

WARUNKI WYBORU TURBIN I GENERATORÓW ELEKTROWNI WIATROWYCH

Autor: Wojciech Jarzyna

(„Rynek Energii” – sierpień 2011)

Słowa kluczowe: turbiny i układy generatorów elektrowni wiatrowych, czynniki wyboru turbin i generatorów elektrowni wiatrowych

Streszczenie. Przystępując do budowy elektrowni wiatrowej inwestor musi w pierwszej kolejności dokonać właściwego wyboru modelu realizowanej elektrowni. Na rynku dostępnych jest szereg ofert różniących się istotnymi parametrami konstrukcyjnymi. Wybrany typ elektrowni powinien uwzględniać przede wszystkim lokalne parametry klimatyczne oraz właściwości sieci w punkcie przyłączenia. W artykule omówiono parametry elektrowni i czynniki środowiskowe, które mają istotny wpływ na wybór. Wynikiem rozważań jest określenie cech elektrowni wiatrowej przewidzianych do instalacji w różnych warunkach terenowych i przyłączeniowych oraz wskazanie najważniejszych cech budowy, które powinny być uwzględnione podczas wyboru typu elektrowni.

1. WPROWADZENIE

Szeroka oferta rynkowa elektrowni wiatrowych, może budzić wśród inwestorów pewne zakłopotanie. W określonej grupie modeli o zbliżonej mocy nominalnej można znaleźć zróżnicowaną ofertę. Proponowane rozwiązania mogą różnić się między innymi konstrukcją mechaniczną jak i aerodynamiczną oraz zastosowanymi układami generatorów elektrycznych. Inwestor stoi więc przed dylematem wyboru optymalnego typu elektrowni wiatrowej. Dobrze aby wybór ten był świadomy i odpowiadał istniejącym w miejscu lokalizacji inwestycji warunkom terenowym, klimatycznym i technicznym. Uwzględnienie ww. czynników gwarantuje ograniczenie kosztów zakupu oraz kosztów eksploatacyjnych przedsięwzięcia. Niejednokrotnie skomplikowane układy regulacji charakteryzujące się wysokim poziomem technologicznym zastosowanych rozwiązań mogą okazać się inwestycjami „na wyrost”, zwłaszcza w odniesieniu do obecnych, często przestarzałych, możliwości kontroli i sterowania w systemie energetycznym. Z drugiej strony nowoczesne rozwiązania zdecydowanie lepiej współpracują z siecią w stanach przejściowych. Przedstawiona w dalszej części analiza pozwala właściwie ocenić wybór technologii układów generacji.

2. TECHNOLOGICZNE ELEMENTY WYBORU

Współcześnie dominującą konstrukcją elektrowni wiatrowych są siłownie z poziomą osią obrotu. Ich moce znamionowe przekraczają nawet 7 MW. Tak wysokie wartości mocy wymagają spełnienia coraz wyższych wymagań w zakresie jakości i niezawodności stosowanych urządzeń [6]. Wzrost tych wymagań obserwuje się zarówno po stronie układów aerodynamicznych, jak i konstrukcji mechanicznej oraz podzespołów elektrycznych.

Interesujące rozwiązania turbin wiatrowych można dostrzec analizując modele o tej samej mocy produkowane przez jednego producenta. Podstawowe różnice, które cechują zastosowane rozwiązania to znamionowa prędkość wiatru i rozpiętość łopat. Ponadto, modelom tym towarzyszy wielowariantowa oferta wież o różnych wysokościach. Inwestor stoi więc przed koniecznością wyboru, które rozwiązanie da najlepsze efekty dla przyjętej lokalizacji inwestycji [3, 4, 6]. Turbinom o większych rozpiętościach łopat, przy zachowaniu tej samej mocy, odpowiada niższa nominalna prędkość wiatru. Z uwagi na przeciążenia mechaniczne, istotne są własności elektrowni podczas pracy przy szybkich zmianach

wiatru oraz jego turbulencjach. Cechy te określone są przez podklasy A, B, C [8]. Odpowiedni wybór modelu elektrowni ma więc pierwszoplanowe znaczenie ze względu na bezpieczeństwo działania oraz efektywność pracy, a w konsekwencji minimalizację kosztów eksploatacji.

