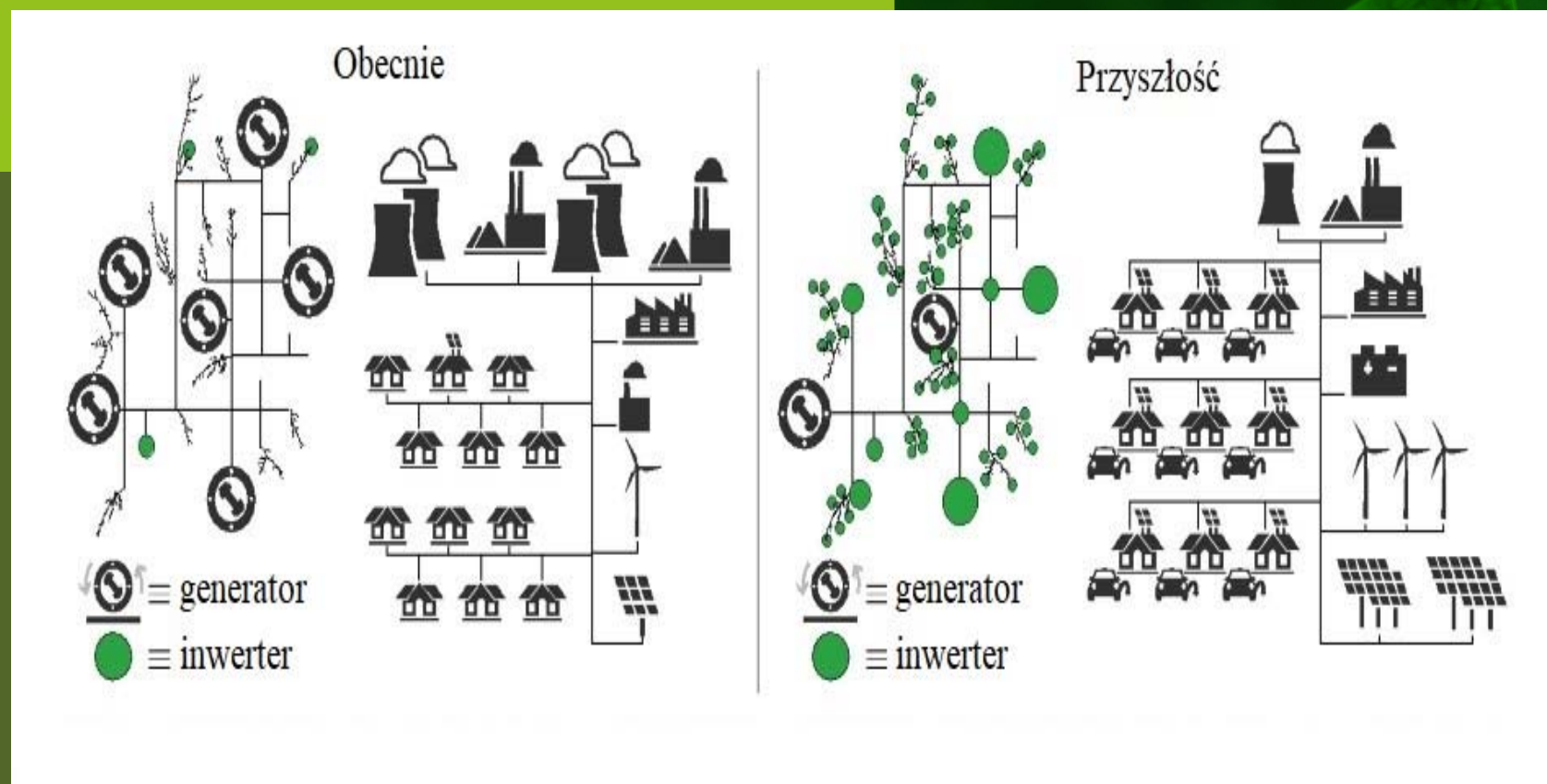


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 177. Wizja obecnego i przyszłego systemu elektroenergetycznego



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Cable pooling to koncepcja współdzielenia infrastruktury elektroenergetycznej przez różne źródła OZE, np. farmy wiatrowe i fotowoltaiczne. Wykorzystuje się tu fakt, że ich generacja wykazuje ujemną korelację czasową – słońce świeci głównie w dzień, a wiatr wieje częściej w nocy. Dzięki temu ta sama infrastruktura (linie, stacje) może obsługiwać więcej niż jedno źródło bez konieczności przewymiarowania przyłącza.

Na rys. 178 pokazano, że suma mocy farmy PV (20 MW, 1050 h/rok) i farmy wiatrowej (20 MW, 2900 h/rok) może okresowo przekraczać 35 MW. Z kolei rys. 179 ukazuje liczne momenty przekroczenia granicy 20 MW (typowej dla jednej farmy), co wymaga inteligentnego sterowania mocą, np. czasowego ograniczania produkcji PV.

Pooling umożliwia efektywniejsze wykorzystanie istniejącej infrastruktury sieciowej i może być stosowany nawet wtedy, gdy inwestorzy farm są różni. W Polsce obserwuje się już zainteresowanie inwestorów farm PV rozbudową o turbiny wiatrowe (lub odwrotnie) w celu maksymalizacji wykorzystania przyłącza.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

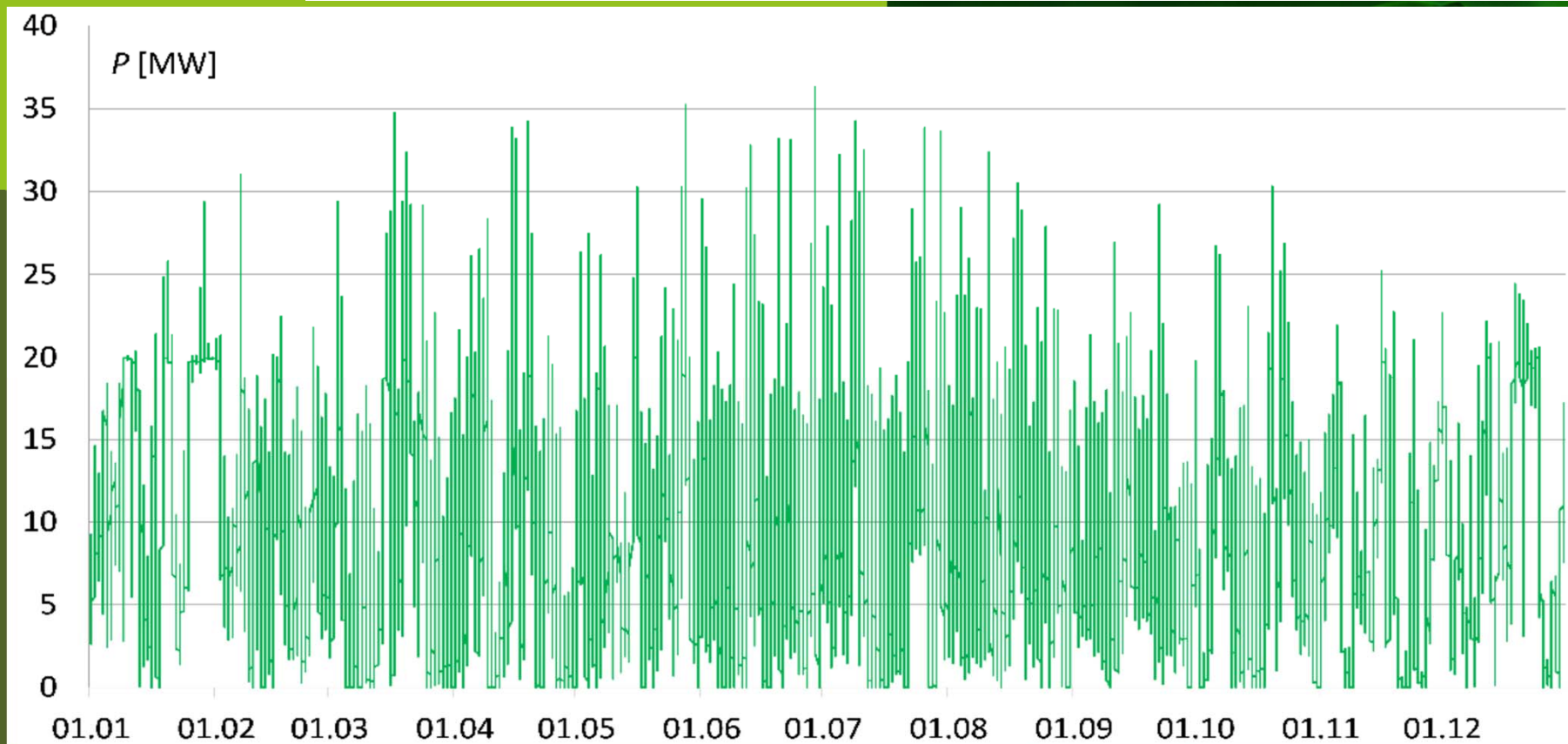


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 178. Sumaryczna moc generowana przez farmę wiatrową o mocy 20 MW i farmę fotowoltaiczną o mocy 20 MW – widoczne liczne przekroczenia mocy sumarycznej ponad wartość dopuszczalną określoną w umowie przyłączeniowej farmy wiatrowej



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

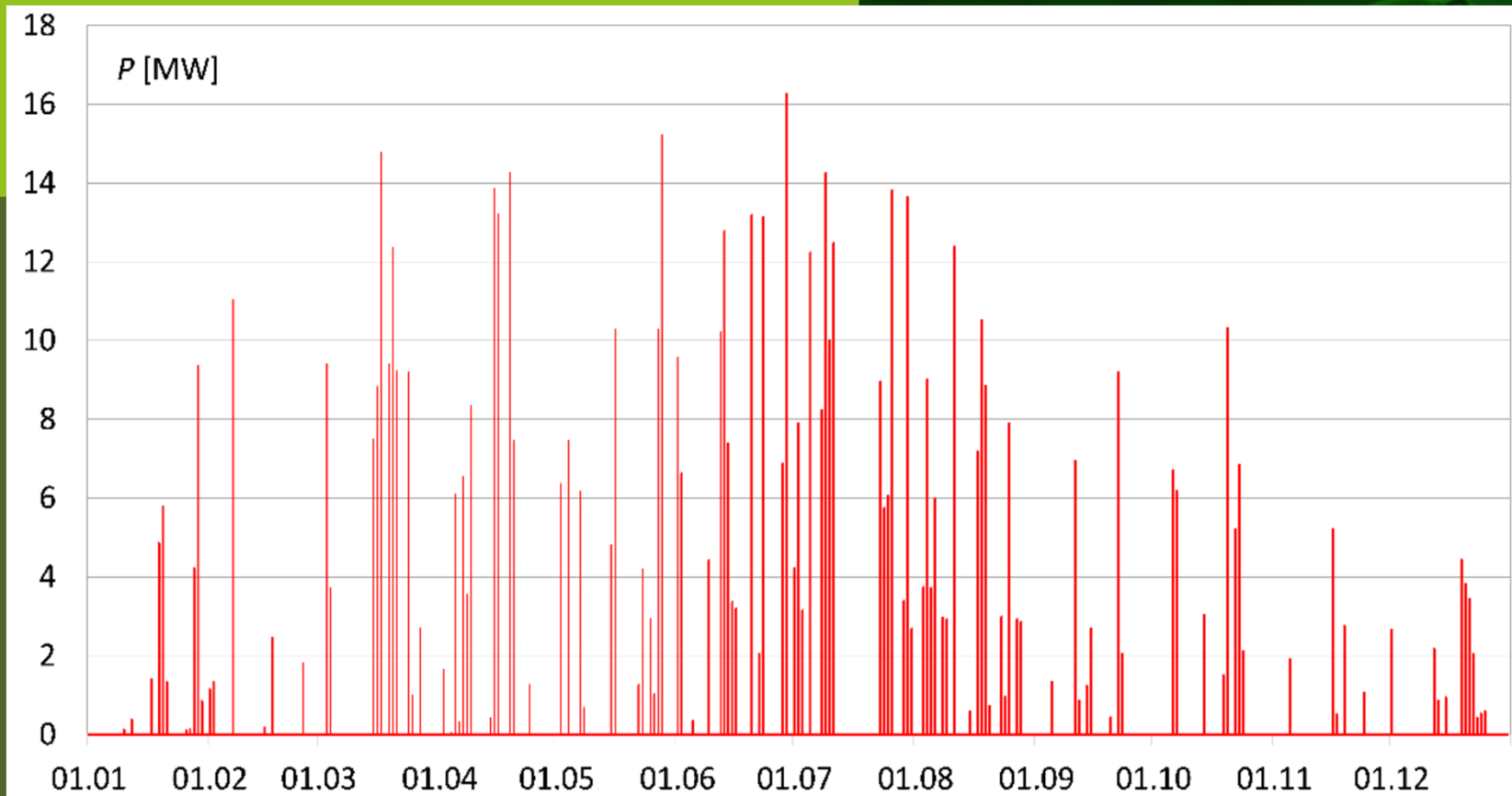


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 179. Przekroczenia mocy generowanej łącznie przez farmę wiatrową o mocy 20 MW i farmę fotowoltaiczną o mocy 20 MW ponad wartość dopuszczalną określoną w umowie przyłączeniowej farmy wiatrowej)



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Linia bezpośrednia to rozwiązanie umożliwiające dostarczanie energii elektrycznej, zwłaszcza ze źródeł OZE bezpośrednio od wytwórcy do dużego odbiorcy przemysłowego, z pominięciem sieci OSD/OSP. Jest to atrakcyjna alternatywa, ponieważ nie powoduje wzrostu kosztów dystrybucji i nie wymaga nowych inwestycji sieciowych w systemie. Dla odbiorców przemysłowych coraz większe znaczenie ma ślad węglowy produktów – dlatego istotne staje się nie tylko użycie zielonej energii, ale też fakt jej bezpośredniego dostarczenia.

Wbrew obiegowym opiniom, linia bezpośrednia nie oznacza pracy autonomicznej odbiorcy – nadal konieczne jest zapewnienie rezerw zasilania z sieci. Rys. 180 przedstawia układ, w którym nadwyżki generacji nie są oddawane do sieci, co pozwala uniknąć konieczności uzyskania statusu producenta. Zamiast tego, nadmiar energii jest ograniczany poprzez regulację generacji źródła OZE.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



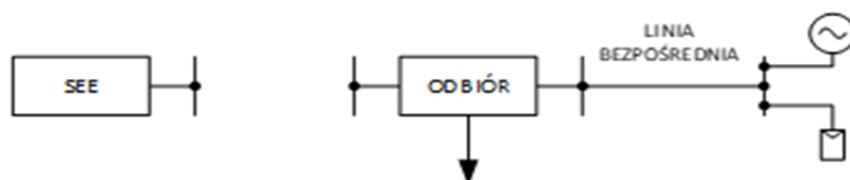
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

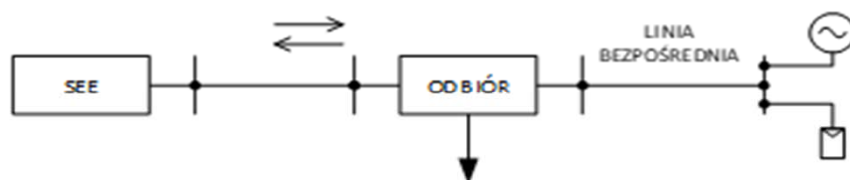


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

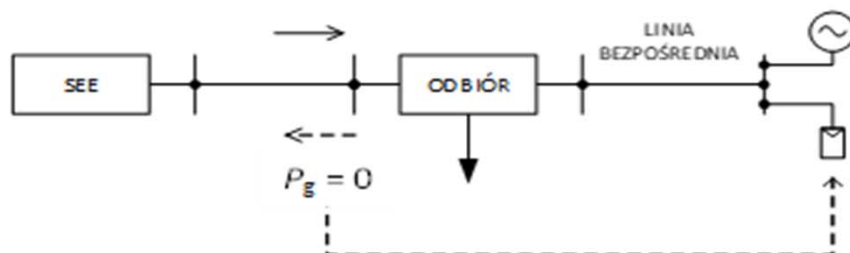
1) Prawnie OK, technicznie niemożliwe



2) Technicznie OK, prawnie problemy



3) Prawnie OK, technicznie OK – eliminacja przepływu mocy do sieci



Rys 180. Charakterystyczne aspekty współpracy linii bezpośredniej z odbiorcą przemysłowym



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Stabilność kątowna



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Badając stabilność lokalną rozpatruje się ogólne równanie ruchu wału wirnika zespołu wytwórczego o postaci:

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = m_T - m_e - m_D$$

gdzie:

J oznacza moment bezwładności wirnika,

δ oznacza kąt położenia wirnika generatora względem osi wirującej synchronicznie,

m_T oznacza moment turbiny,

m_e oznacza moment elektromagnetyczny generatora,

m_D oznacza moment tłumiący.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Równanie ruchu, po przeliczeniu poszczególnych momentów na jednostki mocy, przyjmuje następującą postać:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P - D \frac{d\delta}{dt}$$

lub też, może być wyrażone za pomocą dwóch równań:

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_s$$

$$M \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - P - D \frac{d\delta}{dt}$$

gdzie: M oznacza współczynnik bezwładności, który wyznacza się za pomocą wzoru:

$$M = \frac{T_m \cdot S_n}{\omega_s}$$

gdzie:

