

УДК 621.316

УТОЧНЕННЯ РЕКОМЕНДОВАНОГО ПЕРЕЛІКУ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИНЦИПОВИХ ПІДСТАНЦІЙ 35–750 кВ



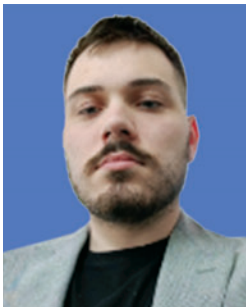
Р.О. Буйний,
к.т.н., доцент



О.В. Гай,
к.т.н., доцент



І.В. Діхтярук,
к.т.н.



А.О. Ворушило,
інженер
НЕК "Укренерго"



ВСТУП

Світові тенденції у електроенергетиці направлені на її декарбонізацію, децентралізацію та діджиталізацію. У галузі електромережевого будівництва це проявляється у створенні так званих **Smart Grid** мереж, що забезпечують різноманітні оперативні та енергоощадні заходи, включають розумні лічильники, розумних споживачів, поновлювані джерела енергії та ресурси забезпечення енергоефективності, забезпечують зменшення кількості обслуговуючого персоналу та компактність об'єктів.

Для реалізації Smart Grid мереж на мінімальному рівні в Україні достатньо виконати заміну моральнозастарілого та технічнозношеного підстанційного електрообладнання. Проте, такий підхід не буде забезпечувати компактності підстанцій (далі — ПС), оскільки схемотехнічні рішення, за якими споруджувалися існуючі ПС у 70–80-х роках минулого століття, були направлені на забезпечення можливості резервування відносно малонадійного електрообладнання (за сучасними міркуваннями) шляхом ускладнення розподільних установок (далі — РУ) ПС.

В роботах [1–3] викладено результати досліджень показників надійності схем електричних з'єднань РУ ПС (здебільшого тих, які стосуються **НЕК "Укренерго"**) та сформовано результуючу таблицю із переліком рекомендованих схем електричних з'єднань РУ ПС з вищою напругою 35–750 кВ та областю їх застосування. Ці результати дозволяють вибирати схеми електричних з'єднань для ПС, на яких буде застосовуватися сучасне електрообладнання, яке практично не потребує обслуговування протягом всього терміну експлуатації. В роботах [1–3] доведено відсутність потреби в ускладненні схем електричних з'єднань ПС: для підвищення їх надійності достатньо використовувати сучасне електрообладнання. Проте, в цих роботах недостатньо уваги приділено наймасовішим схемам електричних з'єднань РУ, що знайшли застосування на відгалужувальних, тупикових та прохідних ПС 35–150 кВ операторів систем розподілу (далі — ОСР). **Це такі схеми, як:**

- 35(110-220)-2 "два блоки лінія–трансформатор з вимикачами в колах трансформаторів і неавтоматичною перемичкою з боку ліній";
- 35(110-220)-3 "місток з вимикачами в колах ліній і ремонтною перемичкою з боку ліній";
- 35(110-220)-4 "місток з вимикачами в колах трансформаторів і ремонтною перемичкою з боку трансформаторів".

У ряді англійських літературних джерел [4–6] наведено рекомендовані переліки схем електричних з'єднань, які слід використовувати із сучасним "новим" електрообладнанням, яке майже не потребує обслуговування протягом терміну експлуатації. Такі схеми, на відміну від вимог [7–8], не мають неавтоматичних та ремонтних перемичок, що дозволяє зробити РУ ПС більш компактними, простими в експлуатації та пристосованими до задач Smart Grid. Обґрунтування можливості відмови від неавтоматичних та ремонтних перемичок автори не знайшли, тому були змушені виконати власті дослідження.

ОСНОВНІ МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для обґрунтування схем електричних з'єднань "35(110-220)-2", "35(110-220)-3" та "35(110-220)-4" **було виконано розрахунки їх показників надійності для двох варіантів:**

- наявності у цих схемах неавтоматичних/ремонтних перемичок та застосування "старого"¹ електрообладнання, яке потребує обслуговування;
- відсутності у цих схемах неавтоматичних/ремонтних перемичок та застосування "нового"² електрообладнання, що практично не потребує обслуговування.