Systemy układu generacji znacząco różnią się między sobą. Najczęściej spotykane rozwiązania można podzielić na dwie grupy, tj.: „B”- generatorów bezpośrednio załączanych do sieci oraz „P” - generatorów współpracujących z układem przekształtników energoelektronicznych. W prezentowanych rozważaniach pominięto rozwiązania rzadko spotykane, które nie zyskały dużej popularności.

B1. Generatory indukcyjne klatkowe bezpośrednio przyłączane do sieci. Obecnie standardem jest zastosowanie przekształtnikowego układu do łagodnego przyłączenia elektrowni do sieci.

B2. Generatory indukcyjne pierścieniowe bezpośrednio przyłączane do sieci z regulowaną rezystancją w obwodzie wirnika.

P1. Generatory indukcyjne klatkowe z przekształtnikami AC/DC i DC/AC.

P2. Maszyna dwustronnie zasilana zbudowana na bazie generatora indukcyjnego pierścieniowego z układem przekształtników o sterowaniu wektorowym po stronie wirnika.

P3. Generator synchroniczny z przekształtnikami AC/DC i DC/AC. Najczęściej w takich rozwiązaniach, jako generator stosuje się wielobiegunowe wolnoobrotowe maszyny synchroniczne z biegunami trwałymi.

Dodatkowe informacje dotyczące konstrukcji i zasad działania wymienionych układów można znaleźć między innymi w publikacjach [2, 5, 7].

2.1. Układy generatorów bezpośrednio przyłączonych do sieci

Prędkość obrotowa generatorów bezpośrednio przyłączonych do sieci jest stała (generatory synchroniczne) lub w przybliżeniu stała (generatory indukcyjne klatkowe). Jest ona zdeterminowana przez częstotliwość sieci, liczbę par biegunów generatora oraz stopień przekładni mechanicznej. Niewielkie, kilkuprocentowe zmiany prędkości generatorów indukcyjnych oscylują w pobliżu prędkości synchronicznej ω_0 , a ich wartość zależy od s_N - znamionowego poślizgu maszyny [1, 2].

Oceniając maszynę indukcyjną ze względu na straty w obwodach wirnika łatwo zauważyć, że im mniejsza jest wartość poślizgu s_N , tym maszyna ma mniejsze straty w uzwojeniach wirnika i zakres zmian prędkości jest mniejszy. Jednak taka stabilizacja prędkości wpływa negatywnie na warunki współpracy generatora z układem przeniesienia napędu powodując [1, 2]:

- powstawanie drgań w przekładni mechanicznej,
- przeniesienie wahań momentu turbiny na wahania generowanej mocy, a w konsekwencji i napięcia,
- pracę turbiny z dużą zmiennością współczynnika wykorzystania energii wiatru c_p , co powoduje niską średnią efektywność przetwarzania [1, 2, 5].

Pierwsze dwa niekorzystne warunki pracy ulegają pewnej poprawie przy zastosowaniu generatorów asynchronicznych pierścieniowych z modulowaną rezystancją w obwodzie wirnika. Takie rozwiązanie ogranicza drgania, co korzystnie wpływa na żywotność przekładni i hałas generowany przez elektrownię. Niestety rozwiązanie to ma pomijalnie mały wpływ na poprawę efektywności wykorzystania energii wiatru powodując wzrost strat regulacyjnych w obwodach wirnika.

2.2. Układy generatorów przyłączonych do sieci przez przekształtniki energoelektroniczne

Układy elektrowni wiatrowych przyłączonych przez przekształtniki energoelektroniczne należą do bardzo obszernej grupy zmiennoprędkościowych elektrowni wiatrowych. Takie rozwiązania w znaczący sposób mogą ograniczać niekorzystne efekty pracy wymienione w podrozdziale 2.1. Podstawowym pozytywnym efektem, w tej grupie układów, jest poprawa efektywności pracy uzyskiwana dzięki zastosowaniu sterowania nadążnego, śledzącego optymalne pod względem energetycznym warunki obciążenia turbiny. Poza pozytywnym efektem energetycznym, rozwiązania te stwarzają dobre warunki do redukcji naprężeń mechanicznych i zmniejszenia współczynnika migotania napięcia [8, 2, 1].