T_m oznacza mechaniczną stałą czasową wirnika zespołu wytwórczego,

S_n oznacza moc pozorną znamionową generatora,

D oznacza współczynnik tłumienia, P_m oznacza moc turbiny, $\Delta\omega$ oznacza poślizg wirnika, P oznacza moc czynną generatora.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Moc czynną generatora dopływającą do sieci sztywnej można wyznaczyć z zależności:

$$P = P(\delta) = P_{E_q} = \frac{E_q \cdot U_s}{X_d + X_T + X_s} \cdot \sin \delta$$

gdzie:

E_q oznacza siłę elektromotoryczną generatora w stanie ustalonym,

X_d oznacza reaktancję synchroniczną generatora,

X_T oznacza reaktancję transformatora blokowego.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

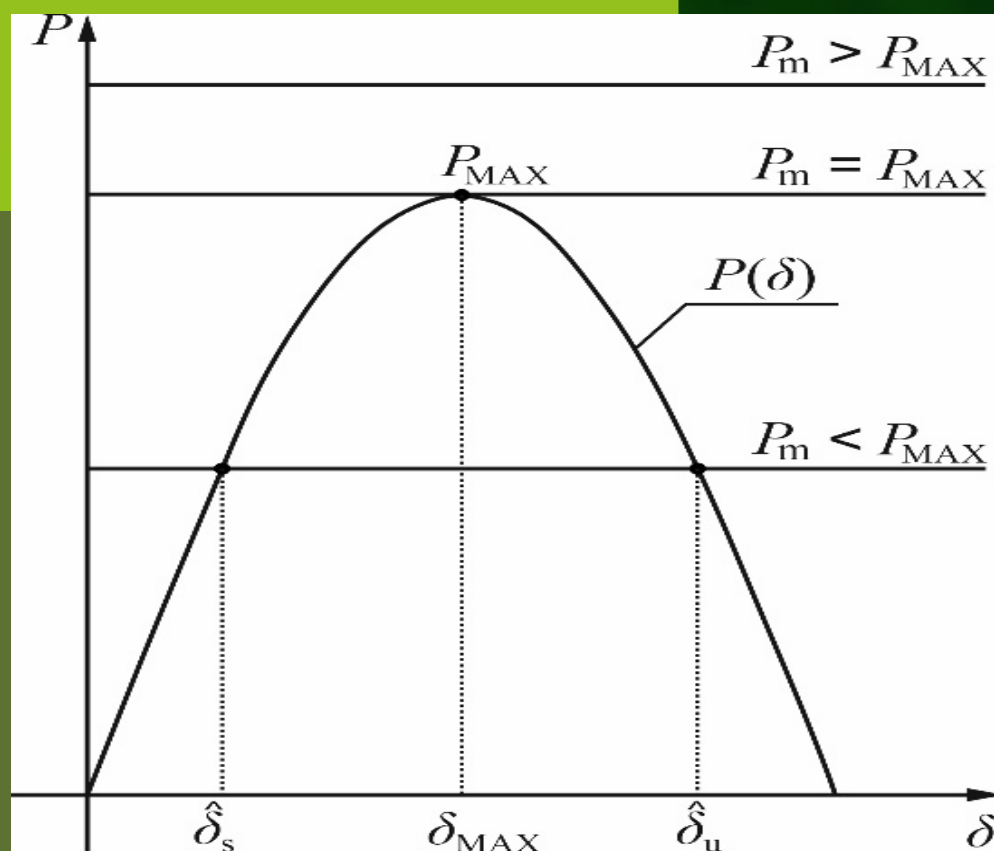


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 181. Kątowa charakterystyka mocy generatora wraz z charakterystykami mocy turbiny oraz punktami równowagi [37,38]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

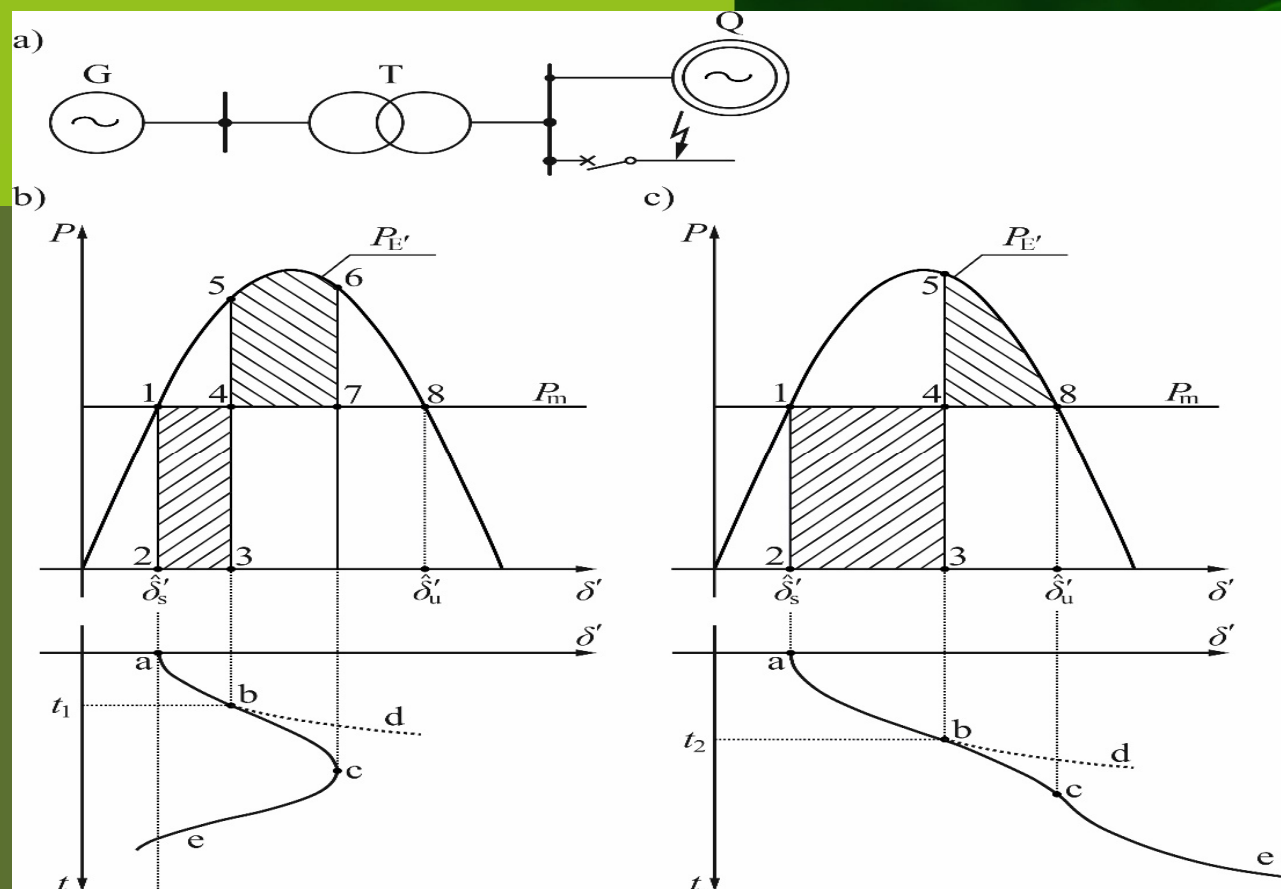


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 182. Wpływ czasu (t) trwania zwarcia trójfazowego na pola przyspieszeń i hamowań wirnika: a) $t = t_1$, b) $t = t_2$ [37,38]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Stabilność napięciowa



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

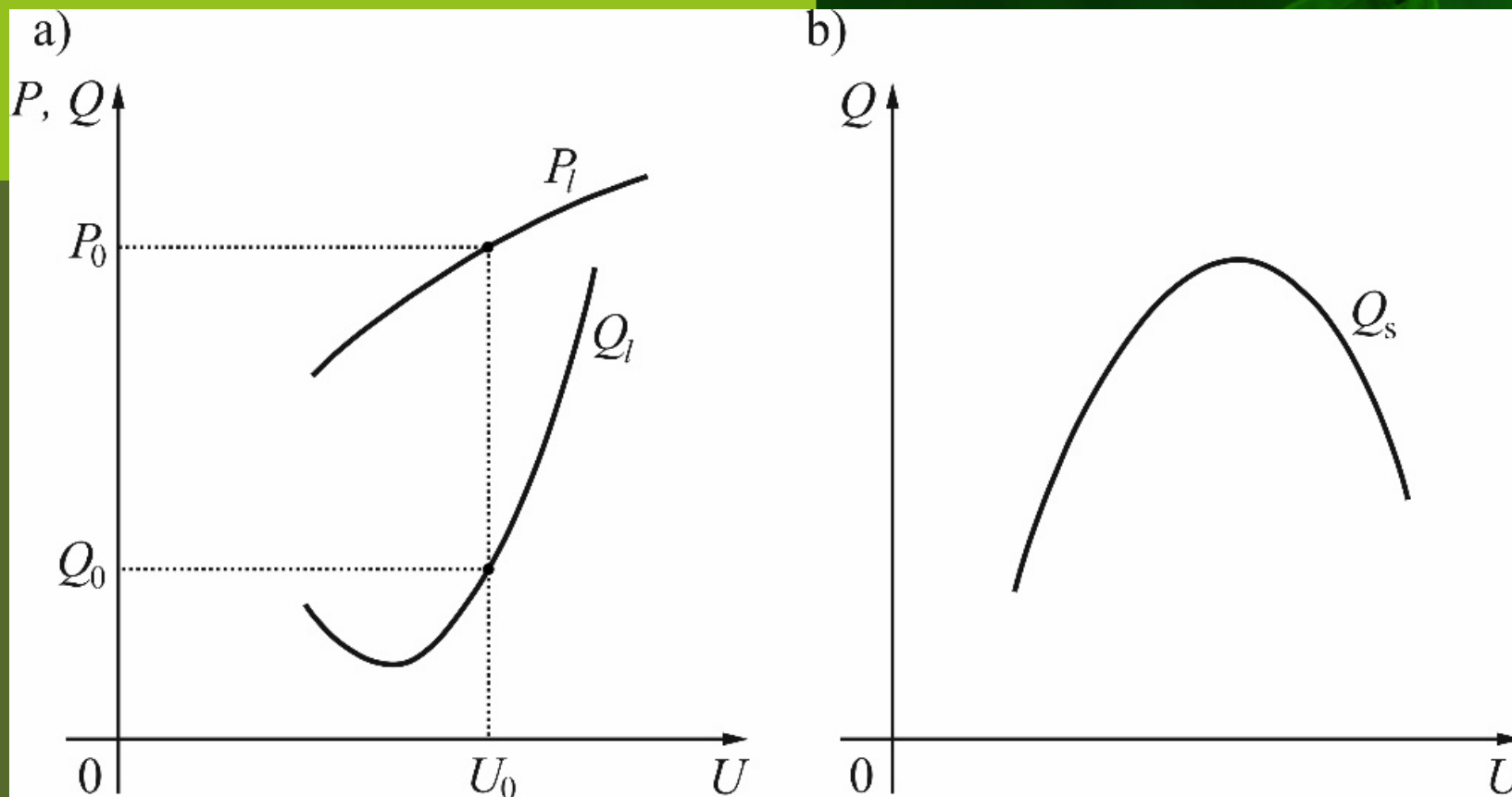


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 183. Przykładowe charakterystyki napięciowe odbioru kompleksowego i źródła [37,38]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W celu wyznaczenia charakterystyki napięciowej źródła należy posłużyć się ogólnymi zależnościami na moc czynną P_s i bierną Q_s wytwarzaną:

$$P_s = \frac{E \cdot U}{X} \cdot \sin \delta$$

$$Q_s = \frac{E \cdot U}{X} \cdot \cos \delta - \frac{U^2}{X}$$

gdzie: E i X oznaczają odpowiednio siłę elektromotoryczną oraz reaktancję źródła zasilającego odbiór kompleksowy natomiast U oznacza napięcie w węźle odbiorczym.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

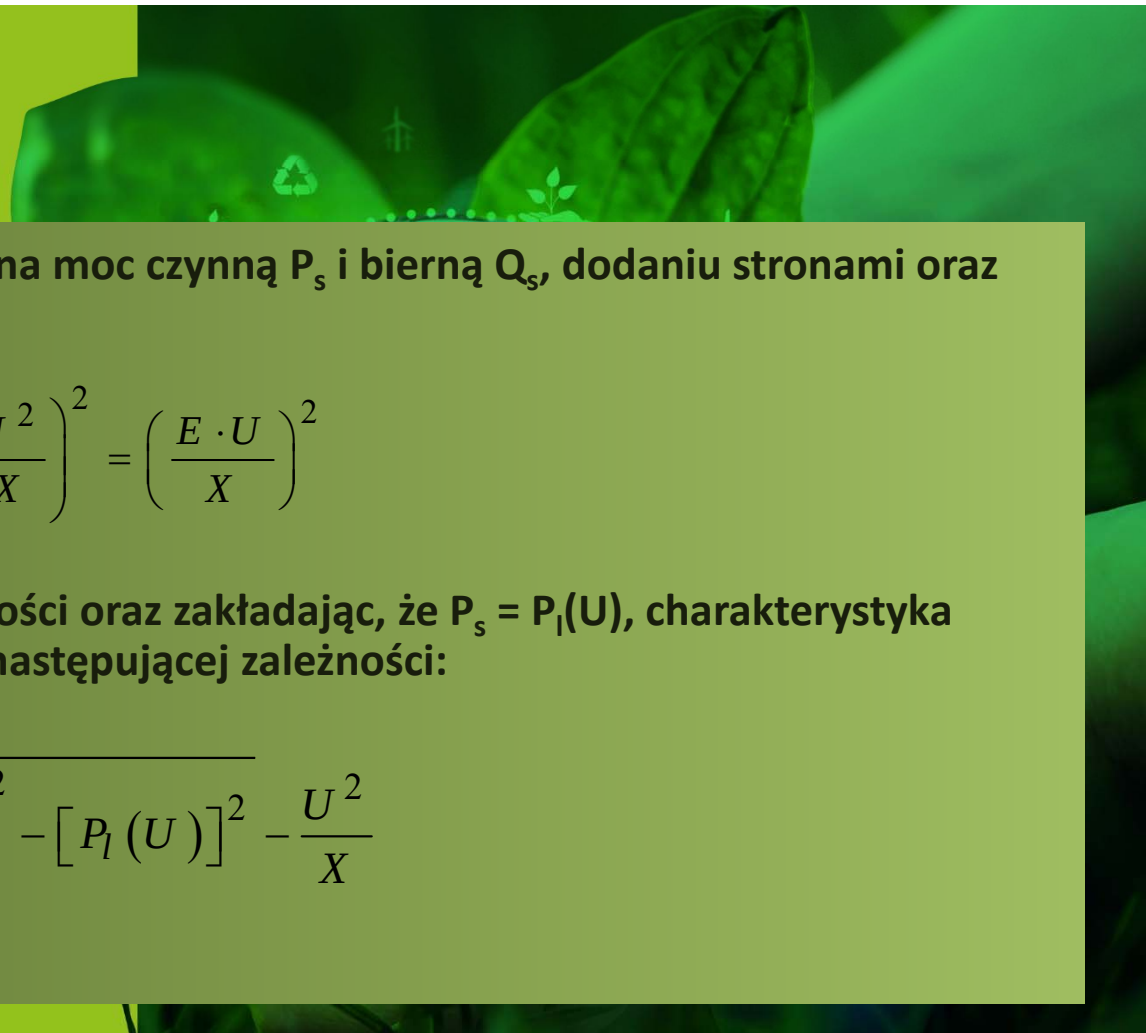


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Po obustronnym podniesieniu do kwadratu zależności na moc czynną P_s i bierną Q_s , dodaniu stronami oraz uwzględnieniu, że $\sin^2\delta + \cos^2\delta = 1$, otrzymuje się:

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{U^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{E \cdot U}{X} \right)^2$$

Wówczas po dalszym przekształceniu powyższej zależności oraz zakładając, że $P_s = P_l(U)$, charakterystyka wytwarzania mocy biernej Q_s może być wyznaczona z następującej zależności:

$$Q_s = \sqrt{\left(\frac{E \cdot U}{X} \right)^2 - [P_l(U)]^2} - \frac{U^2}{X}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

