

Воздушные линии электропередач высокого (ВН) и сверхвысокого (СВН) напряжения с комбинированным числом классов напряжений

магистр-инженер . Agnieszka Dziendziel
доктор технических наук профессор Henryk Kocot
кандидат технических наук инженер Paweł Kubek

Перевод и техническое редактирование

Магистр-инженер Ян Штефунык

Аннотация

В энергосистемах все чаще появляются воздушные линии с различными классами номинального напряжения, работающие на одних и тех же опорных конструкциях. Такие линии также уже построены в Польше. В рамках статьи была собрана информация о высоковольтных линиях, их конструкции, преимуществах и недостатках в структуре электрических сетей.

Введение

Воздушные линии электропередачи являются самым крупным и наиболее обширным элементом системы передачи, выполняя при этом одну из основных и наиболее важных функций любой энергосистемы: они обеспечивают передачу электроэнергии на большие расстояния.

Первая воздушная линия переменного тока была построена в 1891 году в Германии. Это была линия Лауффен-Франкфурт, длиной 175 км, напряжением 15 кВ и передаваемой мощностью 300 кВт. Технический прогресс привел к постоянному увеличению мощности, передаваемой на большие расстояния, что привело к появлению все более длинных линий. Чтобы уменьшить потери мощности при передаче, были введены в эксплуатацию линии для все более высоких напряжений, и поэтому в Швеции в 1952 году была построена линия на 380 кВ, а в 1956 году была введена линия на 400 кВ в бывшем СССР. В настоящее время спрос на электроэнергию все еще растет. В этом году, 25 января 2019 года, была зафиксирована рекордная потребность в электроэнергии в Польше - 26 504 МВт на пике. Предыдущий максимальный спрос, равный 26 448 МВт, имел место 28 февраля 2018 года. Растущий спрос на электроэнергию заставляет постоянно расширять сетевую инфраструктуру. План развития передающей сети в перспективе до 2025 года, разработанный оператором системы передачи, обеспечивает, среди прочего строительство около 4600 км новых линий электропередачи 400 кВ и модернизация существующих линий 400 и 220 кВ общей протяженностью около 2500 км [1]. Перспектива строительства новых воздушных линий электропередачи связана с необходимостью получения соответствующих разрешений на отвод земли, эксплуатацию достаточной охранной зоны для строительства воздушной линии, значительных инвестиционных затрат и т. д., что приводит к длительному во времени периоду строительства линии. Существующие правовые требования, включая мероприятия по защите окружающей среды, соблюдение стандартов безопасности для людей и животных, не облегчают этот процесс.

Современные правовые нормы заставляют минимизировать объемы строительства новых линий. Существует также широкое общественное противодействие появлению новых линий, что увеличивает проблемы, связанные с развитием системы передачи.

Многоцепные воздушные линии электропередач (МЛЭП) с различными классами напряжений являются ответом на проблемы связанные с развитием электропередающих сетей.

Ввиду постоянно растущего спроса на электроэнергию принимаются меры по улучшению условий передачи электроэнергии. Для повышения эффективности использования существующей сетевой инфраструктуры проводятся мероприятия по уменьшению потерь электроэнергии, а также по увеличению пропускной способности линий, путем замены старых проводов на провода новых современных конструкций, а также проводятся мероприятия по реализации результатов испытаний на динамическую нагрузочную способность линий (проведение анализа погодных условий и их влияния на пропускную способность линии [2], повышение номинальных уровней напряжения на линиях (тенденция к замене линий 220 кВ на линии 400 кВ [3]). Однако эти мероприятия являются в большей мере временным решением и не гарантируют, что не нужно будет инвестировать в строительство новых линий.

Среди альтернативных технологий, улучшающих передачу электроэнергии, заслуживают внимания многоцепные воздушные линии электропередач (МЛЭП) с различными классами напряжений. Эти воздушные линии, в которых, по меньшей мере, две цепи, выполненные на общей опорной конструкции, имеют различные номинальные напряжения. Примеры выполнения нескольких цепей на одной опоре показаны на рисунке 1.