Najnowsze układy przekształtnikowych systemów generacji charakteryzują szerokie możliwości regulacji chwilowej wartości generowanej mocy czynnej i biernej. Pozwala to na kształtowanie kąta mocy, co korzystnie wpływa na stabilizację napięcia w sieci. Takie układy mogą aktywnie uczestniczyć w zrównoważeniu mocy biernej i ograniczyć koszty związane z zakupem dodatkowych kompensatorów i filtrów. Rozwiązania te ograniczają również niekorzystne efekty przejściowe w stanach dynamicznych oraz gwarantują pracę w okolicach maksymalnych wartości współczynnika wykorzystania energii wiatru c_p [1, 2, 5, 7, 8].

3. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE WYBÓR ELEKTROWNI WIATROWEJ

Czynniki determinujące wybór elektrowni wiatrowych to głównie uwarunkowania środowiskowe, klimatyczne i elektryczne. Ich respektowanie jest niezbędne w celu zapewnienia bezpieczeństwa działania oraz zachowania wysokiej niezawodności i dużej efektywności ekonomicznej.

Ograniczenia środowiskowe i klimatyczne to np.:

- ograniczenia lokalne wynikające z planów zagospodarowania i ochrony środowiska,
- warunki glebowe,
- warunki wietrzności.

Pierwszy warunek jest konieczny do spełnienia. Warunek drugi musi być uwzględniony na etapie projektowania fundamentów. Warunku trzeciego można nie spełnić, ale skutkuje to wzrostem kosztów funkcjonowania, zwiększonym prawdopodobieństwem pojawienia się awarii czy wydłużonym czasem zwrotu poniesionych nakładów finansowych. Takie problemy mogą wynikać ze sporządzenia pobieżnej oceny warunków wietrzności, która głównie sprowadza się tylko do określenia czy średnioroczna wartość prędkości wiatru zapewniać będzie wymaganą stopę zwrotu. Na dalszy plan niestety schodzą często inne wielkości ujęte w normie dotyczącej budowy elektrowni wiatrowych:

- zmienność wiatru,
- jego maksymalne i minimalne wartości,
- dokładnie określona średnioroczna prędkość wiatru na wysokości gondoli elektrowni wiatrowej,
- szorstkość terenu i związana z tym zmiana prędkości wiatru w funkcji wysokości.

Parametry te są szczegółowo wymienione w normie określającej wymagania projektowania elektrowni wiatrowych IEC 61400-1 [8]. Obowiązek ich stosowania nałożony jest na producentów, którzy w specyfikacji katalogowej umieszczają odpowiednie symbole charakteryzujące prędkość i zmienność wiatru, dla których przewidziana jest dana konstrukcja.

Warunki klimatyczne dzielą się na normalne i ekstremalne. Wśród nich parametry wietrzności należą do podstawowych warunków, które narzucają określone wymagania elektrowniom wiatrowym. Z ich pomocą definiuje się klasy turbin wiatrowych, które charakteryzują wiatr w kategoriach jego prędkości i turbulencji. Podstawowym podziałem jest podział na cztery klasy wietrzności: I, II, III i klasę specjalną S. Podział ten przedstawia Tabela 1.

Tabela 1 Klasy turbin wiatrowych

Klasy turbin wiatrowych	I	II	III	S
V_{ave} (m/s)	10	8,5	7,5	Wartości określone przez projektanta
A $I_{ref}(-)$	0,16			
B $I_{ref}(-)$	0,14			
C $I_{ref}(-)$	0,12			

V_{ave} – średnia roczna dziesięciominutowa prędkość wiatru na wysokości gondoli,

A, B, C – kategorie turbulencji definiujące ich poziom: wysoki, średni i niski,

I_{ref} – wartość średnia turbulencji w dziesięciominutowym okresie mierzona na wysokości gondoli przy prędkości wiatru 15m/s. Wielkość tą można określić na podstawie empirycznego wzoru (1) [8].

$$\sigma_1 = I_{ref} (0,75V_{hub} + b), \quad (1)$$

gdzie: $b=5,6$ (m/s), a σ_1 określa odchylenie standardowe turbulencji.