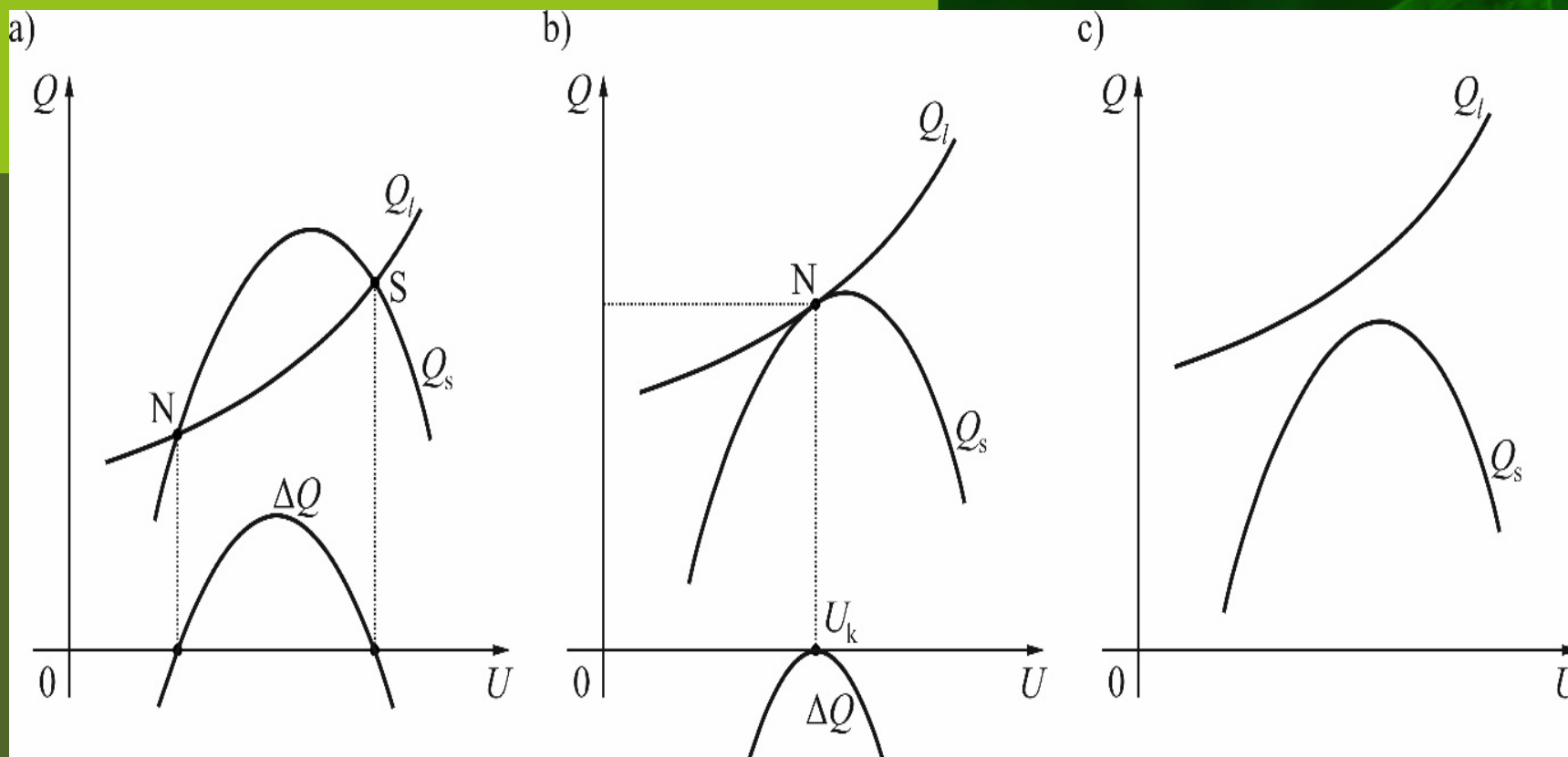


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 184. Wzajemne położenie charakterystyk wytwarzania i odbioru : a) dwa punkty równowagi, b) jeden punkt równowagi, c) brak punktu równowagi [37,38]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



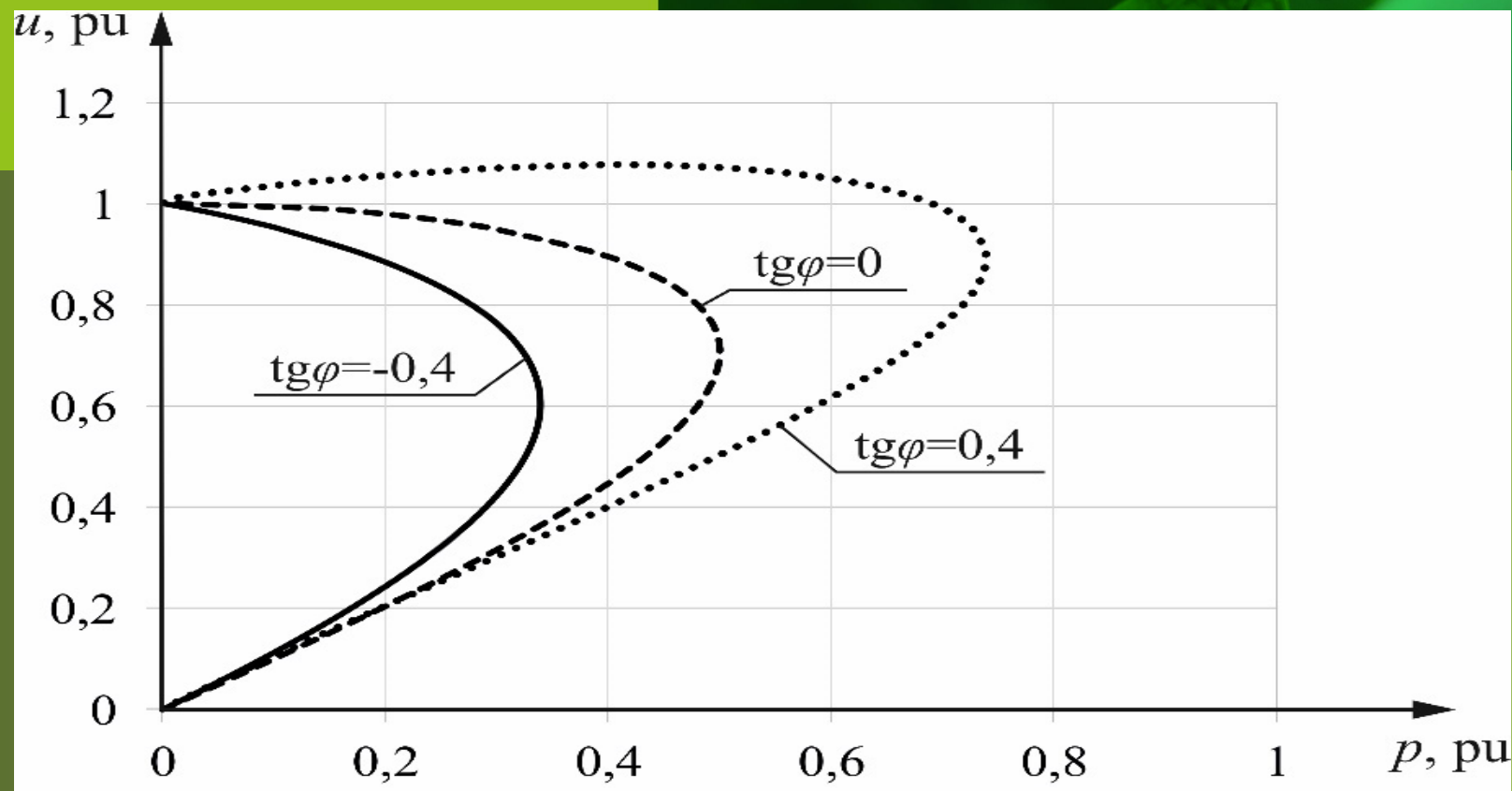
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- -0,4 - oznacza pobór mocy biernej z sieci,
- 0 - oznacza zerową moc bierną,
- 0,4 - oznacza wprowadzanie mocy biernej do sieci.



Rys 185. Krzywe nosowe dla różnych wartości wskaźnika $\text{tg}\varphi$ [37,38]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Postać zależności na $P_{\max}$ i $Q_{\max}$ jest następująca:

$$P_{\max} = \frac{S_K''}{2} \cdot \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad \text{oraz} \quad Q_{\max} = \frac{S_K''}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

gdzie S_K'' oznacza moc zwarciovą po stronie wtórnej transformatora.

Znając moc czynną $P_{\max}$ i bierną $Q_{\max}$, można wyznaczyć moc pozorną $S_{\max}$:

$$S_{\max} = \frac{S_K''}{2} \cdot \frac{1}{1 + \sin \varphi}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Stabilność częstotliwościowa



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przybliżenia liniowe charakterystyk wytwarzania P_T oraz poboru P_L są dane wzorami:

$$\frac{\Delta P_L}{P_L} = K_L \cdot \frac{\Delta f}{f}, \quad P_L = \sum_{i=1}^N P_{Li}$$

$$\frac{\Delta P_T}{P_T} = -K_T \cdot \frac{\Delta f}{f_n}, \quad P_T = \sum_{i=1}^N P_{mi}$$



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

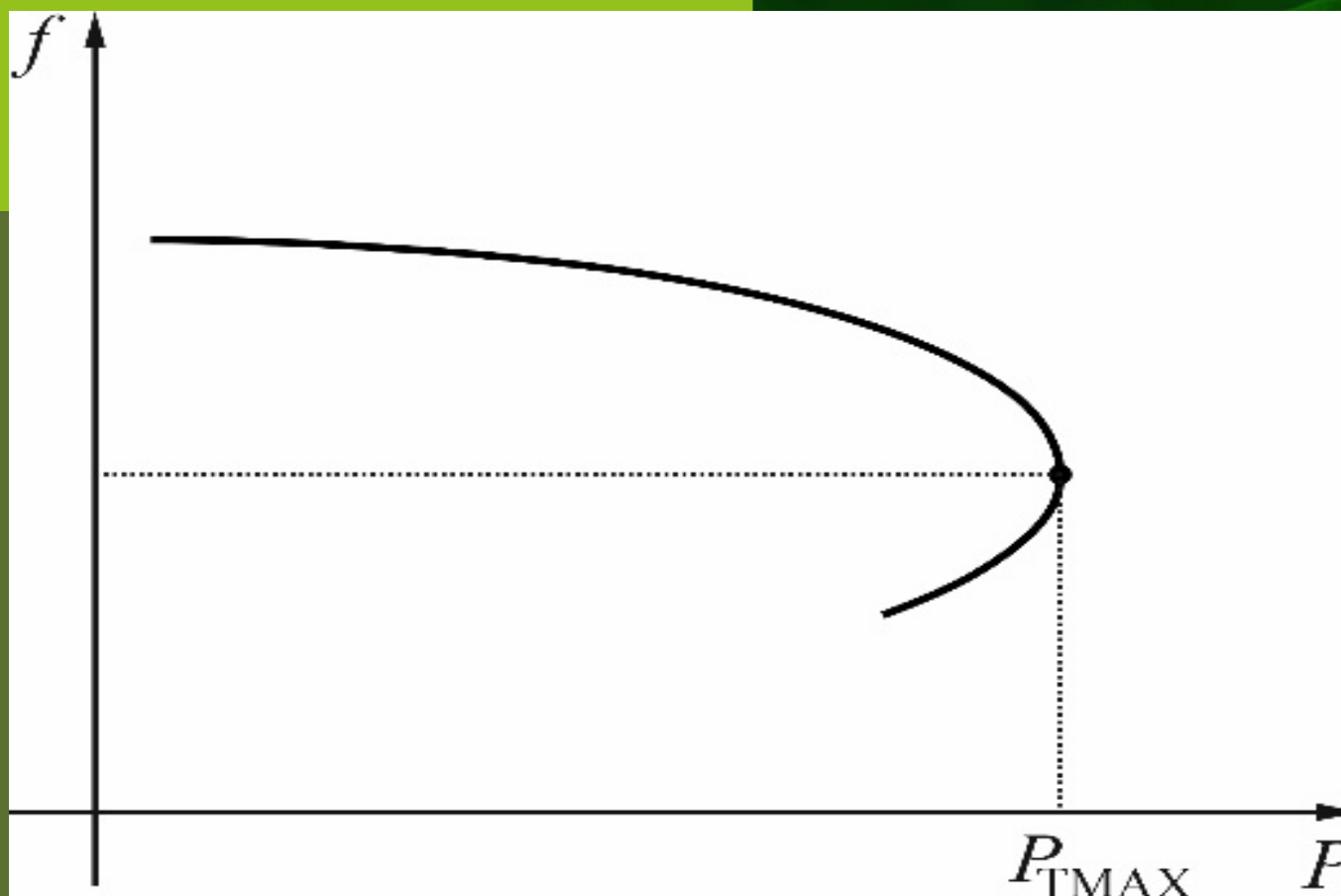


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 186. Charakterystyka statyczna wytwarzania w SEE [37]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

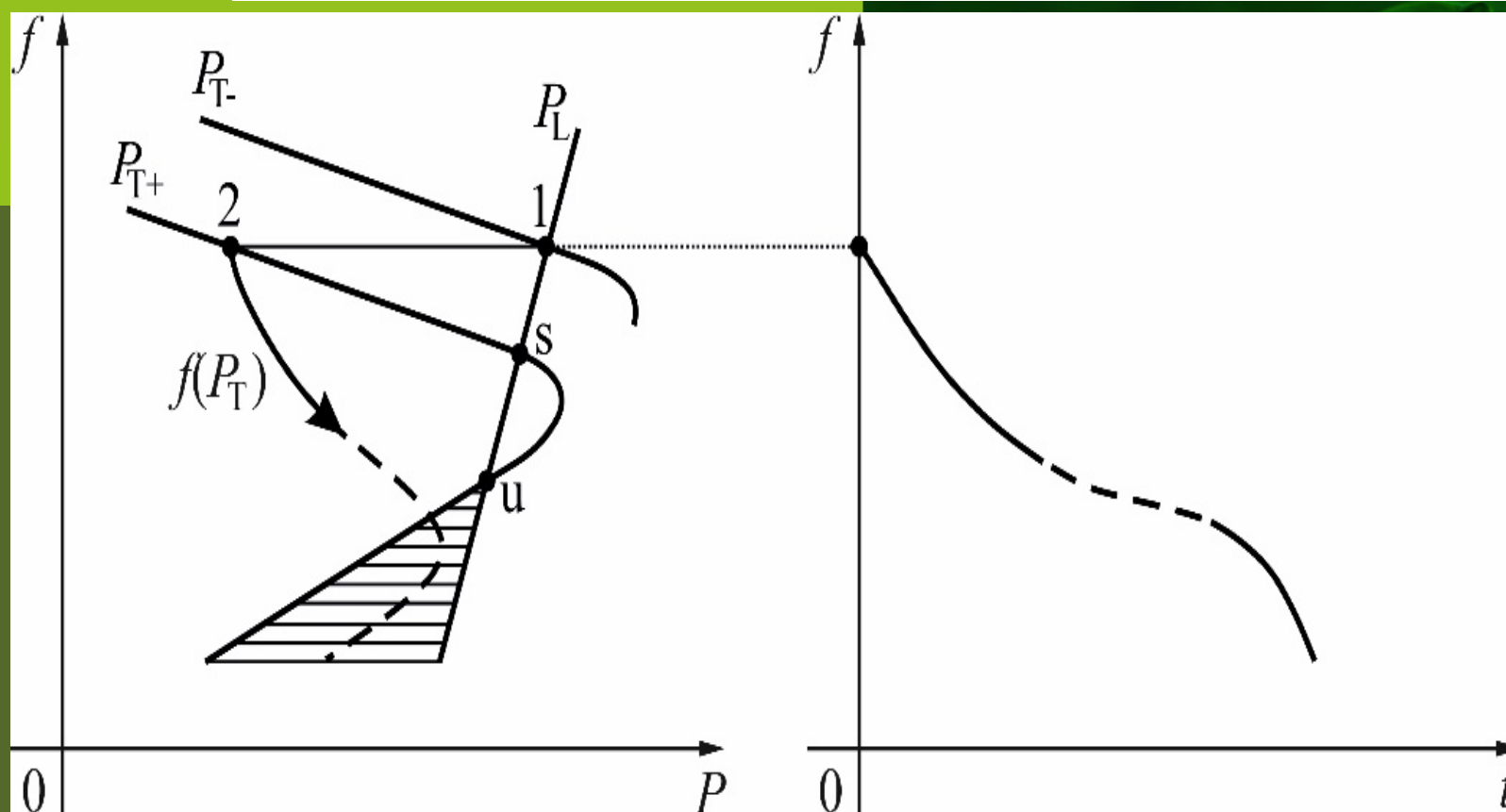


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 187. Przykładowe częstotliwościowe charakterystyki statyczne SEE wraz z zaznaczonymi punktami równowagi: s – punkt stabilny lokalnie, u – punkt niestabilny lokalnie [37, 38]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zabezpieczenia linii elektroenergetycznych



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Wyróżnia się następujące rodzaje Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieceniowej (EAZ):

- **prewencyjna**, umożliwiająca zapobieganie zakłóceniom poprzez ich sygnalizację przed ewentualnym zadziałaniem zabezpieczeń (np. sygnalizowanie przekroczeń prądowych, termicznych, napięciowych),
- **eliminacyjna**, umożliwiająca eliminowanie z pracy elementów objętych zakłóceniem, np. zwarcie,
- **restytucyjna**, umożliwiająca przywrócenie normalnego stanu pracy w wyniku usunięcia uszkodzonego elementu lub usunięcia przyczyny zakłócenia. Przykładem tego rodzaju automatyki jest SPZ (Samoczynne Ponowne Załączenie) lub SZR (Samoczynne Załączenie Rezerwy).