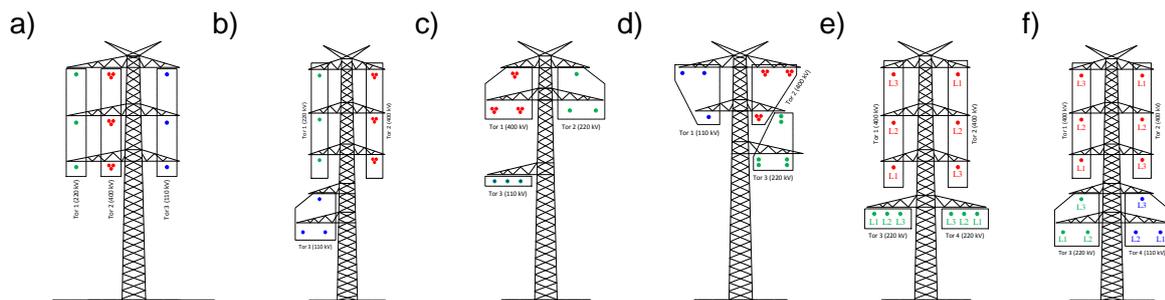
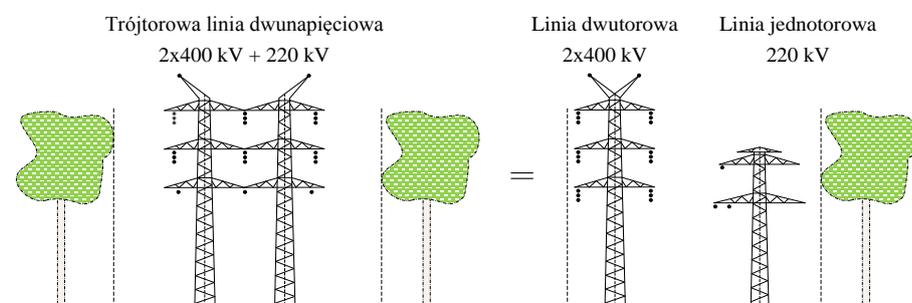


Рис. 1. Примеры расположения трех цепей различных классов напряжения: а) горизонтальное, б) треугольником+вертикальное, с) треугольнику+горизонтальное, d) тип «зигзаг» и примеры четырехцепных линий с различными классами напряжений е) f) [4][5]

Решение в виде многоцепных линий с различными классами напряжений позволяет значительно уменьшить ширину охранной зоны со значительным увеличением мощности, передаваемой данным участком, благодаря большему количеству цепей на одной опоре (рис. 2).



Анализируя рисунок 2 можно отметить, что при использовании многоцепной линии с разными классами напряжений ширина охранной зоны уменьшается более чем в два раза. Возможность минимизации площади, необходимой для реализации строительства линий, является одной из наиболее важных и самой сложной, потому что, с практической точки зрения, самые большие проблемы при сетевых инвестициях связаны с выбором и реализацией маршрута воздушной линии. Строительство нескольких цепей различных классов напряжений на одной опоре позволяет более эффективно использовать земли, предназначенные для воздушной линии.

Считается, что с увеличением количества цепей на одной опоре, преимущества от уменьшения охранной зоны по сравнению с шириной охранных зон, которые должны быть сохранены при использовании одноцепных линий на отдельных опорах на параллельном их прохождении по трассе, еще больше. На рисунке 3 показан пример работы трех линий высокого напряжения на параллельных маршрутах. Получается, что общая ширина охранной зоны, занимаемой тремя одноцепными линиями, почти в три раза превышает ширину зоны, которую занимала бы пятицепная двойного напряжения [5].