¹ Тут і далі "старе" — оливне та повітряне електрообладнання.

² Тут і далі "нове" — вакуумне та елегазове електрообладнання.

Вихідні показники надійності елементів РУ ПС взяті із [1], де вони були систематизовані та узагальнені із використанням широкого переліку літературних джерел.

Згідно із діючими нормативними документами [7–8] схема 35(110-220)-2 “два блоки лінія–трансформатор з вимикачами в колах трансформаторів і неавтоматичною перемичкою з боку ліній” (див. рис. 1) може застосовуватися як на відгалужувальних, так і на тупикових ПС з вищою напругою (далі — ВН) 35-220 кВ для забезпечення надійного живлення приєднань зі сторони низької напруги (далі — НН) (та середньої напруги (далі — СН) — за наявності).

Неавтоматичну перемичку із двох роз’єднувачів в цій схемі використовують при вимиканні однієї з ліній, що дозволяє заживити обидва силові трансформатори від лінії, що залишилася в роботі [7–8]. Оскільки пошкодження ліній відбуваються частіше, ніж силових трансформаторів, то у більшості випадків застосування неавтоматичної перемички є виправданим. Перемичку із роз’єднувачами можна не застосовувати тільки в умовах інтенсивного забруднення ізоляції та (або) при обмеженій площі забудови [7–8].

Розрахунки показників надійності для схеми “35(110-220)-2” свідчать про те, що для даної схеми без ремонтної перемички у разі застосування “нового” електрообладнання більшість показників надійності будуть дещо кращими, ніж у випадку наявності перемички та встановленого “старого” електрообладнання. **Так для класу напруги 110 кВ:**

- очікувана середня тривалість безвідмовної роботи складає 11,0 та 10,4 років у схемі з “новим” та “старим” електрообладнанням відповідно;
- очікувана ймовірність безвідмовної роботи за один рік експлуатації — 0,912791 та 0,908494 в.о. відповідно,

проте середня тривалість відновлення схеми буде дещо гіршою — 3,17 та 2,34 години відповідно. Це викликано тим, що нове обладнання має значно менші частоти відмов та дещо більші середні тривалості відновлення [1].

Подібні відмінності у показниках надійності також мають місце і для класів напруги 35 та 220 кВ, на яких може застосовуватися схема “35(110-220)-2”.

Несуттєва відмінність у показниках надійності викликана тим, що основний вплив на надійність електропостачання споживачів, що живляться від ПС із схемою “35(110-220)-2”, роблять живильні ЛЕП.

Враховуючи вищезазначене та відносно невеликі значення середніх тривалостей відновлення схеми “35(110-220)-2” і дещо кращі інші показники надійності схеми без перемички можна рекомендувати не споруджувати неавтоматичну перемичку у даній схемі. Перемичку пропонується застосовувати тільки за відповідного обґрунтування, а саме, коли за технічним станом лінія часто буде виводитися в ремонт, а

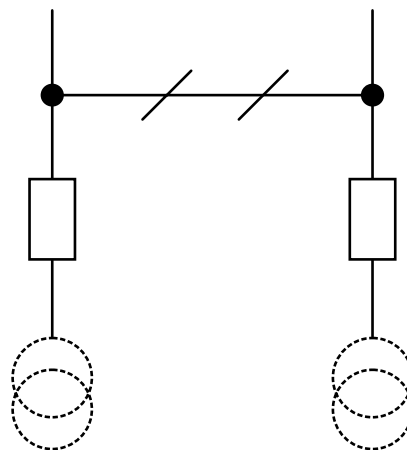


Рис. 1. Спрощена структурна схема 35(110-220)-2 “два блоки лінія–трансформатор з вимикачами в колах трансформаторів і неавтоматичною перемичкою з боку ліній”

силовий трансформатор, який залишається в роботі, не здатен взяти на себе усе навантаження іншого трансформатора, який відключається разом із лінією.