Najważniejsze wymagania stawiane EAZ są następujące:

- **szybkość**, która pozwala na zapewnieniu bezpieczeństwa personelowi oraz ograniczeniu rozmiaru uszkodzenia,
- **selektywność (wybiórczość)**, która polega na wyłączeniu z pracy fragmentu układu lub elementu objętego zakłóceniem,
- **niezawodność**, która oznacza pewność zadziałania zabezpieczenia w przypadku wystąpienia zakłócenia oraz niezadziałania w przypadku braku zakłócenia,
- **czułość**, która oznacza bezbłędne stwierdzenie wystąpienia zakłócenia oraz zdolność do reagowania na minimalną wartość wielkości mierzonej.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

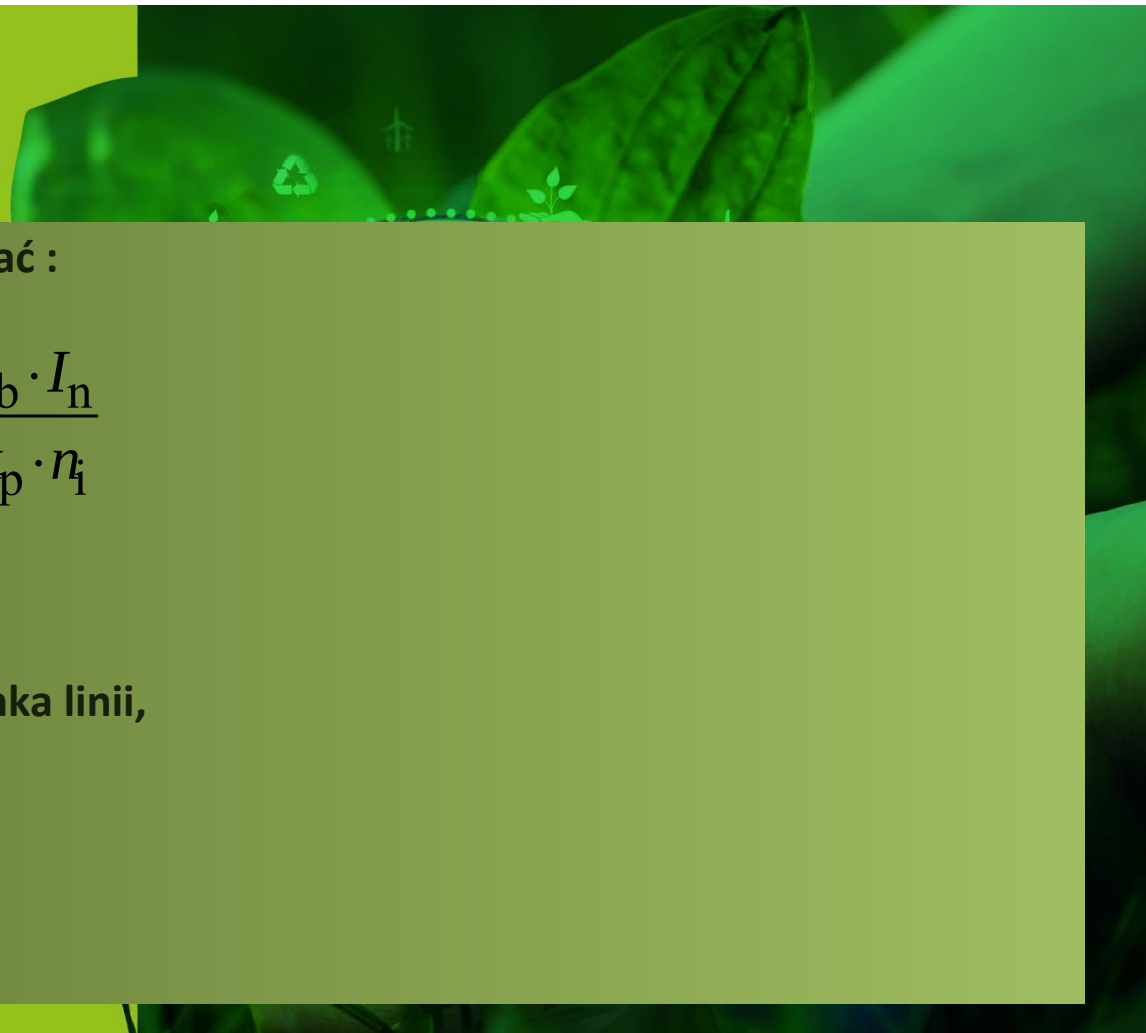


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Zależność na prąd rozruchowy I_r i ma następującą postać :

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_n}{k_p \cdot n_i}$$

gdzie:

I_n – prąd znamionowy przewodów początkowego odcinka linii,

k_b – współczynnik bezpieczeństwa, równy 1,05,

k_p – współczynnik powrotu,

n_i – przekładnia przekładników prądowych.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

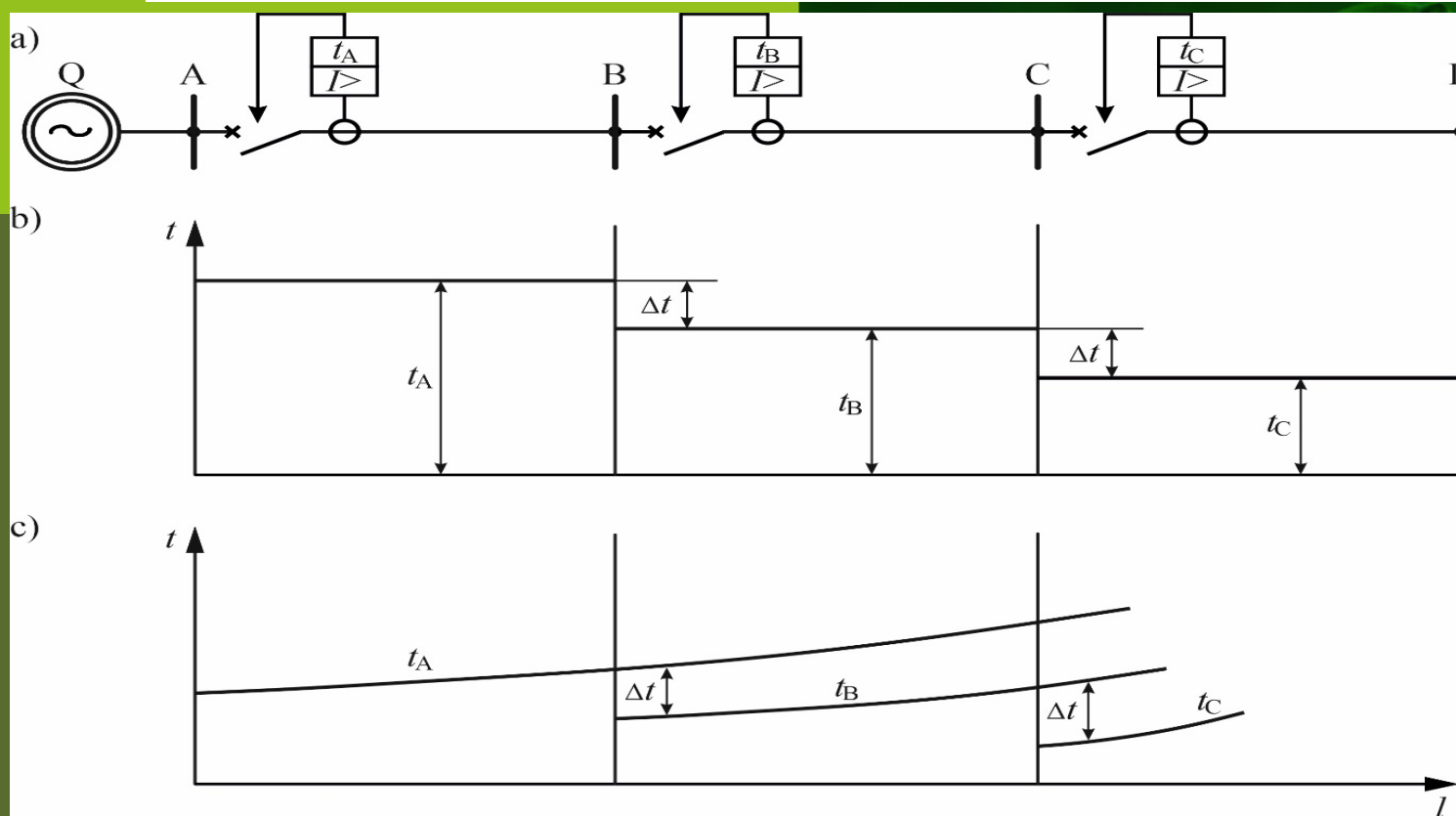


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 188. Schemat przedstawiający zasadę działania zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego: a) schemat ideowy, b) zasada stopniowania zwłok czasowych dla charakterystyki czasowo-prądowej, jednostopniowej niezależnej, c) częściowo zależnej [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Prąd rozruchowy I_r zabezpieczenia wyznacza się z następującej zależności, tak aby zapewnić jego odstrojenie (selektywność) od maksymalnych wartości ruchowych:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot k_r \cdot k_s \cdot I_{\max}}{k_p \cdot n_f}$$

gdzie:

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (przyjmowany najczęściej z przedziału od 1,1 do 1,2),

k_r – współczynnik samorozruchu silników zasilanych z zabezpieczanego odcinka linii (przyjmowany z przedziału od 1 do 6),

k_s – współczynnik schematowi,

$I_{\max}$ – prąd największego obciążenia zabezpieczanego odcinka linii.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Wartość prądu rozruchowego stanowi pierwszy warunek nastawienia zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego (selektywność). Drugim warunkiem, koniecznym do spełnienia, jest czułość, którą sprawdza się za pomocą zależności :

$$I_r \leq \frac{k_s \cdot I_{zmin}}{k_c \cdot n_i}$$

gdzie:

k_c – współczynnik czułości zabezpieczenia (równy 1,5 dla zabezpieczenia podstawowego i 1,2 dla zabezpieczenia rezerwowego),

I_{zmin} – najmniejsza wartość prądu zwarcia na końcu strefy.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

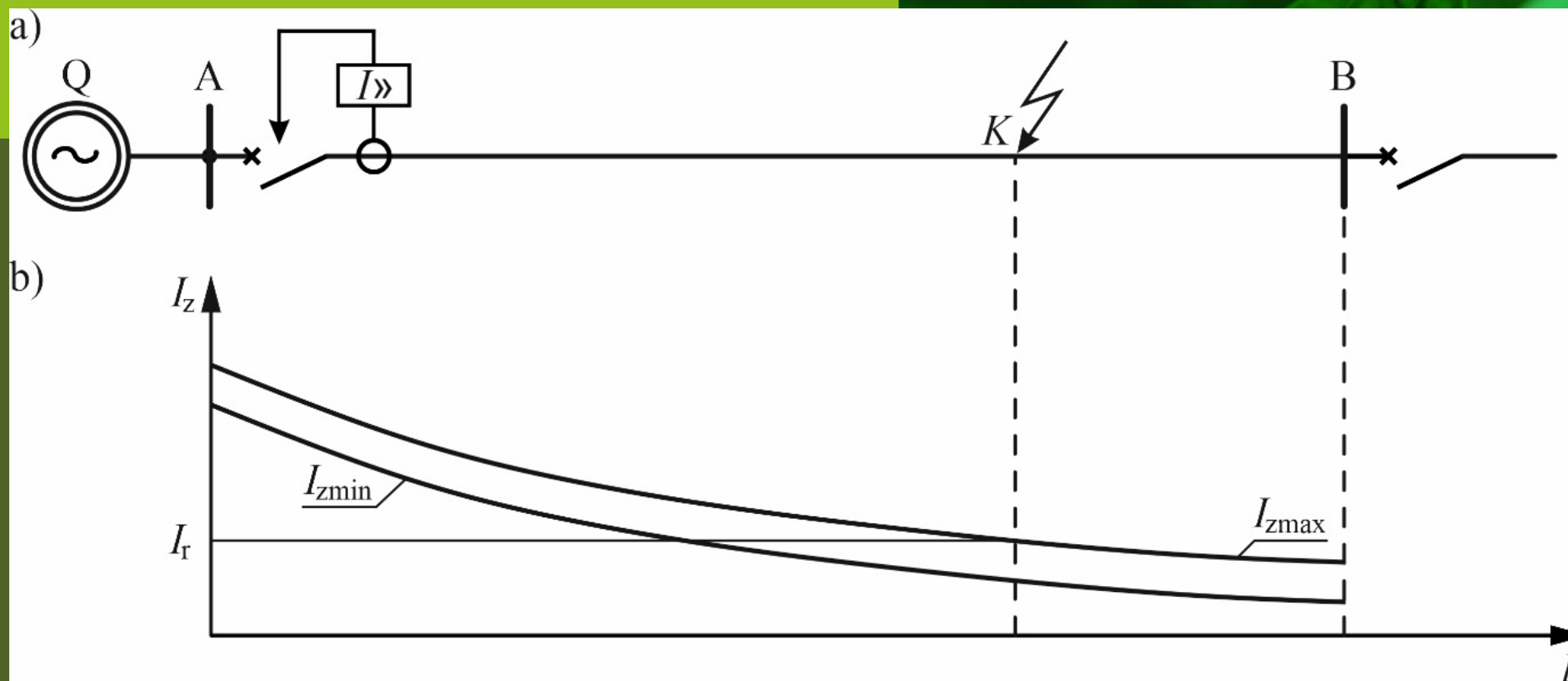


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 189. Schemat przedstawiający zasadę działania zabezpieczenia nadprądowego bezwłocznego: a) schemat ideowy, b) zasada doboru wartości prądu rozruchowego [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Czas zadziałania zabezpieczenia może wynikać z jego czasu własnego lub celowo nastawionego opóźnienia (w praktyce jest to zakres od 0,05s do 0,3s). Prąd rozruchowy I_r zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego wyznacza się z zależności:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{zmax}}{n_i}$$

gdzie:

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (przyjmowany z przedziału od 1,2 do 1,6),

I_{zmax} – największa wartość prądu zwarcia trójfazowego na końcu odcinka linii.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

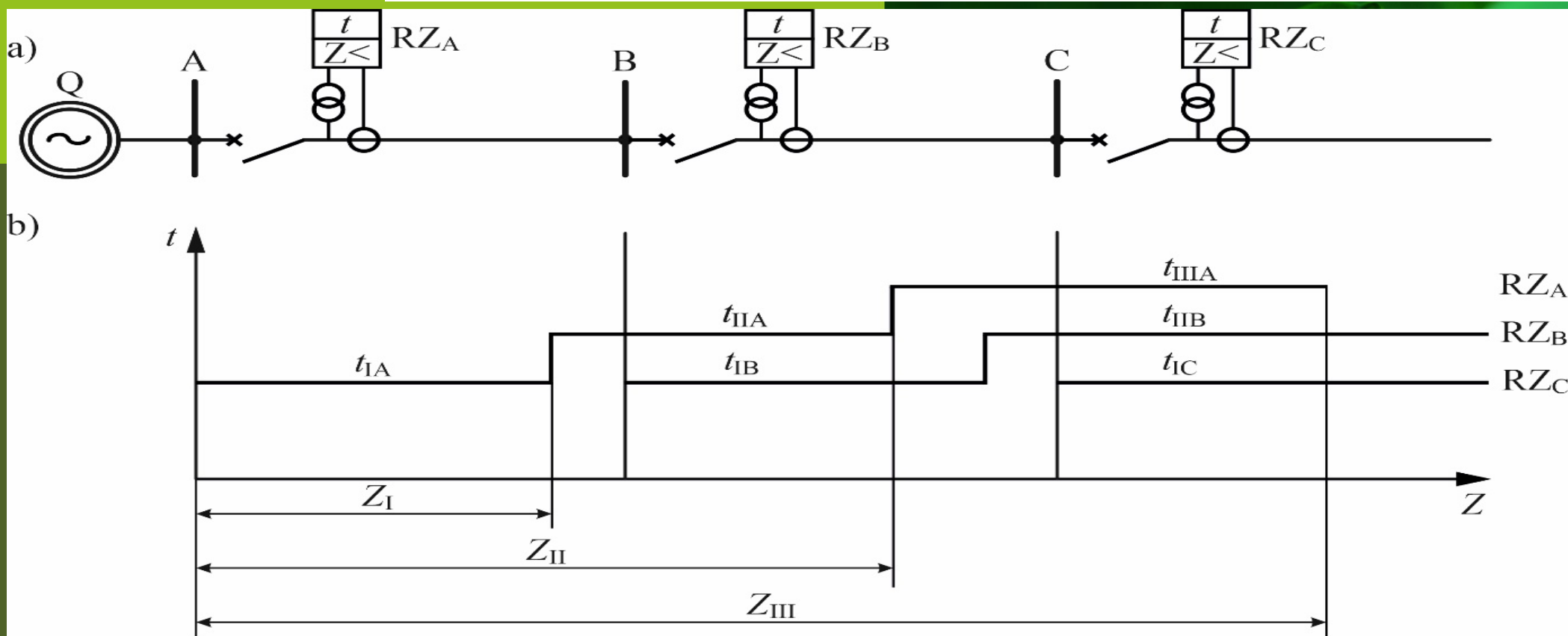


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 190. Schemat przedstawiający zasadę działania zabezpieczenia odległościowego: a) schemat ideowy, b) charakterystyki czasowo-impedancyjne zabezpieczeń, RZ_A , RZ_B , RZ_C - oznaczenie zabezpieczeń odległościowych [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Biorąc pod uwagę zabezpieczenie RZ_A (jako przykład), wartość rozruchową impedancji dla poszczególnych stref działania tego zabezpieczenia, można wyznaczyć z następujących zależności:

$$Z_{IA} \leq k_b \cdot Z_{AB}$$

$$Z_{IIA} \leq k_b \cdot (Z_{AB} + k_b \cdot Z_{BC})$$

$$Z_{IIIA} \leq k_b \cdot (Z_{AB} + Z_{BC} + k_b \cdot Z_{CD})$$

gdzie:

Z_{IA} , Z_{IIA} , Z_{IIIA} – oznaczają impedancje rozruchowe odpowiednio dla I, II i III strefy działania zabezpieczenia,

Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CD} – oznaczają impedancje dla składowej zgodnej poszczególnych odcinków zabezpieczanej linii,

k_b – współczynnik bezpieczeństwa (przyjmowany z przedziału od 0,8 do 0,9 – najczęściej 0,85).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