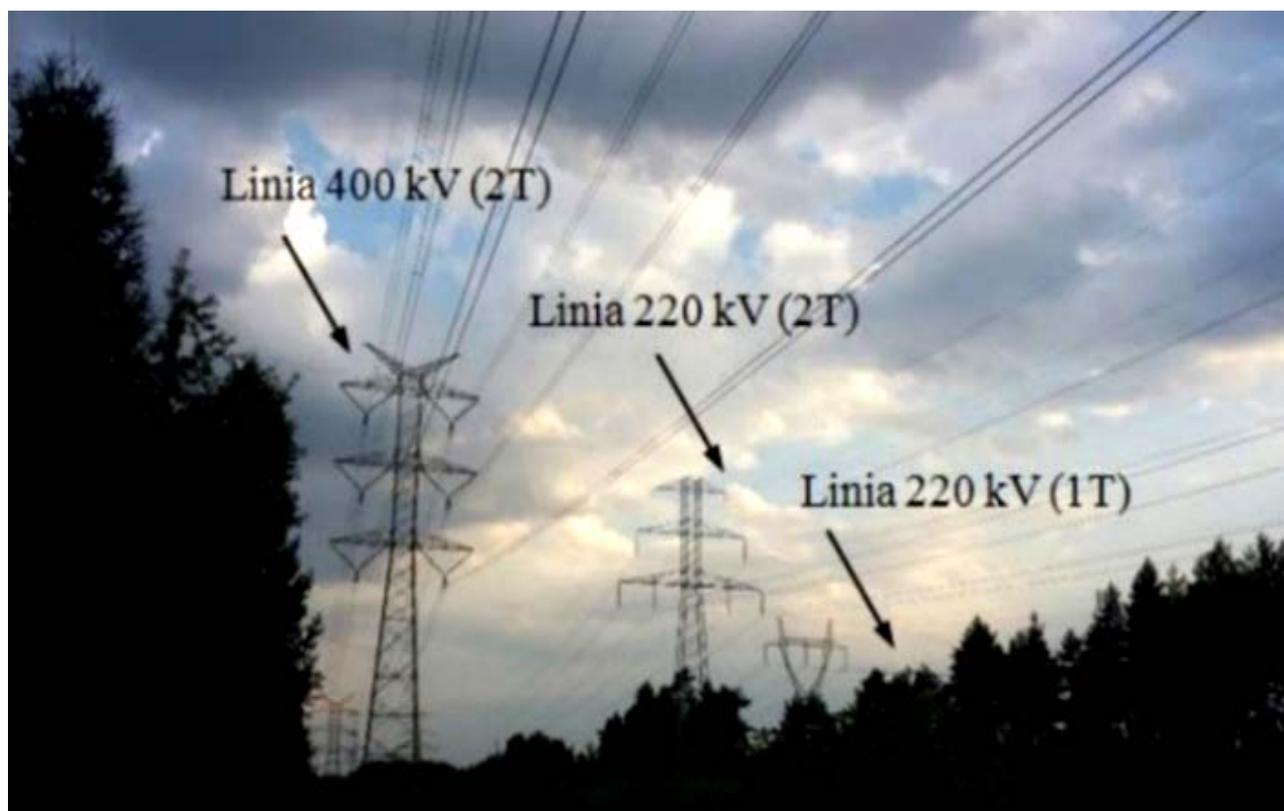


Рис. 3. Пример трех одноцепных линий высокого напряжения при из параллельном прохождении (объект Явожно (Jaworzno) [5])

Таблица 1 показывает сравнительную оценку и технические параметры использования цепей, где третий ряд содержит значения для двухцепных линий на параллельных маршрутах, четвертый ряд значений для двухцепных линий на независимых маршрутах, пятый ряд - четыре цепи на одной опоре [6].

Табл 1. Сравнение параметров использования цепей многоцепных воздушных линий с разными классами напряжений [6]

Вид опоры	Размещение проводов в фазе Al/Fe 265/35	Токовая нагрузка [MW]	Ширина охранной зоны [m]	[MW/m]	[%]
Распределительные и магистральные линии одного класса напряжения					
 2 x 110 кВ	•	260	44	6	100
	••	520	45	12	200
 2 x 380 кВ	•• ••	3 580	68	53	100
 2 x 110 кВ + 2 x 380 кВ	•• 110 кВ •• 380 кВ ••	4 100	84	49	136
Распределительные и магистральные линии комбинированных классов напряжения					
 110 кВ + 380 кВ	•• 110 кВ •• 380 кВ ••	4 100	113	36	100
	•• 110 кВ •• 380 кВ ••		68	60	167
 2x110 кВ + 2x380 кВ	•• 110 кВ •• 380 кВ ••				