Згідно з [7-8] схеми 35(110-220)-3 “місток з вимикачами в колах ліній і ремонтною перемичкою з боку ліній” (див. рис. 2, а) та 35(110-220)-4 “місток з вимикачами в колах трансформаторів і ремонтною перемичкою з боку трансформаторів” (див. рис. 2, б) слід застосовувати в РУ ВН 35-220 кВ прохідних ПС **для здійснення секціонування транзитної лінії та:**

- збереження в роботі обох силових трансформаторів при пошкодженні однієї із ділянок транзиту (пріоритет збереження електропостачання споживачів) — для схеми “35(110-220)-3”;
- збереження транзитного потоку електроенергії при пошкодженні силових трансформаторів (пріоритет збереження транзиту) — для схеми “35(110-220)-4”.

У випадку пошкодження одного із двох силових трансформаторів у схемі “35(110-220)-3” (див. рис. 2, а) відключаються два вимикачі (а також вимикачі з боку НН та СН (за наявності)). В такому разі транзитний потік потужності через ПС буде

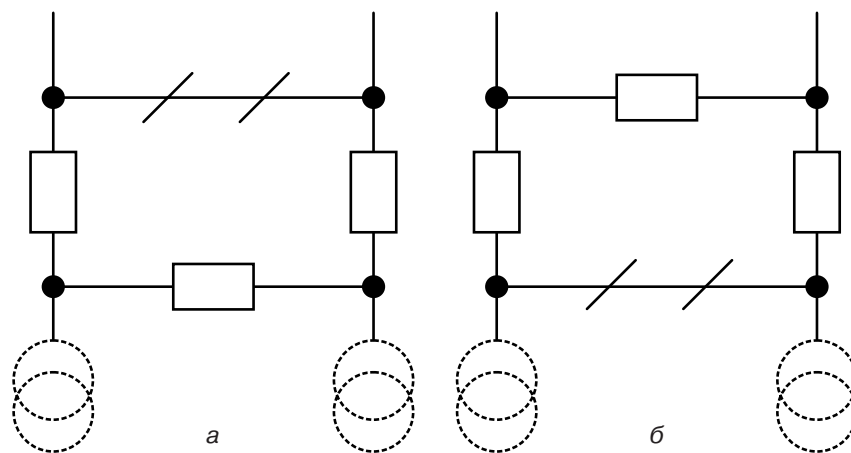


Рис. 2. Спрощені структурні схеми містків із ремонтною перемичкою: **а** — 35(110-220)-3 “місток з вимикачами в колах ліній і ремонтною перемичкою з боку ліній”; **б** — 35(110-220)-4 “місток з вимикачами в колах трансформаторів і ремонтною перемичкою з боку трансформаторів”

розірваний тільки на час оперативних перемикачів. Оскільки пошкодження на ЛЕП є більш ймовірними подіями, ніж пошкодження силових трансформаторів, то перевагою схеми “35(110-220)-3” є те, що за пошкодження ЛЕП в даній РУ ПС буде відключатися тільки один вимикач.

До недоліків схеми “35(110-220)-4” слід віднести те, що у випадку пошкодження однієї із ліній (ділянки транзиту) у такій схемі відключиться два вимикачі та знеструмиться один із силових трансформаторів (див. рис. 2, б). Заживити цей трансформатор можна тільки після від’єднання пошкодженої лінії роз’єднувачем та включенням двох вимикачів. Перевагою схеми “35(110-220)-4” є те, що у ній за пошкодження силового трансформатора буде відключатися тільки один вимикач (а також вимикачі з боку НН та СН (за наявності)). У цьому разі транзитний потік потужності через ПС буде зберігатися. Особливо ефективно застосовувати схему “35(110-220)-4” на ПС з нерівномірним графіком навантаження, на яких для зменшення втрат електроенергії в трансформаторах доцільно періодично вимикати один із них.

У випадку відсутності оперативного персоналу на ПС зі схемами “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4” необхідно передбачати віддалене телекерування не тільки вимикачами, але і роз’єднувачами із забезпеченням візуального контролю за оперативними перемикачними з використанням систем відеоспостереження.