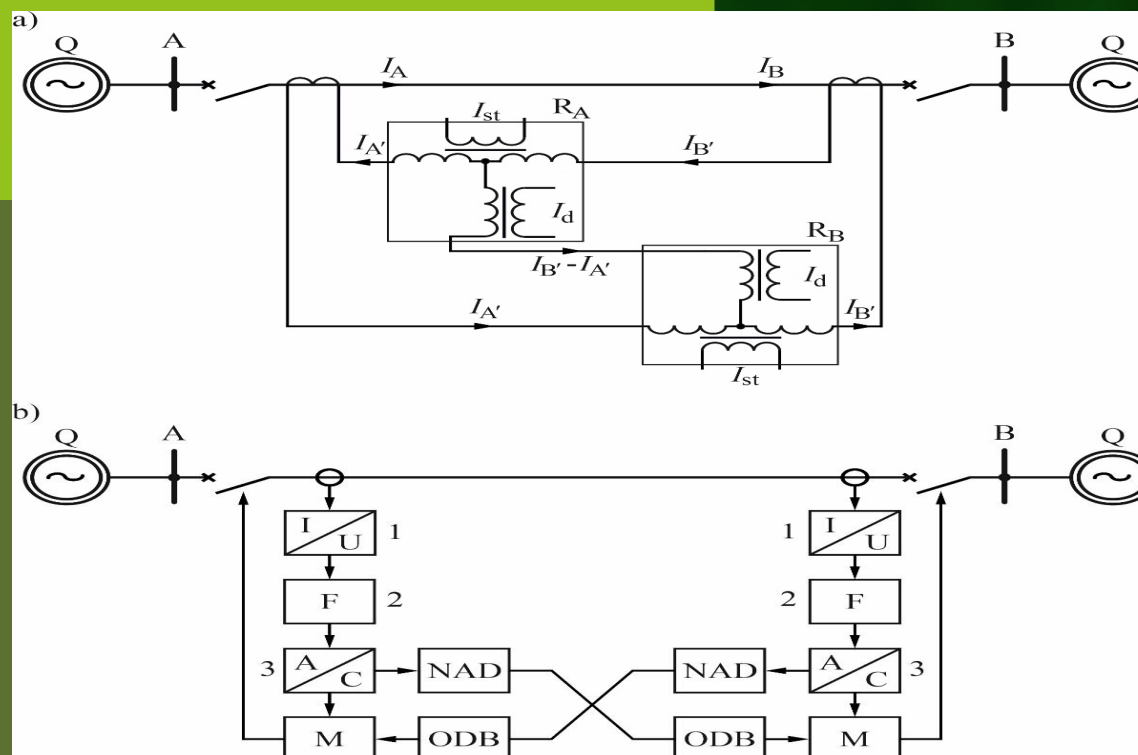


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 191. Układ przedstawiający zabezpieczenie różnicowe z łączem przewodowym (a) i światłowodowym (b), R_A , R_B – przekaźniki, NAD – nadajniki sygnałów, ODB – odbiorniki sygnałów, 1, 2, 3 – poszczególne człony zabezpieczenia w których zachodzi odpowiednio wytwarzanie analogowego sygnału napięciowego, filtrowanie podstawowej harmonicznej oraz przetwarzanie na sygnał cyfrowy [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

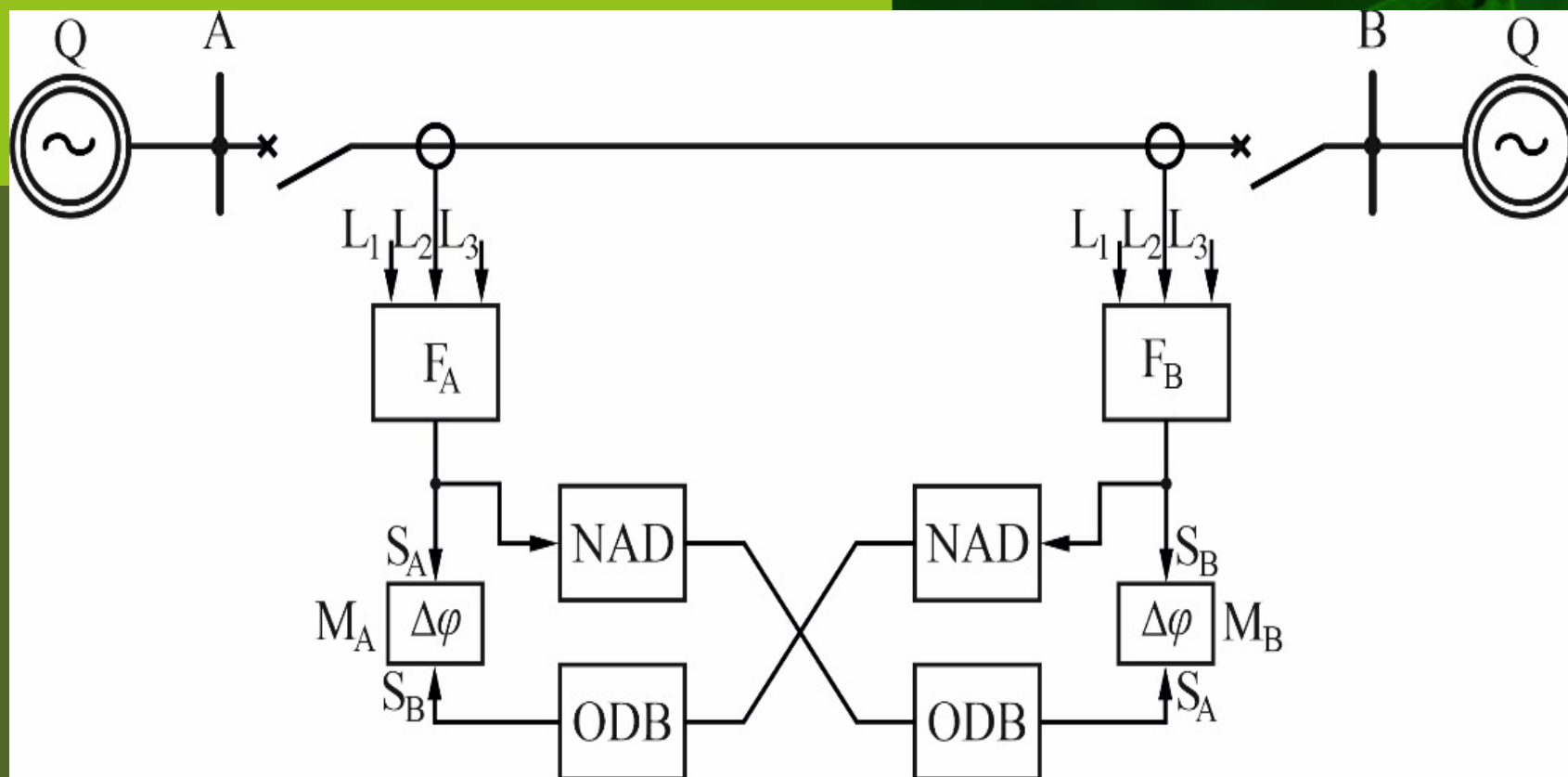


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 192. Uproszczony układ z zabezpieczeniem porównawczo fazowym linii, F_A , F_B – filtry, M_A , M_B – układy pomiarowe, NAD – nadajniki sygnałów, ODB – odbiorniki sygnałów [39]



Rys 193. Uproszczony układ z zabezpieczeniem zerowoprądowym, kierunkowym linii [39]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zabezpieczenia transformatorów



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

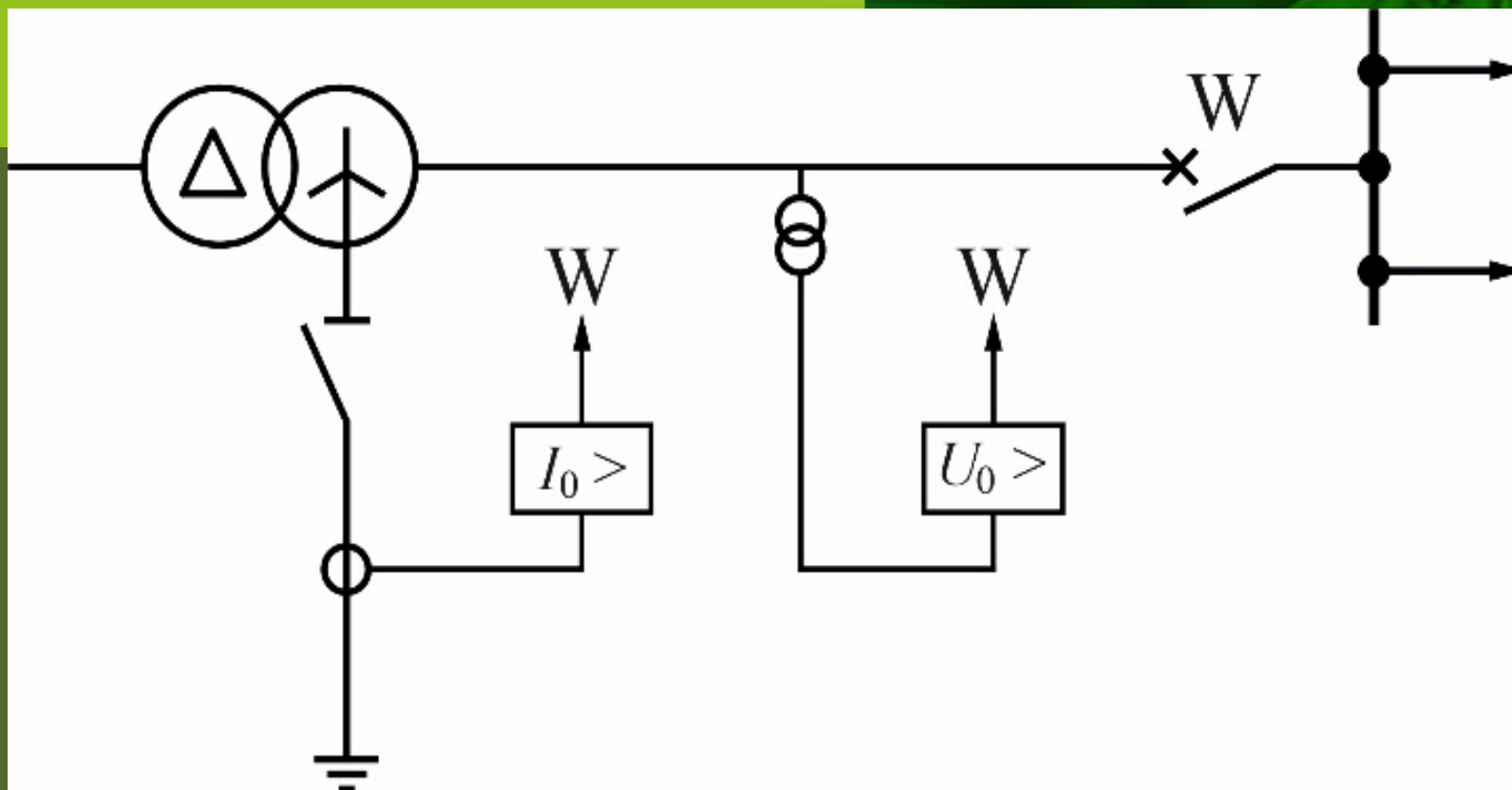


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 194. Uproszczony układ z zabezpieczeniem transformatora od zwarć zewnętrznych doziemnych [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



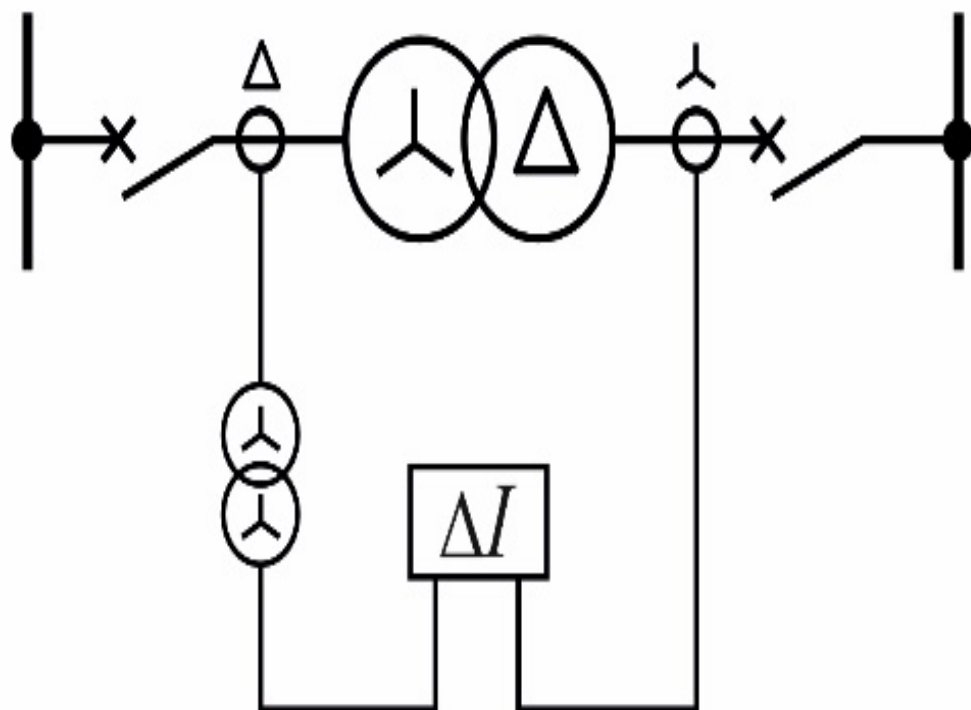
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

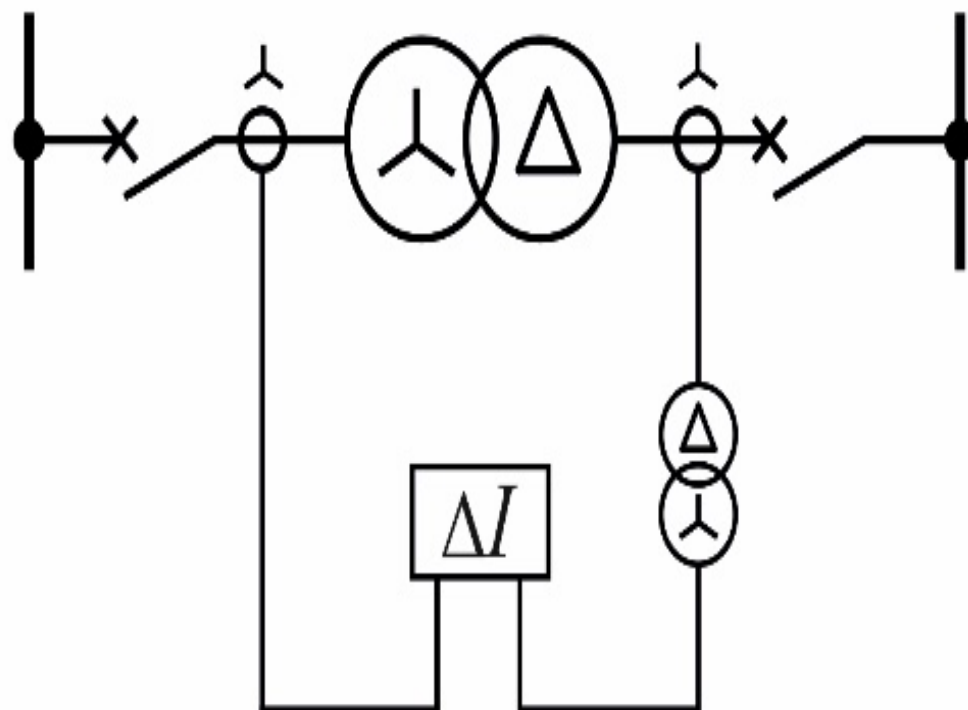


NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

a)



b)



Rys 195. Uproszczony układ z zabezpieczeniem różnicowym wzdłużnym transformatora: a) układ połączeń z przekładnikami prądowymi i wyrównawczymi, b) układ odwzorowujący grupę połączeń uzwojeń transformatora w połączeniach przekładników pośredniczących [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