В случае прокладки двух параллельных двухцепных линий 110 кВ и 380 кВ используется технологическая охранная зона шириной 84 м, а, если бы две предполагаемые линии проходили на одной несущей конструкции, то такая зона была бы на 16 метров уже, а отношение мощности, которое может быть передано по отношению к минимальной ширине линии (P / d), увеличился бы в этом случае на 31%. Это решение является не только примером лучшего управления пространством, но и действием, которое уменьшает вред для окружающей среды. Воздушные многоцепные линии высокого напряжения позволяют оптимально использовать коридоры новых (или модернизированных) линий, что еще больше увеличивает пропускную способность. Это очень выгодно для построения линии высокого напряжения, если существующая опорная структура может использоваться после ликвидации одной из линий линии с одним уровнем напряжения (таким примером может быть реконструкция линии 220 кВ с переводом ее на напряжение 400 кВ [3]).

Стоит отметить, что строительство многоцепных линий электропередач с комбинированными классами напряжений особенно выгодно, когда необходимо проложить линию в неблагоприятных, сложных условиях окружающей среды или в сильно урбанизированных районах с высокой плотностью застройки, а также когда возникают проблемы с получением разрешений на строительство новых линий в соответствии с требованиями законодательства. Планируемые инвестиции могут предусматривать строительство многоцепной линии с разными классами напряжений вместо нескольких одноцепных линий одного напряжения. Такой подход приведет в будущем к тому, что не

будет необходимости строить еще одну линию в этой местности или ее проводить дорогостоящую модернизацию.

Кажущаяся недостатком многоцепных линий комбинированных классов напряжения линейного напряжения ВН и СВН является увеличение стоимости инвестиций, вызванное необходимостью применять специальные конструкции опор с большими габаритами (рис. 4). В этом случае, однако, эта проблема может быть решена путем применения многогранных опор (рис. 5), которые становятся все более популярными. В этих линиях размеры были максимально уменьшены при сохранении всех требуемых механических и электрических параметров (в результате обеспечения адекватных расстояний изоляции между отдельными фазами) с целью уменьшения воздействия (как эстетического, так и практического) такой линии на окружающую среду [7]. Благодаря этому строительство таких воздушных линий становится более приемлемым для общественности

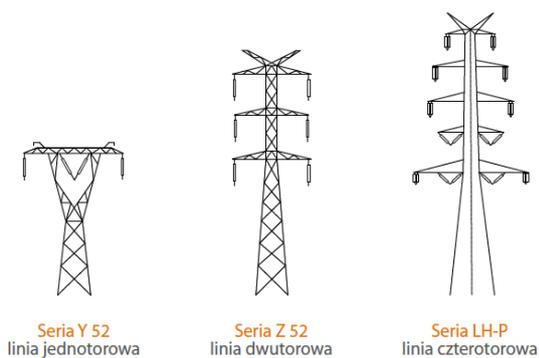


Рис. 4. Профили типовых промежуточных опор используемых в Польше на напряжение 400 кВ и профиль прототипа четырехцепной опоры (400 кВ + 220 кВ) [8]



Рис. 5. Двухцепные линии 420 кВ – традиционная и компактная на многогранных DEWA Dubaj [7]

Широко распространено общественное сопротивление строительству воздушных линий, а иногда даже действиям по увеличению уровня рабочего напряжения в существующих линиях, в первую очередь связано со страхом перед электромагнитными полями в их окружении.

Вопросы, связанные с воздействием на окружающую среду электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями, регулируются:

в области защиты от воздействия электромагнитного поля: постановлением министра окружающей среды от 30 октября 2003 года о допустимых электромагнитных уровнях в окружающей среде и проверке соблюдения этих уровней;

при проектировании и строительстве линий электропередач: стандарт PE-EN 50341-1: 2005 Воздушные линии электропередач переменного тока выше 45 кВ. Часть 1: Общие требования. Общие технические характеристики.