Ремонтна перемичка у схемах “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4” в основному використовується під час виводу в ремонт секційних вимикачів [7–8], що дозволяє зберегти транзит потужності через РУ ВН ПС. У разі використання таких схем на напрузі 35 кВ, навіть за наявності “старих” типів вимикачів, ремонтна перемичка не застосовується через незначну тривалість ремонту вимикачів. На напругах 110–220 кВ перемичку із роз’єднувачами дозволяється не застосовувати тільки в умовах інтенсивного забруднення ізоляції та (або) при обмеженій площі забудови [7–8].

Розрахунки показників надійності для схем “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4” показують, що ці схеми без ремонтної перемички у разі застосування “нового” електрообладнання будуть кращими, ніж у випадку наявності перемички та встановленого “старого” електрообладнання, для передачі електроенергії з РУ ВН до РУ НН (або СН). **Так для класу напруги 110 кВ:**

1) для схеми “35(110-220)-3”:

- очікувана середня тривалість безвідмовної роботи складає 11,1 та 8,1 років у схемі з “новим” та “старим” електрообладнанням відповідно;
- очікувана ймовірність безвідмовної роботи за один рік експлуатації — 0,914153 та 0,883544 в.о. відповідно;
- середня тривалість відновлення — 2,57 та 3,37 години відповідно;

2) для схеми “35(110-220)-4”:

- очікувана середня тривалість безвідмовної роботи складає 12,0 та 9,9 років у схемі з “новим” та “старим” електрообладнанням відповідно;

- очікувана ймовірність безвідмовної роботи за один рік експлуатації — 0,919853 та 0,903652 в.о. відповідно;
- середня тривалість відновлення — 2,30 та 2,37 години відповідно.

В режимі транзиту електричної енергії через РУ ВН після заміни обладнання на “нове” надійність схем може дещо (несуттєво) погіршитися. **Так для класу напруги 110 кВ:**

1) для схеми “35(110-220)-3”:

- очікувана середня тривалість безвідмовної роботи складає 1,41 та 1,51 років у схемі з “новим” та “старим” електрообладнанням відповідно;
- очікувана ймовірність безвідмовної роботи за один рік експлуатації — 0,493121 та 0,516566 в.о. відповідно;
- середня тривалість відновлення — 5,40 та 4,47 години відповідно;

2) для схеми “35(110-220)-4”:

- очікувана середня тривалість безвідмовної роботи складає 1,46 та 1,48 років у схемі з “новим” та “старим” електрообладнанням відповідно;
- очікувана ймовірність безвідмовної роботи за один рік експлуатації — 0,503083 та 0,504254 в.о. відповідно;
- середня тривалість відновлення — 4,93 та 4,65 години відповідно.

Несуттєве погіршення показників надійності місткових схем з “новим” електрообладнанням та “без ремонтних перемичок” в режимі транзиту викликано тим, що у них буде відсутній “додатковий шлях успішного функціонування” [2], який має місце у аналогічних схемах “із перемичками”. Несуттєва відмінність у показниках надійності схем з “новим” та “старим” електрообладнанням пов’язана з тим, що на надійність схеми в режимі транзиту істотно впливають ділянки транзитних ЛЕП. Варто зазначити, що підсилення вимог до улаштування ЛЕП відповідно до ПУЕ-2017 сприятиме підвищенню їх надійності та зробить відмову від спорудження ремонтних/резервних перемичок більш обґрунтованою.

Подібні відмінності у показниках надійності мають місце для класу напруги 220 кВ, на якому також застосовуються схеми “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4”.

Враховуючи вищезазначене можна відмовитись від спорудження ремонтної перемички у схемах містків та внести відповідні зміни до схем “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4” у [7–8]:

- 35(110-220)-3 “місток з вимикачами в колах ліній”;
- 35(110-220)-4 “місток з вимикачами в колах трансформаторів”,

що дозволить будувати більш компактні та прості ПС. Ремонтну перемичку доцільно дозволити до використання тільки за відповідного обґрунтування.

Слід зазначити, що схеми містків “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4” без ремонтних перемичок відповідають схемам “Н3 configuration (CB in overhead lines)” та “Н3 configuration (CB in transformers)”, які застосовуються у ряді країн ЄС [4]. Окрім схем “Н3” у країнах ЄС застосовуються також схеми “Н4” та “Н5” (див. рис. 3).