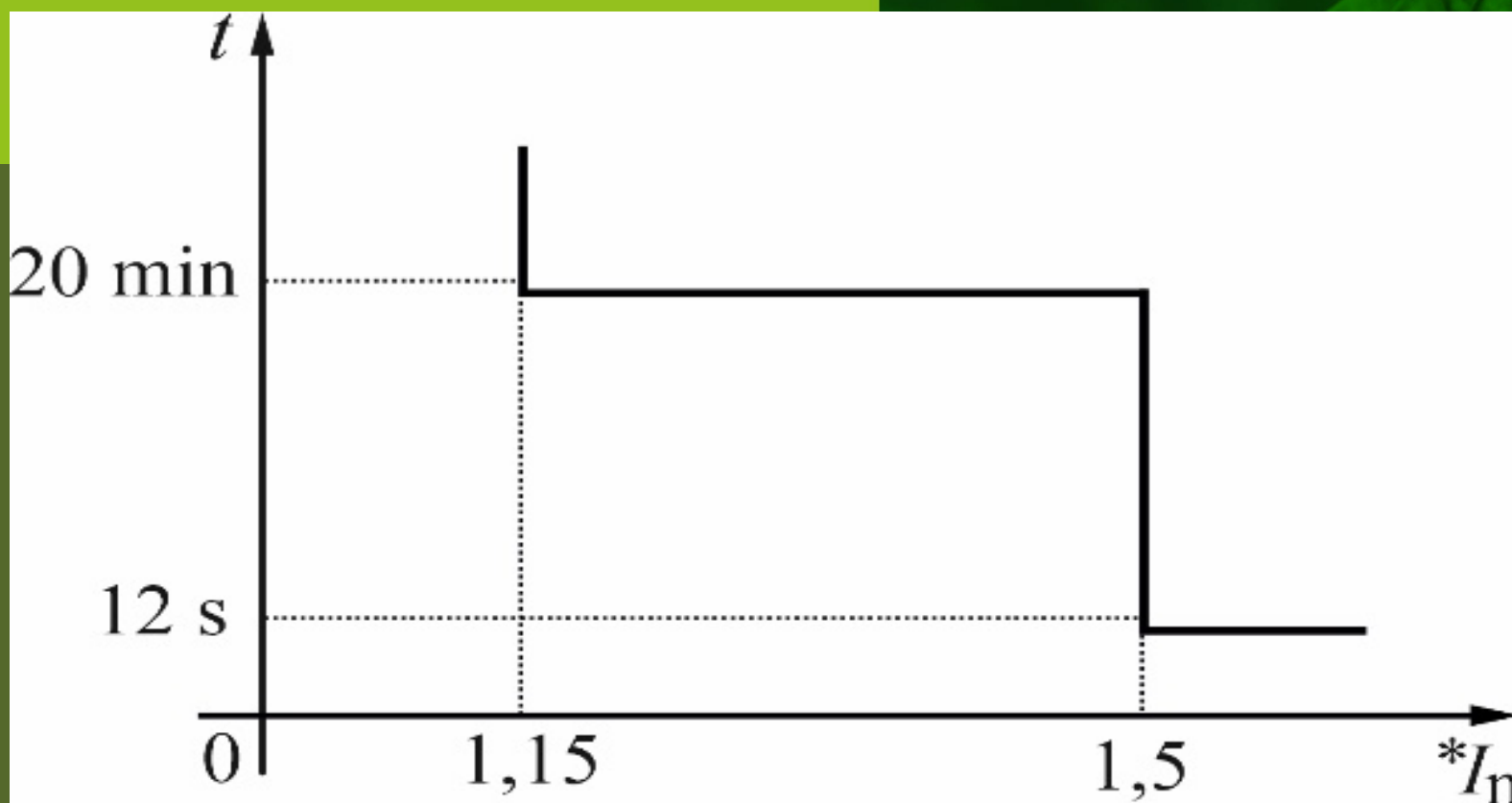


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 196. Charakterystyka czasowo-prądowa dwustopniowa zabezpieczenia nadprądowego zależnego zwłocznego [9]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Zabezpieczenia nadprądowe bezzwłoczne zasilane są z przekładników prądowych, zainstalowanych tak aby umożliwić również ochronę linii zasilającej silnik. Wartość prądu rozruchowego I_r tego zabezpieczenia wyznacza się z zależności:

$$I_r \geq k_b \cdot k_s \cdot I_{rs} \quad \text{ i } \quad I_r \geq \frac{I_{zmin}}{k_c}$$

gdzie:

I_{rs} – składowa okresowa prądu rozruchowego silnika,

I_{zmin} – najmniejsza wartość prądu zwarcia dwufazowego na zaciskach silnika,

k_b – współczynnik bezpieczeństwa, przyjmowany z przedziału od 1,4 do 2,

k_s – współczynnik schematowy,

k_c – współczynnik czułości, równy 2.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Jakość energii elektrycznej



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.





Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

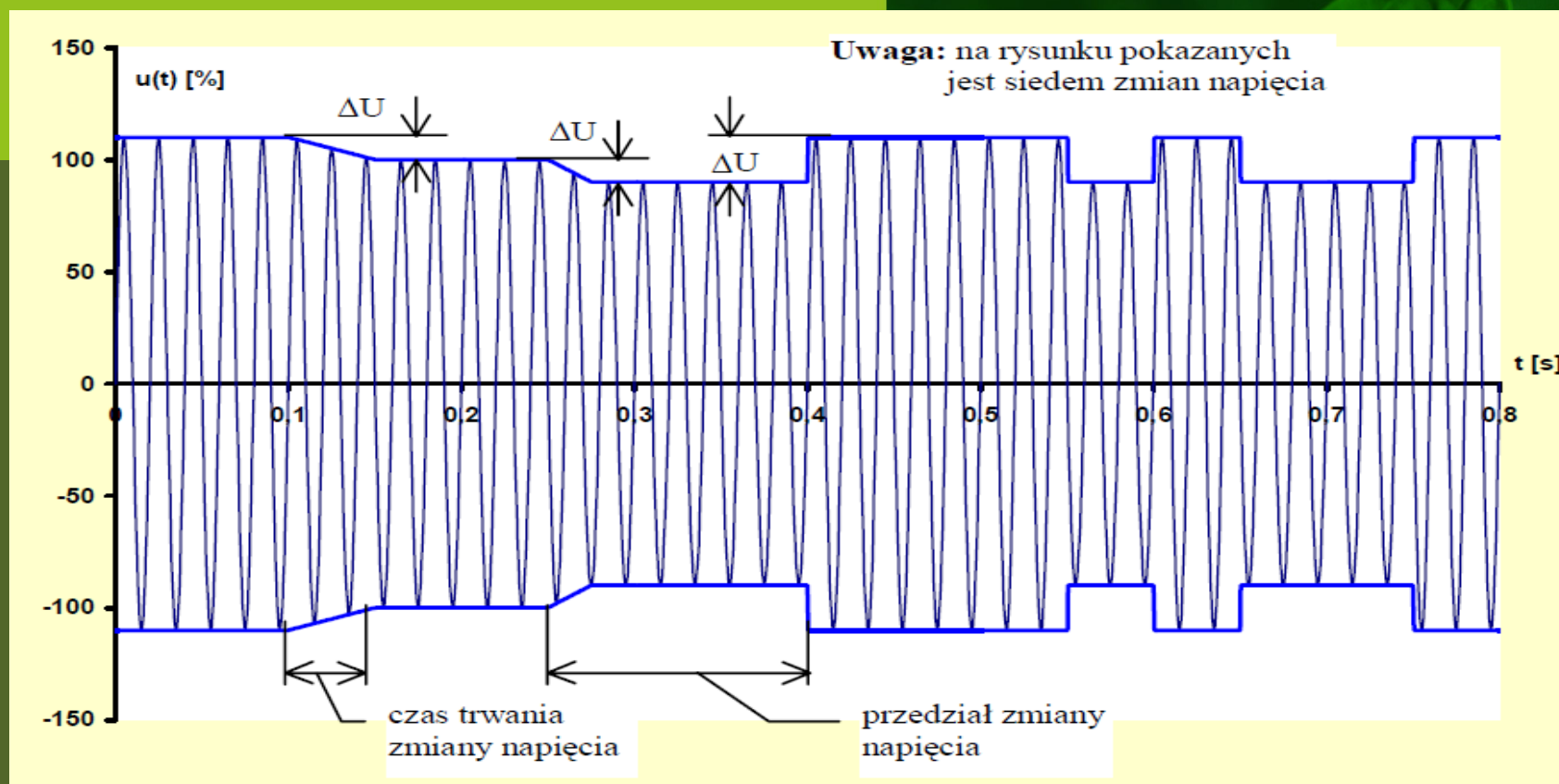


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 198. Graficzna ilustracja gwałtownych zmian napięcia (wahań) [40, 41]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

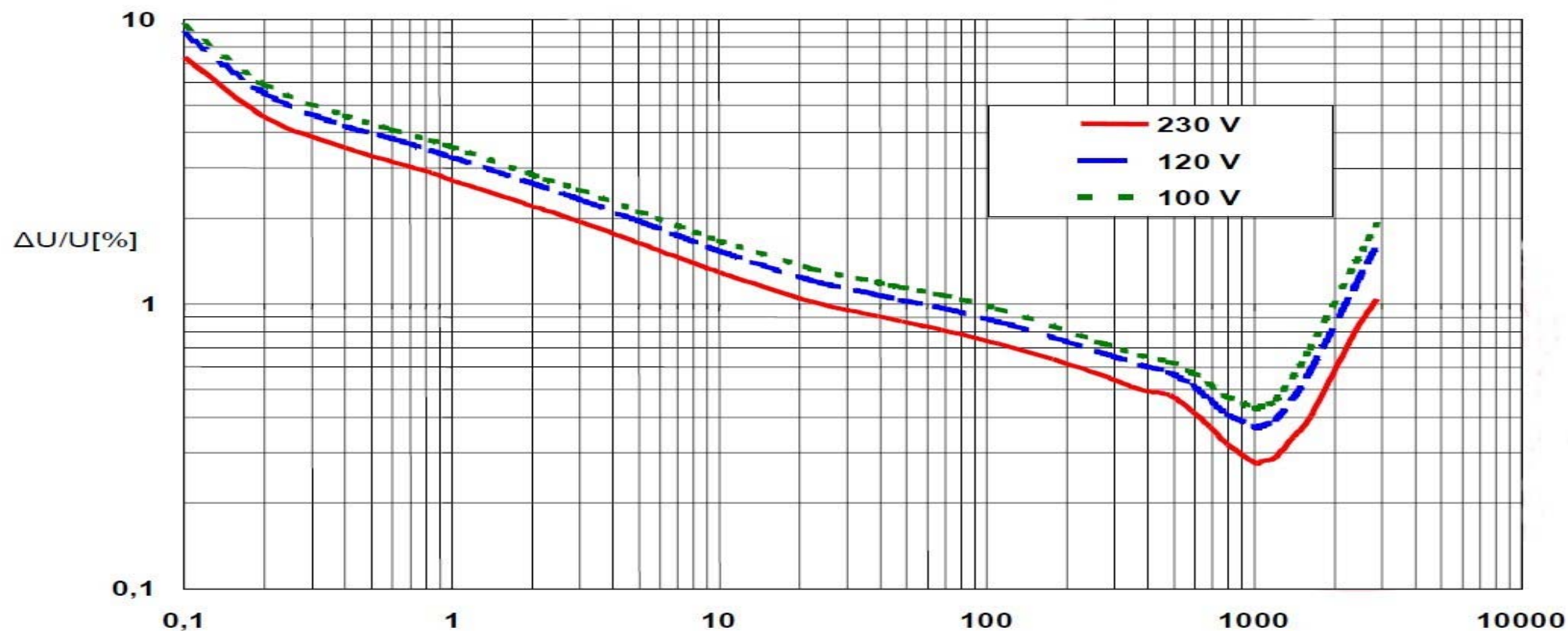


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 199. Wrażliwość oka człowieka na migotanie strumienia światła wywołane wahaniem napięcia zasilającego (linie wskazują wrażliwość graniczną) [40, 41]



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

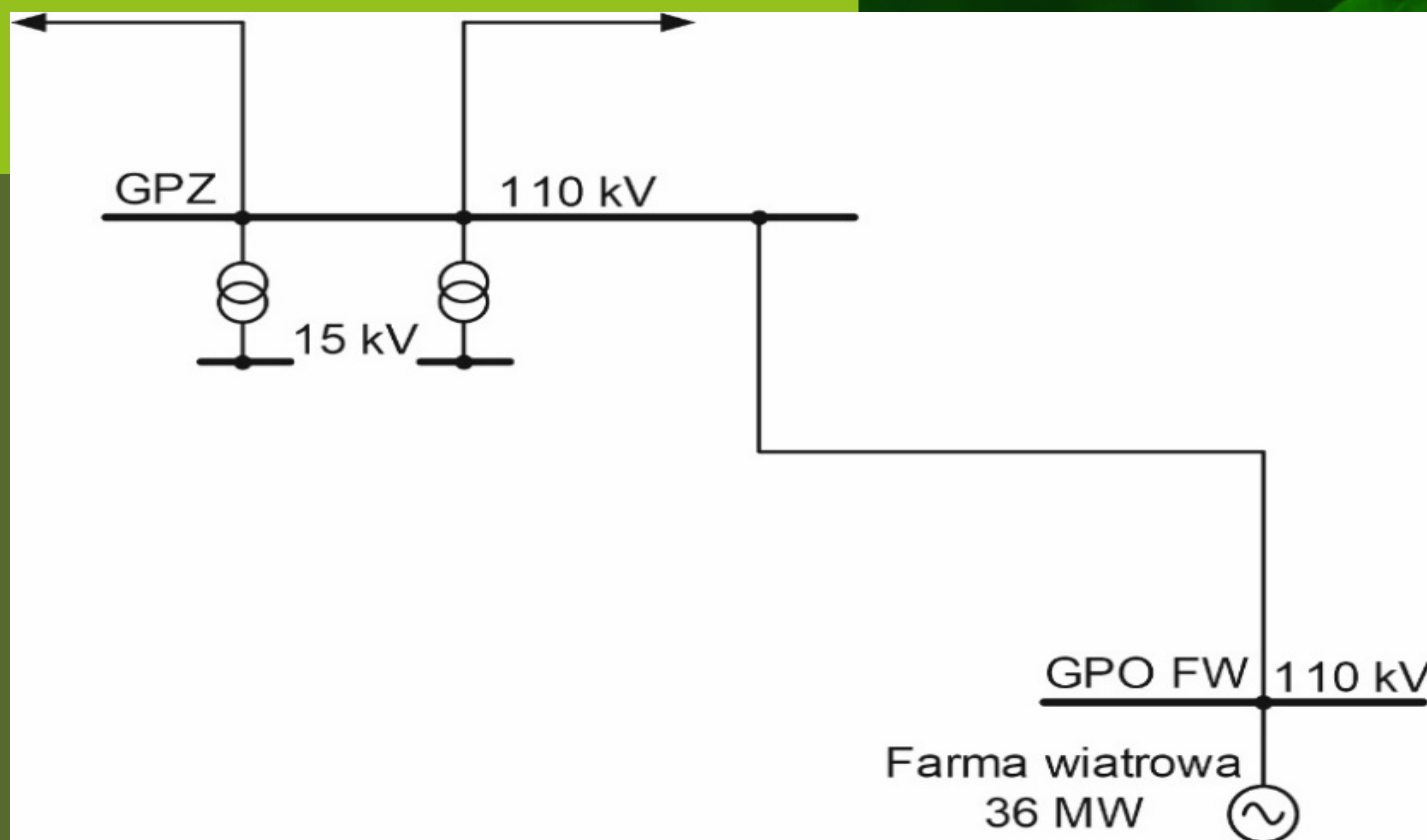


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 200. Schemat układu sieci do analizy jakości napięcia na szynach 110 kV GPZ



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Miarą odkształcenia przebiegu napięcia lub prądu jest całkowity współczynnik odkształcenia napięcia (lub prądu) harmonicznymi THD_U lub THD_I . Współczynnik THD_U wyznacza się z następującej zależności:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^n u_h^2}$$

Gdzie:

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\%$$

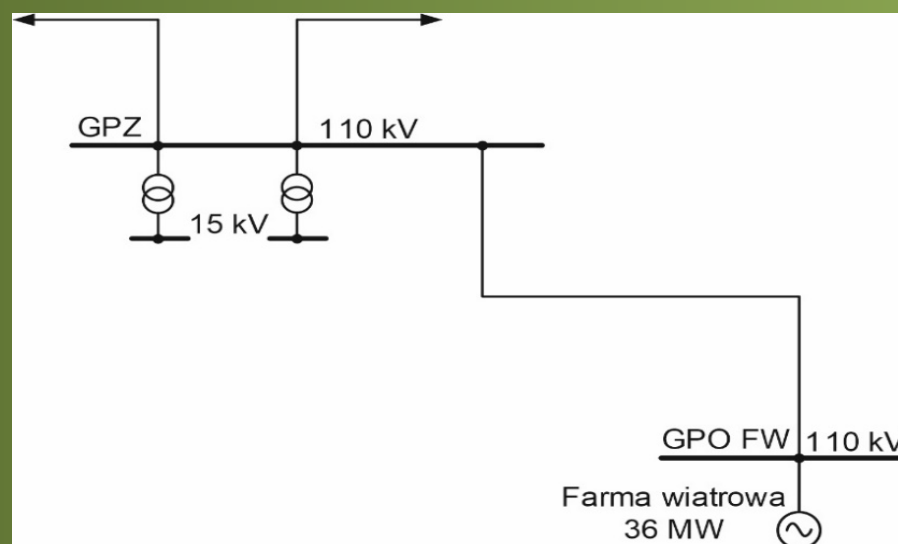
U_1 , U_h , to odpowiednio harmoniczna podstawowa i harmoniczna rzędu h .

Analogiczna zależność dotyczy współczynnika THD_I .



Przykład 26.

W pewnym GPZ 110/15 kV/kV, do szyn 110 kV planowana jest do przyłączenia farma wiatrowa składająca się z 18 turbin wiatrowych o mocy 2 MW każda. Schemat rozpatrywanego układu przedstawiono na Rys 201. Należy wykonać analizę dotyczącą jakości energii w punkcie przyłączenia (PCC).