В соответствии с применимыми правилами допустимые уровни электрического и магнитного полей с частотой 50 Гц в местах, доступных для людей, составляют:

электрический компонент:

в местах, доступных для людей: 10 кВ / м;

в местах для жилых зданий: 1 кВ / м;

магнитная составляющая: 60 А / м (в местах, доступных для людей и предназначенных для жилых зданий).

На рисунках 6 и 7 показано распределение напряженности электрического и магнитного поля вокруг двухцепных линий высокого напряжения (220 кВ и 400 кВ) и четырехцепной линии двух напряжений (2x400 кВ + 2x220 кВ). Оказывается, что при правильном расположении фазовых проводников линий воздействие цепей тока с различными номинальными напряжениями, особенно более низкими, подвешенными в нижней части опоры, приводит к уменьшению результирующей напряженности электромагнитного поля под воздушной линией. Таким образом, многоцепные воздушные линии с комбинированным классом напряжений становятся одной из возможностей получить социальную поддержку в перспективе получения разрешения на строительство новых линий электропередач. .

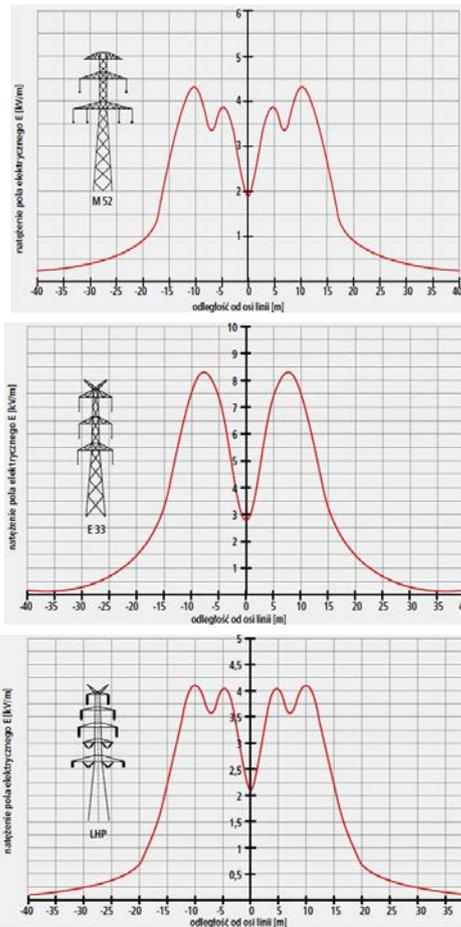


Рис. 6. Распределение электрического поля вокруг линий ЛЭП (а) двухцепная одного класса напряжения 220 кВ, б) двухцепной одного класса напряжения 400 кВ, в) четырехцепная комбинированного класса напряжения 2x400 кВ + 2x220 кВ), определенное в месте наибольшего провисания проводов в пролете на высоте 2 м над землей [10]