Turbulencja jest główną przyczyną porywistości wiatru. Rozróżnia się turbulencję dynamiczną i termiczną. Turbulencja dynamiczna rozwija się pod wpływem nierówności podłoża i rośnie ze wzrostem prędkości wiatru. Jej powstawaniu sprzyjają nierówności terenu, przy czym poziom wzrasta np. w okolicach pojedynczych drzew i zabudowań [9].

Turbulencja termiczna jest efektem różnic w nagrzewaniu się odmiennych powierzchni. Szczególnie dogodne warunki do jej powstawania występują, gdy chłodne powietrze napływa nad ciepłą powierzchnię.

Określenie poziomu turbulencji musi być więc szczególnie uważnie wyznaczone zwłaszcza, kiedy elektrownie wiatrowe posadowione mają być na terenie pagórkowatym, w pobliżu przeszkód terenowych, na skraju lasów lub na skarpach i klifach. Wartość chwilowa wiatru podczas turbulentnych porywów może bowiem przekraczać nawet prędkość wiatru w wyższych warstwach atmosfery.

4. KRYTERIA OCENY I WYBORU OPTIMALNEGO ROZWIĄZANIA

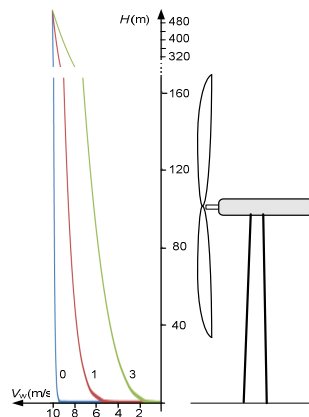
Wybór optymalnego modelu elektrowni wiatrowej dla lokalnych warunków jest odpowiedzialnym zagadnieniem. Nie można postępować zbyt pochopnie, a procedurę wyboru należy podzielić na dwa etapy: wybór turbiny wiatrowej i wybór układu generatora elektrycznego.

4.1. Ocena warunków i wybór typu turbiny

Podstawą do wskazania, jakie modele elektrowni wiatrowej odpowiadają lokalnym warunkom jest wykonanie pomiarów i obliczeń klasyfikujących dany teren ze względu na klasy turbin wiatrowych i szorstkość terenu. Wyniki tych obliczeń są podstawą do określenia wymaganej klasy turbin i powinny być niższe lub co najwyżej równe wartościom wynikającym z klasyfikacji podanej w Tabeli 1 [8].

Wśród danych katalogowych wybieranej elektrowni należy odszukać oznaczenia klas oraz podklas A, B i C. Zwykle I klasie turbin wiatrowych odpowiadają terenom o zerowej szorstkości terenu, którymi są obszary szelfu morskiego. Tereny rolnicze klasyfikują się z reguły w klasy szorstkości od 1 do 3, przy czym w klasie drugiej teren jest płaski i możliwe są tylko nieduże rośliny uprawne, natomiast w klasie trzeciej mogą być już grupy drzew i teren może być lekko pagórkowaty. Im wyższy jest stopień szorstkości terenu, tym większe są opory przepływu powietrza oraz jego turbulencje. Najmniejszy wpływ terenu występuje na otwartym, spokojnym morzu (klasa szorstkości „0”). W takich warunkach już na wysokościach około 30m wpływ tarcia powierzchniowego jest pomijalnie mały, a wiatr osiąga wartości w przybliżeniu równe wiatrowi rzeczywistemu, którego główne składniki to wiatr geostroficzny i gradientowy [9].

Na terenach o większej szorstkości, wiatr ustala się co do wartości i kierunku dopiero na wysokościach 500 ÷ 1500 m. Przybliżony wpływ szorstkości terenu na wartość wiatru w funkcji wysokości przedstawia model normalny charakterystyki wiatru (Normal Wind Profile Model – NMPM) (2) [8] oraz rys.1



Rys. 1. Charakterystyka prędkości wiatru przy spełnieniu modelu NMPM dla współczynników $\alpha = \{0,01; 0,1; 0,3\}$, przy prędkości 10m/s rzeczywistego wiatru w strefie ustalonej. Z prawej strony elektrownia wiatrowa o szacowanych mocach 4,5MW, 2,8MW oraz 1,2MW, którym odpowiadają wyznaczone charakterystyki wiatru dla klas szorstkości 0, 1 i 3.