Rys 201. Schemat układu sieci do przykładu



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Ponieważ PCC stanowi tak naprawdę stacja przelotowa, toteż w celu rozpatrzenia najbardziej niekorzystnego stanu $N-1$, zakłada się stan z wyłączoną jedną linią 110 kV. Następnie, na podstawie wartości napięć w układzie z pracującą i wyłączoną FW oblicza się odchylenie napięcia a także statyczną zmianę napięcia. W niniejszym przykładzie wartość napięcia przed przyłączeniem FW wyniosła $U_1=115,4$ kV natomiast po przyłączeniu FW otrzymano napięcie $U_2=118,3$ kV. Odchylenie napięcia od wartości znamionowej $U_n=110$ kV w obydwu stanach, wyznacza się w sposób następujący:

FW wyłączona:

$$\Delta U = \frac{115,4 - 110}{110} \cdot 100\% = 4,91\%$$

FW załączona:

$$\Delta U = \frac{118,3 - 110}{110} \cdot 100\% = 7,55\%$$

Zmiana napięcia w PCC (wynikająca z przyłączenia FW) wyniesie:

$$\Delta U = 118,3 - 115,4 = 2,9 \text{ kV}$$

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że napięcie mieści się w dopuszczalnych granicach, czyli od $0,9U_n$ do $1,1U_n$.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W drugim kroku wyznacza się tzw. dynamiczne zmiany napięcia, które określają względną zmianę napięcia w trakcie procesów łączeniowych. Wartości S_K oraz ψ_K , uzyskane z obliczeń, wynoszą odpowiednio 676 MVA i 75° . Moc pozorna wynosi 2,1 MVA. Producent turbin podaje, że dla kąta impedancji równego 75° , wskaźnik zmian napięcia elektrowni wiatrowej $k_U(\psi_K)$ wynosi 0,07 przy prędkości startowej, równej 3 m/s i 0,217, przy prędkości znamionowej, równej 12,5 m/s.

Względna, szybka zmiana napięcia przy startowej prędkości wiatru, równej 3 m/s wynosi:

$$d = 100 \cdot k_U(\psi_K) \cdot \frac{S_n}{S_K} = 100 \cdot 0,217 \cdot \frac{2,1}{676} = 0,067\%$$

Względna, szybka zmiana napięcia przy znamionowej prędkości wiatru, równej 12,5 m/s wynosi:

$$d = 100 \cdot k_U(\psi_K) \cdot \frac{S_n}{S_K} = 100 \cdot 0,217 \cdot \frac{2,1}{676} = 0,067\%$$

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dynamiczne zmiany napięcia przyjmują wartości mniejsze od wymaganych (tj. 1,5 %).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Kolejnymi wymaganymi w analizie współczynnikami są współczynniki migotania światła P_{st} oraz P_{lt} . Aby je wyznaczyć konieczna jest wiedza na temat mocy znamionowej pozornej elektrowni wiatrowych S_n , minimalnej mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia S_{Kmin} , kąta impedancji ψ_K oraz liczby łączy N_{10} i N_{120} . Wielkości S_n , S_{Kmin} i ψ_K zostały podane wcześniej. Jeżeli chodzi o maksymalną liczbę operacji łączeniowych przy prędkości startowej, to Producent podaje, że wynosi ona $N_{10}=10$ i $N_{120}=120$. Natomiast przy prędkości znamionowej - $N_{10}=1$ i $N_{120}=12$. W Tab 3. przedstawiono wartości współczynników migotania światła dla pracy ciągłej i operacji łączeniowych, przy różnych średniorocznych prędkościach wiatru v_a .

Tabela 3. Wyniki obliczeń wskaźników emisji migotania światła dla pracy ciągłej i operacji łączeniowych farmy wiatrowej

	Prędkość wiatru	U_n	S_n	S_{Kmin}	ψ_K	$c(\psi_K, v_a)$ z Windtest	P_{stdop}	P_{ltdop}	P_{st}	P_{lt}
		kV	MVA	MVA	-	$v_a = v_{ar}$	-	-	-	-
Praca ciągła	$v_a = 6\text{m/s}$	110	2,1	676	75	2,40	0,35	0,25	0,032	0,032
	$v_a = 7,5\text{m/s}$	110	2,1	676	75	2,42	0,35	0,25	0,032	0,032
	$v_a = 8,5\text{m/s}$	110	2,1	676	75	2,42	0,35	0,25	0,032	0,032
	$v_a = 10,0\text{m/s}$	110	2,1	676	75	2,42	0,35	0,25	0,032	0,032
Operacje łączeniowe	Prędkość wiatru	U_n	S_n	S_{Kmin}	ψ_K	$k_f(\psi_K)$ z Windtest	P_{stdop}	P_{ltdop}	P_{st}	P_{lt}
		kV	MVA	MVA	-	-	-	-	-	-
	startowa 3 m/s	110	2,1	676	75	0,05	0,35	0,25	0,014	0,014
	znamionowa 12,5 m/s	110	2,1	676	75	0,10	0,35	0,25	0,014	0,013

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że współczynniki migotania światła P_{st} oraz P_{lt} przyjmują wartości mniejsze od wymaganych (tj. odpowiednio 0,35 i 0,25).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Kolejnym wymaganiem w analizie jakości energii elektrycznej współczynnikiem, jest współczynnik THD_U . Wyznacza się go w oparciu o harmoniczne prądu (podawane przez Producentów włącznie do 50-tej harmonicznej) oraz tzw. charakterystykę impedancyjną, widzianą z PCC i wykreślaną za pomocą specjalistycznego oprogramowania w oparciu o posiadany model sieci elektroenergetycznej. W oparciu o wymienione dane wykonano obliczenia dla stanu, w którym współczynnik THD_U osiąga wartość maksymalną. W analizowanym układzie, stan ten zachodzi przy wyłączonej jednej linii 110 kV przyłączonej do PCC. W Tab. 4 przedstawiono wartości współczynnika THD_U oraz poszczególnych harmoniczných prądu i napięcia.

Tabela 4. Wyniki analizy odkształcenia napięcia w punkcie przyłączenia (PCC), przy wyłączonej jednej linii 110 kV

Harmoniczna	Częstotliwość	U_n	i_h	$I_{h\Sigma}$	Z_h	u_h	Dop. wartość OSP	Dop. Wartość OSD
rzęd	Hz	kV	%	A	Ω	%	[%]	[%]
2	100	10,5	0,19	0,359	126,51	0,072	1,500	0,700
4	200	10,5	0,11	0,208	245,98	0,081	1,500	0,700
5	250	10,5	0,24	0,453	323,55	0,231	1,500	0,700
23	1150	10,5	0,1	0,045	253,36	0,018	1,500	0,700
46	2300	10,5	0,11	0,049	127,83	0,010	1,500	0,700
$THD_U, \%$						0,256	2,500	2,000

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że współczynnik odkształcenia napięcia THD_U , przyjmuje wartości mniejsze od dopuszczalnych (tj. 2,5% oraz 2% - przykładowe wymaganie szczególne określone przez OSD). Poszczególne wartości harmoniczných napięcia również nie przekraczają wartości dopuszczalnej (tj. 1,5% oraz 0,7% - przykładowe wymaganie szczególne OSD).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

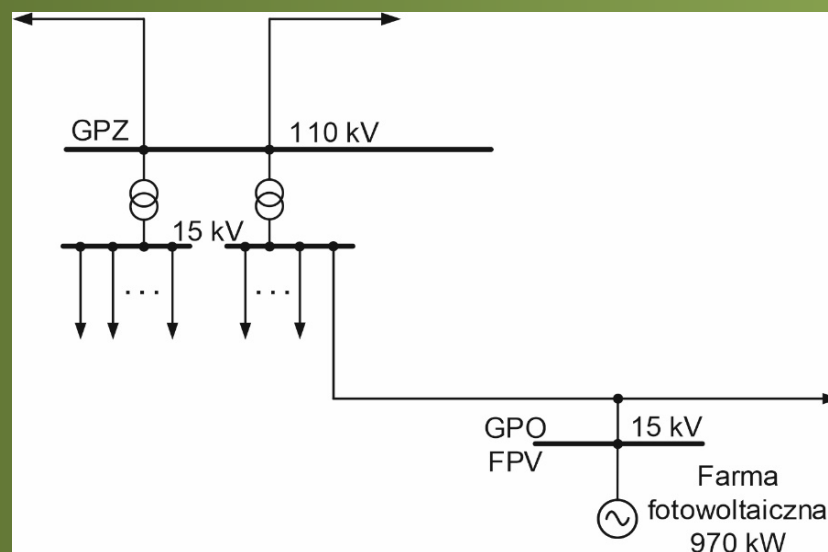
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Przykład 27.

W odległości 9 km od szyn 15 kV w GPZ 110/15 kV, planowana jest do przyłączenia farma fotowoltaiczna o mocy przyłączeniowej 0,97 MW, składająca się z 2160 modułów fotowoltaicznych o mocy 0,45 kW każdy. Uproszczony schemat rozpatrywanego układu przedstawiono na Rys 202. Wykonać analizę dotyczącą jakości energii w punkcie przyłączenia (PCC).



Rys 202. Schemat układu sieci do przykładu



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Ponieważ PCC stanowi tak węzeł w sieci SN, toteż w celu rozpatrzenia najbardziej niekorzystnego stanu $N-1$, zakłada się stan z wyłączonym jednym transformatorem 110/15 kV. Następnie, na podstawie wartości napięć w układzie z pracującą i wyłączoną FPV oblicza się odchylenie napięcia a także statyczną zmianę napięcia. W niniejszym przykładzie wartość napięcia przed przyłączeniem FPV wyniosła $U_1=16,21$ kV natomiast po przyłączeniu FPV otrzymano napięcie $U_2=16,41$ kV. Odchylenie napięcia od wartości znamionowej $U_n=15$ kV w obydwu stanach, wyznacza się w sposób następujący:

FPV wyłączona

$$\Delta U = \frac{16,21 - 15}{15} \cdot 100\% = 0,081\%$$

FPV załączona

$$\Delta U = \frac{16,42 - 15}{15} \cdot 100\% = 0,095\%$$

Zmiana napięcia w PCC (wynikająca z przyłączenia FPV) wyniesie:

$$\Delta U = 16,42 - 16,21 = 0,21 \text{ kV}$$

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że napięcie mieści się w dopuszczalnych granicach, czyli od $0,9U_n$ do $1,1U_n$ (od 13,5 kV do 16,5 kV).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

W drugim kroku wyznacza się tzw. dynamiczne zmiany napięcia, które określają względną zmianę napięcia w trakcie procesów łączeniowych:

$$\Delta U = \frac{U - U_o}{U_n} \cdot 100\% = \frac{16,42 - 16,21}{15} \cdot 100\% = 1,4\%$$

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dynamiczne zmiany napięcia przyjmują wartości mniejsze od wymaganych (tj. 3 %).

Kolejnym wymaganiem w analizie jakości energii elektrycznej współczynnikiem, jest współczynnik THD_U . Wyznacza się go w oparciu o harmoniczne prądu (podawane przez Producentów inwerterów, włącznie do 50-tej harmonicznej) oraz tzw. charakterystykę impedancyjną, widzianą z PCC i wykreślaną za pomocą specjalistycznego oprogramowania na podstawie posiadanego modelu sieci elektroenergetycznej. W tabeli 5 zamieszczono harmoniczne od inwertera, natomiast na Rys. 198 przedstawiono wyznaczoną charakterystykę impedancyjną. prądu W oparciu o wymienione dane obliczono poszczególne harmoniczne napięcia oraz współczynnik THD_U . Transformatory elektrowni fotowoltaicznych posiadają grupę połączeń uzwojeń Dyn5, w związku z czym, w niniejszej analizie pominięto prądy i napięcia harmonicznych podzielnych przez 3 ponieważ nie „przeniosą” się one na stronę SN (przyczynia się do tego połączenie uzwojeń w trójkąt po stronie SN).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Tabela 5. Emisja wyższych harmoniczných prądu od falownika

Harmoniczna	Częstotliwość	i_h	Harmoniczna	Częstotliwość	i_h
rząd	Hz	%	rząd	Hz	%
2	100	0,101	28	1400	0,004
4	200	0,060	29	1450	0,034
5	250	0,325	31	1550	0,035
7	350	0,161	32	1600	0,003
8	400	0,038	34	1700	0,002
10	500	0,045	35	1750	0,026
11	550	0,241	37	1850	0,025
13	650	0,183	38	1900	0,003
14	700	0,021	40	2000	0,005
16	800	0,014	41	2050	0,019
17	850	0,097	43	2150	0,019
19	950	0,114	44	2200	0,003
20	1000	0,016	46	2300	0,002
22	1100	0,006	47	2350	0,016
23	1150	0,049	49	2450	0,014
25	1250	0,056	50	2500	0,003
26	1300	0,006			

Na Rys. 203 przedstawiono widmo harmoniczných napięcia w PCC. Tego rodzaju wykresy są możliwe do wykonania za pomocą odpowiedniego oprogramowania. Prosta oznaczona kolorem czerwonym obrazuje dopuszczalną, całkowitą wartość współczynnika THD (4%), prosta oznaczona kolorem niebieskim obrazuje dopuszczalną wartość współczynnika THD dla poszczególných harmoniczných (1,5%) natomiast prosta oznaczona kolorem zielonym oznacza wartość współczynnika THD wynikającą z obliczeń.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

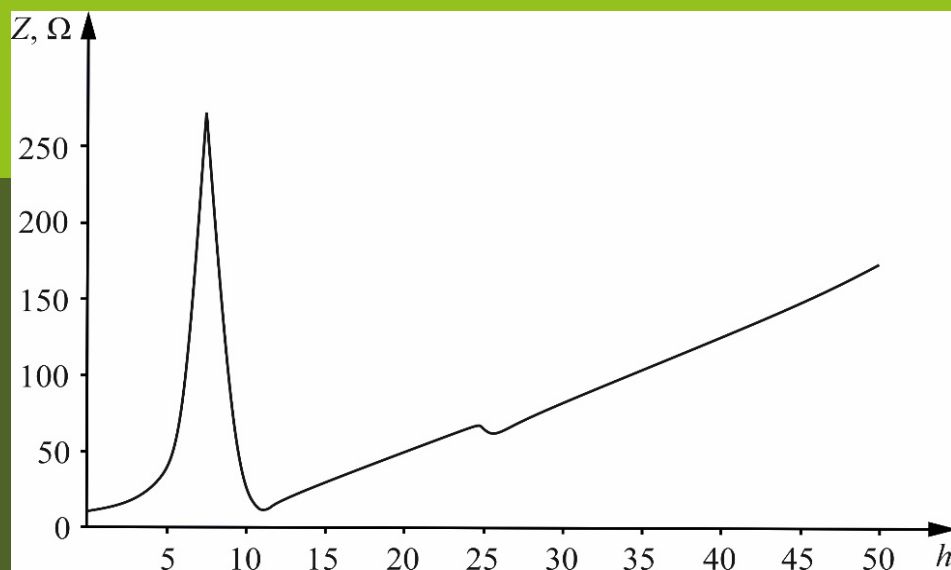


Rzeczpospolita
Polska

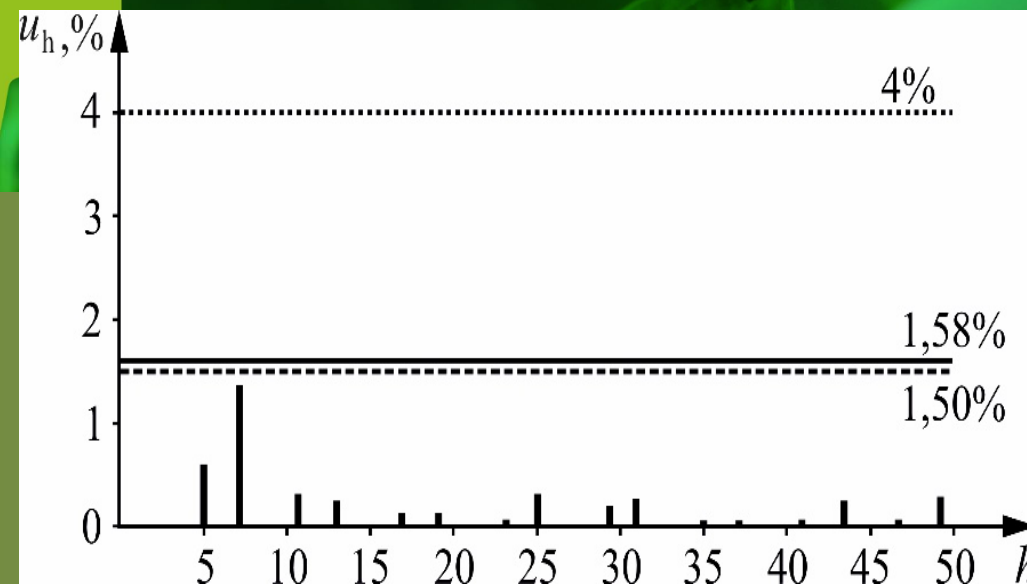
Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



Rys 203. Charakterystyka impedancyjna w PCC



Rys 204. Widmo harmonicznych napięcia w PCC

Na podstawie uzyskanych wyników zobrazowanych na Rys.204 można stwierdzić, że współczynnik odkształcenia napięcia THD_U , przyjmuje wartości mniejsze od wymaganych (tj. 4% - wymaganie OSD). Poszczególne wartości harmonicznych napięcia również nie przekraczają wartości dopuszczalnej (tj. 1,5% - wymaganie OSD).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Bibliografia