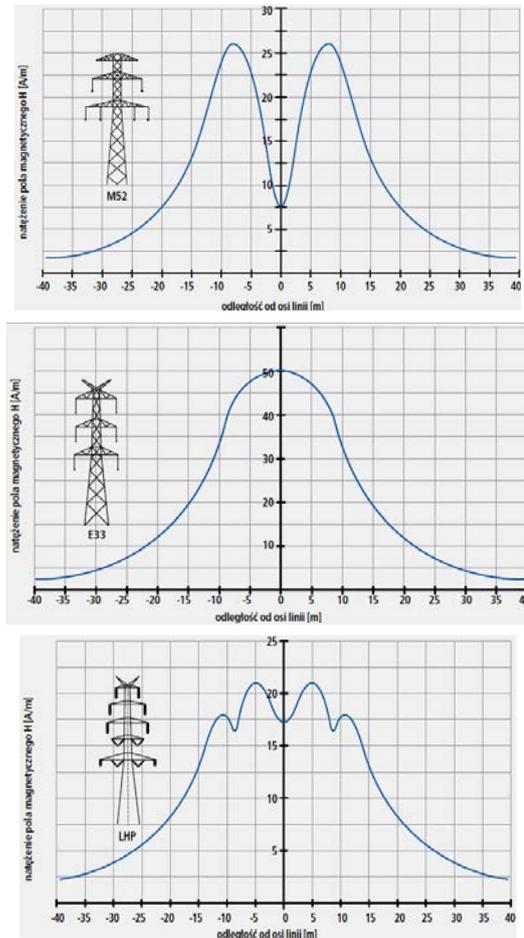


Рис. 7. Распределение магнитного поля вокруг линий ЛЭП (а) двухцепная одного класса напряжения 220 кВ, б) двухцепной одного класса напряжения 400 кВ, в) четырехцепная комбинированного класса напряжения 2x400 кВ + 2x220 кВ), определенное в месте наибольшего провисания проводов в пролете на высоте 2 м над землей (токовая нагрузка цепи 400 кВ: = 2850 А, токовая нагрузка цепи 220 кВ: = 1220 А) [10]

Одним из недостатков высоковольтных ВН и СВН является сложная конструкция, которая затрудняет проведение работ по техническому обслуживанию и ремонту линии. Кроме того, во время эксплуатации высоковольтной линии электропередачи существуют взаимодействия между отдельными цепями, которые должны быть определены и учтены в системных моделях, что приводит к их сложности такого учета. Впоследствии, в связи с проведением нескольких цепей тока (как правило, различных направлений и подчинений) на общей несущей конструкции существует большая опасность больших помех, вызванных

приближением цепей друг к другу, а также затрудняет анализ таких помех и работу систем защитной автоматики. В таблице 2 обобщены преимущества и недостатки многоцепных линий с комбинированными классами напряжений.

Таблица 2. Преимущества и недостатки многоцепных линий с комбинированными классами напряжений ВН и СВН.

Преимущества	Недостатки
<p>Уменьшение охранных зон</p> <p>Увеличение пропускной способности (увеличение соотношения)</p> <p>Динамическое развитие сетевой инфраструктуры (более короткий срок реализации инвестиционных проектов в линиях)</p> <p>Уменьшение воздействия на окружающую среду и общий вид</p> <p>Ограничение стоимости строительства новых линий (например, меньшее количество опор)</p> <p>Уменьшение материалоемкости линии</p> <p>Снижение напряженности случайного электромагнитного поля вблизи линии (при соответствующем расположении фазных проводов)</p>	<p>Усложнение аврийно-восстановительных работ и обслуживания линий</p> <p>сложные модели системы из-за взаимодействия между различными цепями</p> <p>нежелательное взаимодействие между отдельными цепями при коротких замыканиях и нормальных условиях эксплуатации</p> <p>угроза широкого распространения помех (при различных уровнях напряжения), даже межсистемных коротких замыканий</p> <p>Трудность в анализе возникновения помех</p> <p>Сложность алгоритмов работы линии</p>

Преимущества высоковольтных воздушных линий с комбинированными классами напряжений перевешивают их недостатки, поэтому это решение, безусловно, будет развиваться в будущем. Неоспоримые достоинства таких высоковольтных воздушных линий уже были замечены и оценены, и все больше и больше из них работают в мире. В таблице 3 показаны отдельные страны, где можно найти применение таких решений.

Таблица 3. Высоковольтных воздушных линий с комбинированными классами напряжений в мире [5]

№.	Страна	Тип		n			
				кВ	км	км	%
1.	Дания	ВН + СВН	3	400 + 2x150	118	924/1810	12,8/6,5
2.	Дания	ВН + СВН	2	400 + 150	215	924/1810	23,3/11,9
3.	Дания	ВН + СВН	2	400 + 132	7	924/1070	0,8/0,7
4.	Германия	ВН + ВН	3	380 + 2x220	38,5	-	-
5.	Германия	ВН + СВН	3	380 + 2x150	7,5	-	-
6.	Германия	ВН + СВН	3	380 + 2x110	135,7	-	-
7.	Германия	ВН + СВН	2	380 + 110	4,6	-	-
8.	Германия	ВН + СВН	2	220 + 110	1,7	-	-
9.	Черногория	ВН + СВН	2	400 + 110	40	285/685	14/5,8

№.	Страна	Тип		n			
				кВ	км	км	%
10.	Голландия	ВН + ВН	4	2x380 + 2x170	-	-	-
11.	Литва	ВН + СВН	2	330 + 110	2,5	1672/5017	0,1/*
12.	США	ВН + ВН	2	345 + 230	-	-	-
13.	США	ВН + СВН	2	230 + 115	-	-	-
14.	Швейцария	ВН + СВН	3	2x380 + 132	-	-	-

где:

- количество цепей на опоре,
- n – номинальное напряжение цепей линии,
- фактическая длина линии,
- общая длина всех цепей линии,
- * – величина меньше 0,1%.