$$V_w(h) = V_{hub} \left(\frac{h}{h_{hub}} \right)^\alpha \quad (2)$$

Analizując wykresy prędkości wiatru odniesione do przykładowego usytuowania elektrowni wiatrowej (Rys.1) dostrzec można, że na terenach o dużej szorstkości terenu powinno się projektować turbiny wiatrowe posadowione na wysokiej wieży. Obecnie proponowane przez producentów konstrukcje przekraczają 100m wysokości. Takie rozwiązania pozwalają uzyskać większe średnie wartości wiatru. Ponadto poziom turbulencji spowodowanej szorstkością terenu maleje wraz ze wzrostem wysokości [8, 9]. To przyczynia się do zwiększenia efektywności pracy oraz zmniejszenia naprężeń mechanicznych, drgań i wahań generowanej mocy [1, 2].

Baczną uwagę należy zwrócić również na prędkości znamionowe turbin wiatrowych. Przykładowo, jeżeli średnia prędkość wiatru należy do III klasy turbin wiatrowych, wybór rozwiązania z prędkością znamionową w okolicach 16m/s jest nietrafionym rozwiązaniem. Taka prędkość wiatru wystąpi rzadko, a inwestor poniesie zwiększone koszty przyłączenia ze względu na przeszacowane warunki wietrzności. Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem jest wybór oferty na niższe prędkości nominalne w granicach 12÷13m/s, które gwarantować będą lepsze energetyczne wykorzystanie turbiny. Wśród rozwiązań producentów znaleźć można odpowiednie oferty różniące się np. różną rozpiętością łopat i ich profilem, różną prędkością nominalną przy zachowaniu tej samej mocy znamionowej.

4.2. Wybór układu generatora elektrowni

Najlepsze rozwiązania, które zasługują na zastosowanie w nowych elektrowniach wiatrowych to układy zmiennoprędkościowe ze sterowaniem wektorowym. Pozwalają one maksymalizować pozyskiwaną energię, ograniczyć niekorzystny wpływ turbulencji oraz w sposób dynamiczny kontrolować generowaną moc czynną i bierną [1, 2, 5, 7]. Wśród najczęściej spotykanych rozwiązań spotkać można następujące generatory współpracujące z przekształtnikami wektorowymi:

- dwustronnie zasilany generator indukcyjny pierścieniowy DFIG (Double Fed Induction Generator),
- wolnoobrotowy generator synchroniczny z magnesami trwałymi PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator),
- generator indukcyjny klatkowy.

Wszystkie te rozwiązania należą do równorzędnych w swojej klasie. Najważniejsze ich właściwości to:

- ograniczenie zmienności napięcia generowanego wskutek turbulencji wiatru,
- odporność na krótkotrwałe zapady napięcia,
- ograniczenie migotania,
- ograniczenie wyższych harmoniczných,
- stabilizacja częstotliwości dla słabych sieci,
- możliwość pracy wyspowej (opcjonalnie).

Najważniejsze różnice w tej grupie układów dotyczą generatorów dwustronnie zasilanych (DFIG) i generatorów wolnoobrotowych z magnesami trwałymi (PMSG):

- Układy DFIG generują energię obwodami - stojana i wirnika, co stanowi niemal dwukrotną moc nominalną maszyny w porównaniu do pracy z wirnikiem zwartym. Z tego względu rozwiązania te należą do jednych z najbardziej popularnych, w szczególności dla elektrowni wiatrowych najwyższych mocy.
- W układach PMSG wyeliminowana jest przekładnia mechaniczna. Rozwiązania te są ciche, mają wyższe sprawności. Są dość popularnymi rozwiązaniami w zakresie mocy 1÷3 MW. Ich wadą są duże średnice generatorów, ze względu na bardzo dużą liczbę par biegunów przekraczającą 100. Powoduje to duże opory powietrza i potrzebę wzmocnienia konstrukcji wieży i fundamentów.

Szczegółowe różnice rozwiązań generatorów zmiennoprędkościowych wiążą się ponadto z zastosowaną topologią przekształtników współpracujących z siecią i metodami modulacji tych przekształtników. Warto przy tym zwrócić uwagę na wielopoziomowe układy przekształtników energoelektronicznych. Charakteryzują się one zmniejszonymi stratami mocy łączeniowych w elementach

półprzewodnikowych, przy jednoczesnej możliwości redukcji wyższych harmonicznych i pracy w układach równoległych.