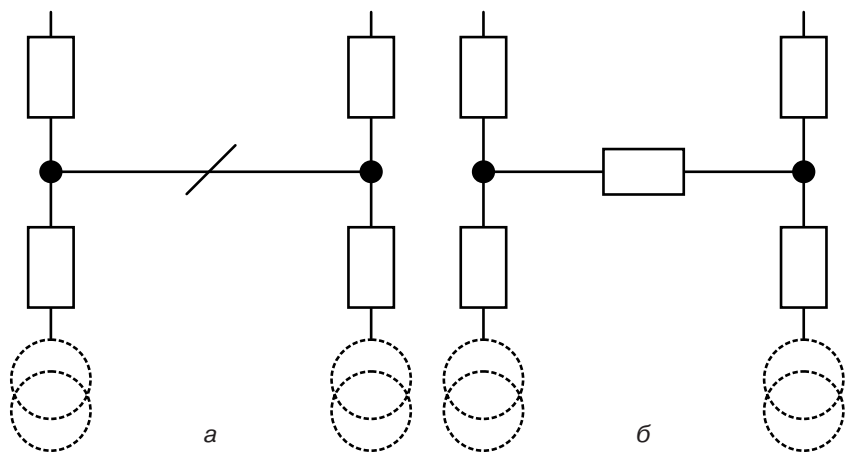


Рис. 3. Н-подібні схеми: а — типу “Н4”; б — типу “Н5”

Схема “Н4” є схемою містка без секційного вимикача, проте у ній передбачені вимикачі як у колах ліній, так і у колах трансформаторів. Дана схема є дещо дорожчою, ніж схеми містків “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4”.

Перевагою схеми “Н4” є те, що пошкодження на ЛЕП та у трансформаторах будуть відключатися тільки одним вимикачем схеми. Проте, у випадку пошкодження перемички із роз’єднувачем, вся схема буде знеструмлена. Оскільки пошкодження силових трансформаторів є малоймовірною подією, то доцільність спорудження даної схеми є сумнівною. Разом з тим ця схема може виявитися більш ефективною, ніж схема 35(110-220)-4, на ПС із нерівномірним графіком навантаження, на яких для зменшення втрат електроенергії в трансформаторах доцільно періодично вимикати один із них (при цьому кожна із ділянок транзиту буде мати свій захист на лінійних вимикачах).

Схема “Н5” є комбінацією схем “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4”, яка об’єднує їх переваги. Її недо-

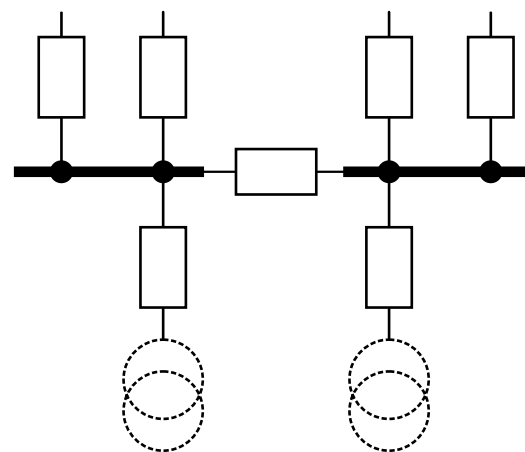


Рис. 4. Спрощена структурна схема 35(110-220)-5 “одна робоча, секціонована вимикачем, система шин”

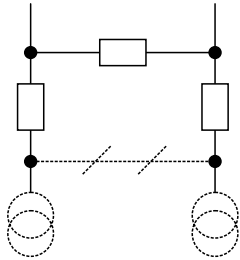
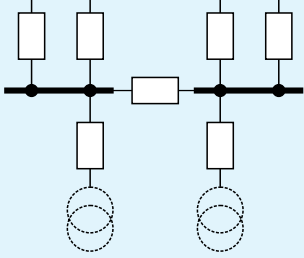
ліком є необхідність встановлення 5 вимикачів. Оскільки пошкодження силових трансформаторів є малоймовірною подією, то доцільність спорудження даної схеми є сумнівною, особливо на класах напруги 110–220 кВ.