Эта технология особенно важна для Дании, где самая длинная многоцепная линия комбинированного высокого напряжения имеет длину 215 км (400 кВ + 150 кВ), и в Германии, где в настоящее время существует тенденция к строительству воздушных линий электропередачи более чем с четырьмя цепями на одной опоре (для линий СВН сверхвысокого напряжения). На основании Таблицы 3 видно, что в Дании воздушные линии СВН напряжения (400 кВ) приблизительно на 37% установлены на многоцепных конструкциях. В настоящее время в Германии насчитывается 188 км таких линий, что в три раза больше, чем в Польше. На рисунках 8 и 9 показан пример линии высокого напряжения в Германии и линии с четырьмя цепями двойного напряжения в Нидерландах, которая представляет собой линию компактного дизайна, выполненную на многогранных оцинкованных опорах.

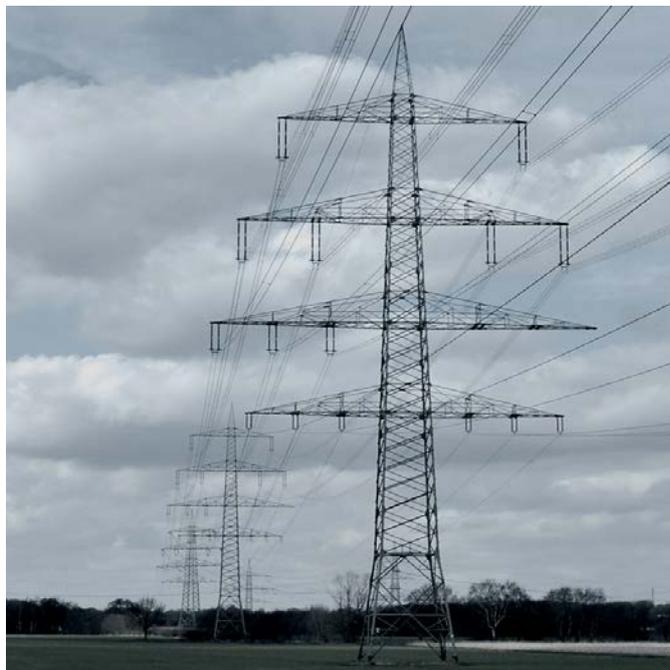


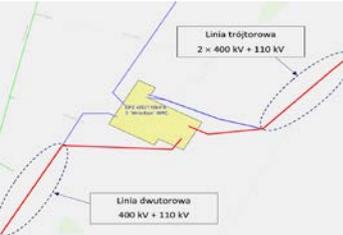
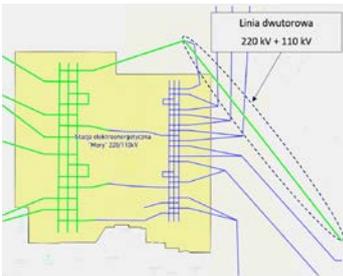
Рис. 8. Фрагмент пятицепной линии с тремя классами напряжений Германия тип ВН+СВН [9]



Рис. 9. Фрагмент линии 2x380 кВ + 2x170 кВ в Голландии [7]

В настоящее время в Польше действуют пять многоцепных воздушных линий высокого и сверхвысокого напряжения. Данные, касающиеся этих линий, приведены в таблице 4. На рисунках 10 и 11 показаны отдельные многоцепные линии комбинированного напряжения в стране.