5. PODSUMOWANIE

Priorytetem podczas wyboru elektrowni wiatrowej powinno być uzyskanie jej wysokiej niezawodności i bezpieczeństwa działania. Ten cel można osiągnąć wybierając model turbiny, którego katalogowe parametry wietrzności i turbulencji przewyższają rzeczywiste parametry uzyskane na podstawie wyników pomiarów i obliczeń dla danej lokalizacji.

Pracę z wysoką sprawnością i jednocześnie wyższą jakością przetwarzania energii gwarantują układy zmiennoprędkościowe. Oferowane obecnie rozwiązania ze sterowaniem wektorowym umożliwiają dynamiczną kontrolę mocy czynnej i biernej. Dzięki temu można ograniczyć stany przejściowe, a tym samym wpływać stabilizująco na napięcie sieci.

Przekształtniki energoelektroniczne o sterowaniu wektorowym pozwalają na dynamiczną regulację kąta fazowego prądu i napięcia. Ta własność niestety nie jest jeszcze w pełni wykorzystywana z uwagi na to, że operator systemu energetycznego nie ma dostępu do wewnętrznego poziomu regulacji dynamicznej przekształtników energoelektronicznych. Nie można więc aktywnie dostosowywać sterowania przekształtników w zależności od aktualnych wymagań sieci. Tym niemniej jakość pracy omawianych układów plasuje je w grupie najlepszych systemów generacji energii elektrycznej. W porównaniu z układami ze sterowaniem skalarnym układy te dobrze współpracują nawet z sieciami słabymi i są bardziej odporne na zwarcia i krótkotrwałe zapady napięcia sieci. Mogą też mieć pozytywne oddziaływanie w sieciach rozproszonych. Gwarantują pracę w zamkniętym układzie regulacji z kontrolą mocy i jego współczynnika. Zastosowanie tego typu rozwiązań wydaje się więc warunkiem koniecznym aby można było starać się o pozytywną opinię w celu pozyskania środków z Państwowej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości.

LITERATURA

- [1] Charlak M., Filipek P., Jarzyna W.: Właściwości przetwarzania energii elektrycznej w układach generatorów elektrowni wiatrowych. Przegląd Elektrotechniczny 5/2008.
- [2] Jarzyna W., Charlak M.: Modeling and diagnosis of wind turbine of a power station. Power Electronics and Electrical Drives. PAN, Electrical Eng. Committee. Wrocław 2007 s.463-474.
- [3] Kacejko P., Pijarski P.: Przyłączanie farm wiatrowych – ograniczenia zamiast przewymiarowanych inwestycji. Rynek Energii 2009, nr 1.
- [5] Lubośny Z.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, WNT, Warszawa 2009.
- [7] Teodorescu R., Blåbjerg F., Iov F., Andresen B., Birk J., Miranda J.: A Comparison of Control Strategies for Grid Converters in Wind Power Systems Proc. of Int. Exhibition & Conf. for PCIM. 2006 .
- [8] Wind Turbines, Part 1: Design Requirements. International Standard IEC 61400-1. 2005.
- [9] Wołyżyn E.: Meteorologia i klimatologia w zarysie. Wyd. Politechniki Gdańskiej 2009.

TERMS OF THE TURBINE AND GENERATOR CHOICE OF WIND POWER STATIONS

Keywords: wind turbine and generator systems, characteristics of wind power stations, wind turbine and wind generator systems selection factors

Summary: Before starting construction of Wind Power Station (WPS), an investor has to solve dilemma of the WPS type selection. On the market there are several sale WPS offers, differing in significant design parameters. The selected model of WPS, should correspond to the local climate characteristics and properties of grid at a PCC point. The article discusses the parameters of the WPS and environmental factors that have a significant influence on the plant choice. The results of these considerations are the determination of characteristics of the WPS which are planned for installation in various terrain conditions and indication of key features which should be taken into account during selection of the type of the WPS.

Wojciech Jarzyna, dr hab. inż., prof. nzw Politechniki Lubelskiej. Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin. E-mail: w.jarzyna@pollub.pl