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

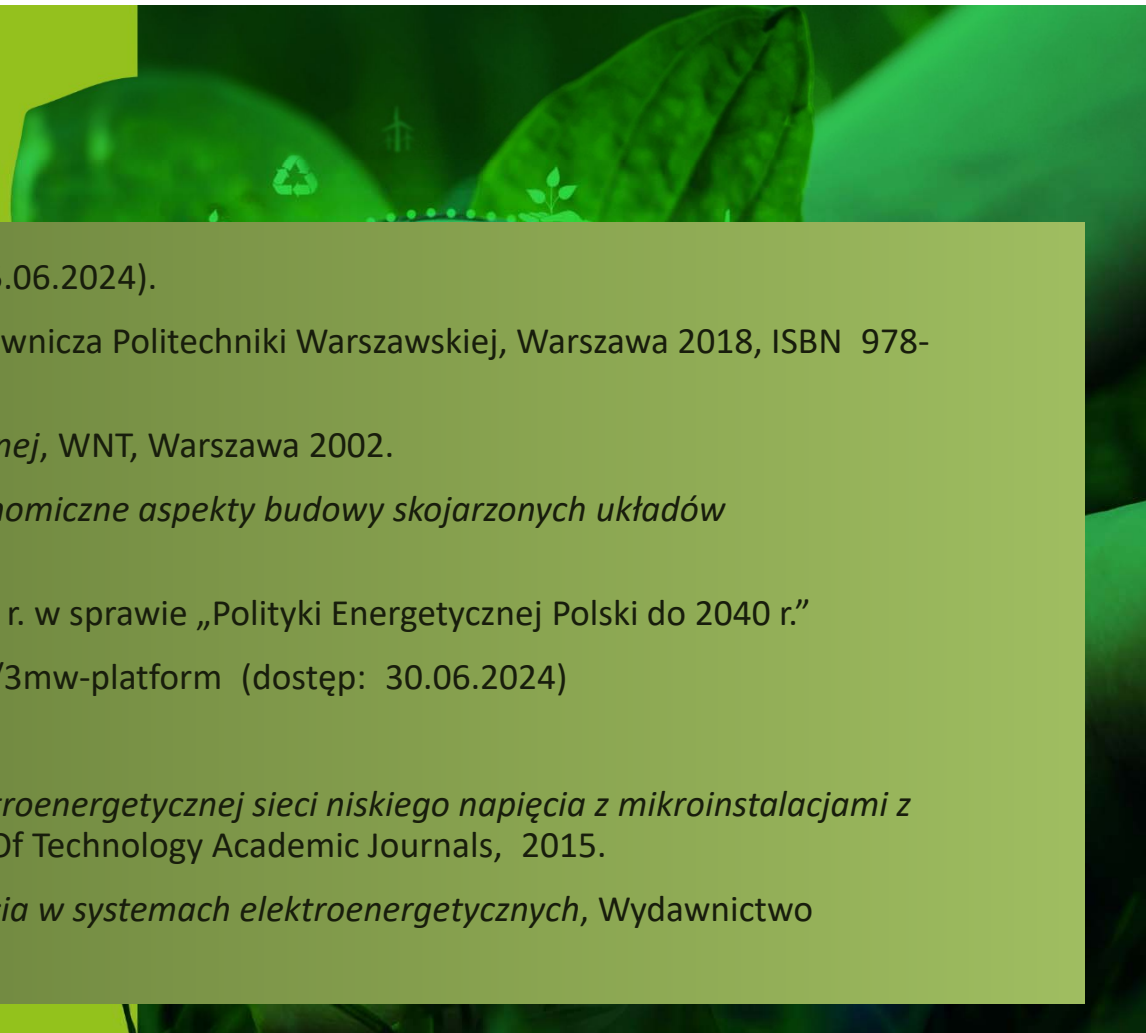


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



1. <https://www.energyinst.org/statistical-review> (dostęp: 25.06.2024).
2. Paska J., *Wytwarzanie energii elektrycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018, ISBN 978-83-7814-813-5.
3. Lewandowski M., *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, WNT, Warszawa 2002.
4. Skorek J., Kalina J., *Mikrokogeneracja – techniczne i ekonomiczne aspekty budowy skojarzonych układów energetycznych*, Biuletyn miesięczny PSE S.A. 2000, 8.
5. Uchwała nr 22/2021 Rady Ministrów z dnia 2 lutego 2021 r. w sprawie „Polityki Energetycznej Polski do 2040 r.”
6. <https://www.gevernova.com/wind-power/onshore-wind/3mw-platform> (dostęp: 30.06.2024)
7. PSE S.A., Dokument PRSP 2025–2034, 2024
8. Cieślik S., *Analiza symulacyjna strat mocy czynnej w elektroenergetycznej sieci niskiego napięcia z mikroinstalacjami z podobciążeniową regulacją napięcia*, Poznan University Of Technology Academic Journals, 2015.
9. Kacejko P., Machowski J., Pijarski P., Smolarczyk A., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2022, ISBN 9788301220747



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

10. Machowski J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007, ISBN 978-83-7207-689-2.
11. Machowski J., *Regulacja systemu elektroenergetycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2023, ISBN 978-83-8156-550-9.
12. Tleis N, *Power systems modelling and fault analysis: Theory and practice*, Elsevier Academic Press, London, United Kingdom 2019, ISBN 9780128151174
13. Machowski J., Lubośny Z., *Stabilność systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018, ISBN 978-83-01-20006-0.
14. Eltrim Kable, Karty katalogowe, <https://www.eltrim.com.pl/karty-katalogowe> (dostęp: 05.05.2023)
15. ENECONSULTING, Przewody do linii 220 kV i 400 kV, <http://eneconsulting.pl/przewody-do-linii-220-i-400-kv/> (dostęp: 21.05.2023).
16. Zircon Poland, Przewody napowietrzne i kable wysokich napięć, <https://www.zircon.pl/przewody-napowietrzne-i-kable-wysokich-napiec.html> (dostęp: 05.05.2023).
17. NPA Skawina, Nowoczesne produkty aluminiowe, <https://www.npa.pl/> (dostęp: 11.05.2023).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



18. NKT, *Kable uniwersalne*, <https://www.nkt.com.pl/produkty-rozwiazania/srednie-napiecie/kable-uniwersalne> (dostęp: 05.05.2023).
19. NKT, *Przewody i kable niskiego napięcia*, <https://www.nkt.com.pl/produkty-rozwiazania/niskie-napiecie> (dostęp: 22.05.2023).
20. Kamrat W., *Budownictwo elektroenergetycznej infrastruktury przesyłowej i dystrybucyjnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2022, ISBN 9788301223021.
21. Strunobet-Migacz, *Wyroby dla elektroenergetyki i teletechniki*, <https://www.strunobet.pl/> (dostęp: 18.05.2023).
22. *IEEE Guide for the Application of Protective Relaying for Phase-Shifting Transformers*, IEEE Power and Energy Society 2018 (IEEE Std C37.245).
23. PWN, *Internetowa encyklopedia PWN*, <https://encyklopedia.pwn.pl/> (dostęp: 05.09.2023).
24. Kacejko P., Pijarski P., *Podstawy Elektroenergetyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2024, ISBN 978-83-01-23859-9.
25. Pijarski P., Kacejko P., Adamek S., Janiga K., *Problemy obliczeniowe elektroenergetyki*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2023, ISBN 978-83-7947-578-0
26. NKT, *Kable średniego napięcia*, <https://www.nkt.com.pl/produkty-rozwiazania/srednie-napiecie> (dostęp: 22.05.2023).



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

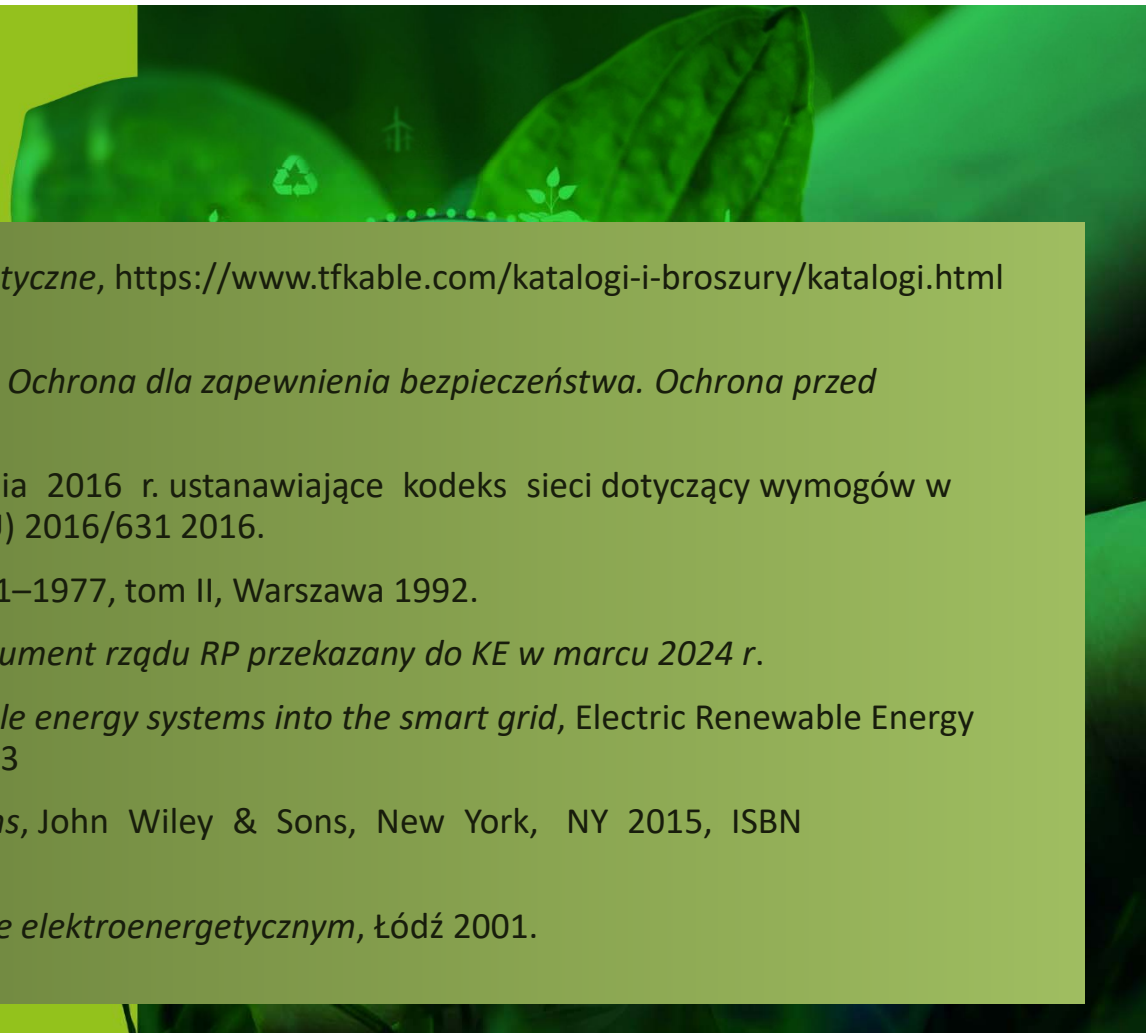


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



27. TELE-FONIKA Kable S.A., *Kable i przewody elektroenergetyczne*, <https://www.tfkable.com/katalogi-i-broszury/katalogi.html> (dostęp: 05.05.2023).
28. PKN, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia: Część 4–41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym* 2019 (PN-HD 60364-4-41).
29. Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci, (EU) 2016/631 2016.
30. *Historia Elektryki Polskiej*, tomy I–V. WNT, Warszawa 1971–1977, tom II, Warszawa 1992.
31. *Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. dokument rządu RP przekazany do KE w marcu 2024 r.*
32. Putrus G., Bentley E., *Integration of distributed renewable energy systems into the smart grid*, Electric Renewable Energy Systems, Elsevier 2016, 487–518, ISBN 9780128044483
33. Das J., *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, John Wiley & Sons, New York, NY 2015, ISBN 9781118861622.
34. Kanicki A., *Wyznaczanie wielkości zwarciovych w systemie elektroenergetycznym*, Łódź 2001.



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

35. Kujaszczyk S., *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*. Praca zbiorowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004, ISBN 83-7207-506-9.
36. PGE Dystrybucja S.A., *Kryteria oceny możliwości przyłączenia oraz wymagania techniczne dla źródeł energii przyłączanych do sieci SN Operatora Systemu Dystrybucyjnego*, Poznań 2014, <https://pgedystrybucja.pl/> (dostęp: 02.05.2024).
37. Kremens Z., Sobierajski M. *Analiza systemów elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1996, ISBN 83-204-2060-1.
38. Kothari D., Nagrath I., *Modern power system analysis*, Tata McGraw-Hill Pub. Co, New Delhi 2003, ISBN 978-0-07-049489-3.
39. Bowers B., *A history of electric light & power*, Londyn 1982, ISBN 978-0906048689.
40. Glover F., *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*, Computers & Operations Research 1986, 13, 533–549.
41. Glover F., *Tabu Search—Part I*. ORSA Journal on Computing 1989, 190–206.
42. PWN, Internetowa encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/> (dostęp: 05.09.2023).
43. Korab R., *Optymalizacja operatorstwa przesyłowego w krajowym systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011, ISBN 978-83-7335-818-8.



Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego

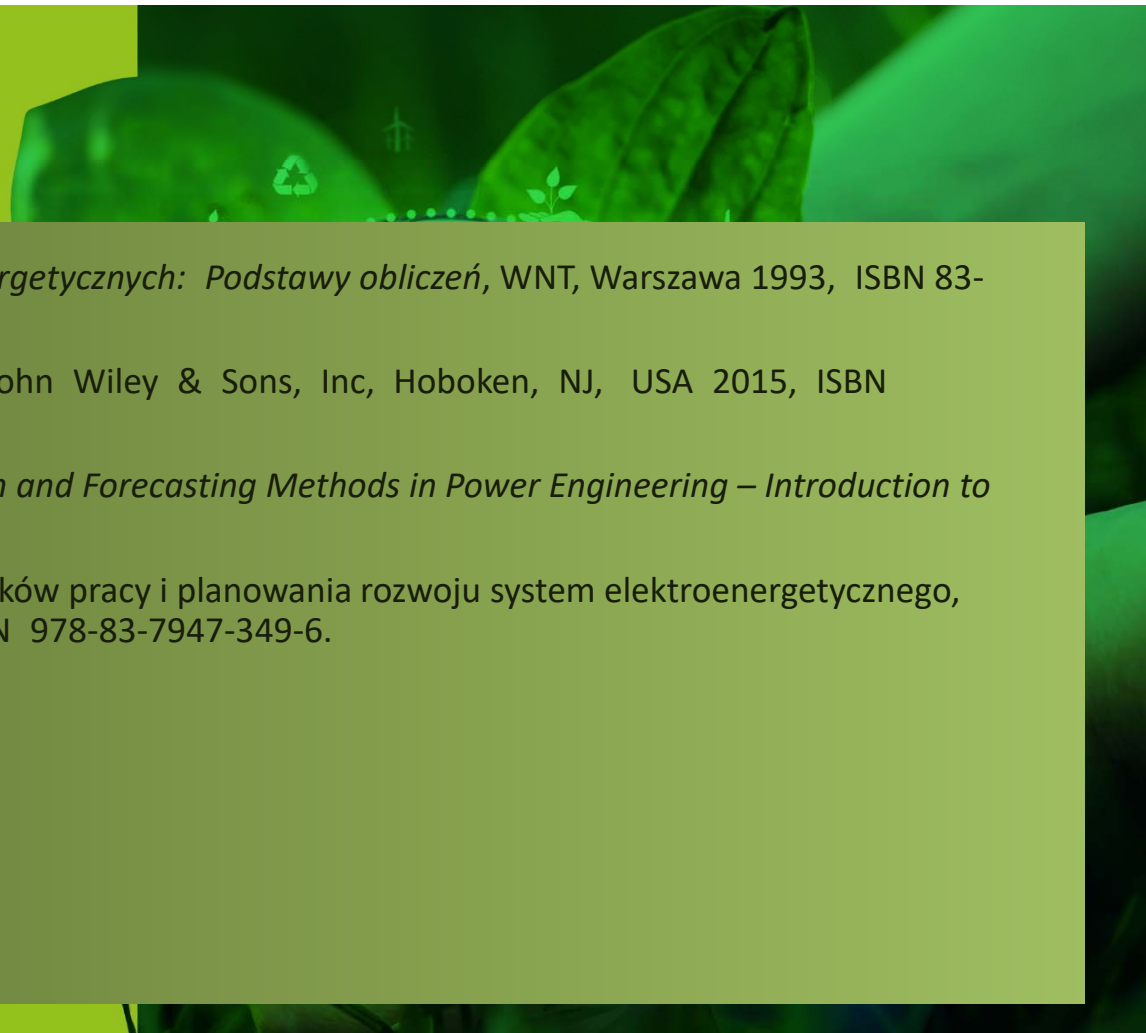


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju



44. Kacejko P., Machowski J., *Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych: Podstawy obliczeń*, WNT, Warszawa 1993, ISBN 83-204-1510-1.
45. *Optimization of power system operation*, (red.) Zhu J., John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA 2015, ISBN 9781118887004.
46. Pijarski P., Kacejko P., Miller P., *Advanced Optimisation and Forecasting Methods in Power Engineering – Introduction to the Special Issue*, *Energies* 2023, 16, 2804.
47. Pijarski P., *Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowania rozwoju system elektroenergetycznego*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2019, ISBN 978-83-7947-349-6.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko
dr inż. Sylwester Adamek
mgr inż. Adrian Belowski

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki,
Katedra Elektroenergetyki



Dziękuję za uwagę



POLITECHNIKA
LUBELSKA

Projekt pn. „POLLUB zieloną transformację” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.