Таблица 4. Многоцепные линии комбинированного напряжения в Польше

№	Наименование линий	Длина	гз/с
		км	%
1.	Трехцепная линия двойного напряжения: Łagisza - Tuczna (400 kV) Łagisza - Rokitnica (400 kV) Łagisza - Wrzosowa - Joachimów (220 kV)		4,8 */* (400 kV / 220 kV)
2.	Четырехцепная линия тройного напряжения: Plewiska - Kromolice (400 kV) Plewiska - Konin (400 kV; в данный момент работает на напряжение 220 kV) Plewiska - Poznań Południe (220 kV) Plewiska - Kromolice (110 kV)		31,2 0,5/0,4/- (400 kV / 220 kV / 110 kV)
3.	Трехцепная линия двойного напряжения: Pasikowice - Wrocław (400 kV + 2x110 kV)		6,5 0,1/- (400 kV / 110 kV)
4.	Двухцепная линия двойного напряжения: Świebodzice - Wrocław (400 kV + 110 kV)		43,0 0,7/- (400 kV / 110 kV)
5.	Двухцепная линия двойного напряжения: Mory - Towarowa (220 kV + 110 kV)		7,5 0,1/- (220 kV / 110 kV)

* – величина меньше 0,1%

В Польше доля высоковольтных и сверхвысоковольтных воздушных линий электропередачи незначительна (ниже 1%). Но, как отмечалось ранее, эти типы решений становятся все более популярными в мире, и считается, что они также будут широко применяться в Польше в будущем.



Рис. 10. Фрагмент трехцепной линии двойного напряжения вблизи SE Łagisza



Рис. 11. Фрагмент четырехцепной линии тройного напряжения вблизи подстанции [10]

Заключение

Во многих странах отмечается непрерывная тенденция развития многоцепных линий комбинированного ВН и СВН. Это решение приносит много технических и экономических преимуществ. Инвестиционные затраты, вызванные необходимостью использования специальных опорных конструкций большего размера, чем обычно используемые размеры, компенсируются преимуществами лучшего пространственного размещения воздушной линии по трассе. Кроме того, монтируя ряд цепей с различными номинальными напряжениями на одной из несущей конструкции, даже на короткие расстояния, мы увеличиваем динамику развития энергосистемы в районах, которые имеют сложный природный ландшафт. Время и затраты на реализацию сетевых инвестиций в местах, где трудно получить разрешение для строительства по заданной трассе, также сокращаются. Улучшение структуры сети также обогащается возможностью использования существующих опорных структур, то есть путем модернизации существующих линий (добавление дополнительных цепей или изменение его номинального напряжения). Растущие тенденции развития таких линий, используемых как на национальном, так и на глобальном уровне, подтверждают преимущества использования многоцепных высоковольтных воздушных линий электропередачи.

Literatura

1. Strona internetowa Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A. www.pse.pl (dostęp 15.07.2019)
2. Kubek P.:
Rozprawa doktorska, Gliwice 2015
3. Kocot H.:
Rynek Energii Elektrycznej. Bezpieczeństwo energetyczne Polski, Red. Zbigniew Połecki, Lublin 2016, ss. 43-50
4. Kumala R.:
Aktualne zagadnienia energetyki tom II pod red. Wójs K., Szulc P. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2014
5. Kumala R.:
Rozprawa doktorska, Gliwice 2016
6. Kamrat W., Szczepański T.:
Czasopismo Energetyka, nr 10/2009, ss. 649-668
7. Dudek D.:
Urządzenia dla energetyki 4/2013
8. Dołowy K., Kraszewski A., Różycki S.:
Polskie Sieci elektroenergetyczne S.A. Konstancin-Jeziorna 2015
9. Strona internetowa Bundesamt für Strahlenschutz: www.bfs.de (dostęp 27.06.2018)
10. Sztuba M. i inni:
Informator. Wydanie 4. Biuro Konsultingowo-Inżynierskie „EKO-MARK”, Warszawa 2008
11. Dziendziel A.:
Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2018
12. Kacejko P., Machowski J.:
WNT, Warszawa 2013
13. Bernas S., Ciok Z.:
WNT, Warszawa 1977
14. Mapa sieci elektroenergetycznej: <http://ebin.josm.pl/electricity/#5/51.44/20.15> (dostęp 15.07.2019)