Кожна із схем “Н4” та “Н5” можуть мати місце у електричних мережах оператора системи передачі (далі — ОСП) та ОСР України на першому етапі розвитку майбутньої вузлової ПС, коли у перспективі спорудження РУ передбачається за схемою 35(110-220)-5 “одна робоча, секціонована вимикачем, система шин” (див. рис. 4).

Враховуючи вищезазначене можна рекомендувати споруджувати неавтоматичні/ремонтні перемички у схемі “35(110-220)-2” та схемах містків “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4” тільки за наявності відповідного обґрунтування, про що також свідчать світові тенденції, викладені у [4–6]. Рекомендований перелік схем таких РУ ПС на напругах 35–220 кВ зведено до табл. 1.

Таблиця 1. Рекомендований перелік схем РУ ПС напругою від 35 кВ до 220 кВ і сфера їх застосування

Шифр	Найменування	Умове зображення ^{1,2}	Сфера застосування			
			Напруга РУ, кВ	Сторона	Кількість лінійних приєднань	Умови та особливості застосування
35-2 110-2 150-2 220-2	Два блоки лінія–трансформатор з вимикачами		35 110 150 220	ВН	2	Відгалужувальні (у разі приєднання до лінії електропередавання, що живить кілька ПС) та тупикові ПС, за потужності трансформаторів до 63 МВ·А
35-3 110-3 150-3 220-3	Місток з вимикачами в колах ліній		35 110 150 220	ВН	2	Прохідні ПС, за необхідності секціонування ліній і збереження електропостачання споживачів в разі пошкодження однієї із ділянок транзиту, за потужності трансформаторів до 63 МВ·А

Шифр	Найменування	Умове зображення ^{1,2}	Сфера застосування			
			Напруга РУ, кВ	Сторона	Кількість лінійних приєднань	Умови та особливості застосування
35-4 110-4 150-4 220-4	Місток з вимикачами в колах трансформаторів		35 110 150 220	ВН	2	Прохідні ПС, за необхідності секціонування ліній і збереження транзиту в разі пошкодження трансформатора, за потужності трансформаторів до 63 МВ·А
35-5 110-5 150-5 220-5	Одна робоча, секціонована вимикачем, система шин		35 110 150 220	ВН	1 на секцію шин	Прохідні ПС з перспективою перетворення на вузлові. На першому етапі розвитку схеми дозволено приєднання по одній лінії на кожен секцію та секціонування системи шин роз'єднувачами
			35	ВН СН	3-4	Для ВН вузлових ПС мережі напругою 35 кВ та СН і НН на ПС напругою 110-330 кВ.
				НН	до 4-х на секцію шин	Для РП з ПС 35/0,4 кВ кількість ліній 35 кВ може бути збільшена до 8.
			110 150 220	ВН	3-5	Для ВН та СН вузлових ПС мережі напругою 110-220 кВ.
110 150 220	СН	3-8				

¹ Роз'єднувачі, які використовують для відокремлення вимикачів, на схемах не наведено

² Дозволені до встановлювання за результатами обґрунтування неавтоматичні/ремонтні перемички на схемах наведено пунктиром

ВИСНОВКИ

1. У разі застосування “нового” електрообладнання, яке практично не потребує обслуговування, у схемах блоків ліній-трансформатор та місткових схемах на напругах 35-220 кВ можна не встановлювати неавтоматичні/ремонтні перемички. При цьому показники надійності таких схем будуть не гіршими, ніж у таких же схемах із наявними неавтоматичними/ремонтними перемичками та “старим” електрообладнанням, яке потребує частого виведення в ремонт.

2. Неавтоматичні/ремонтні перемички слід застосовувати тільки за відповідного обґрунтування.

3. У країнах ЄС окрім схем містків без перемичок застосовуються схеми “Н4” та “Н5”, які більш витратні (мають 4 та 5 вимикачів потужності відповідно), ніж схеми “35(110-220)-3” та “35(110-220)-4”. Доцільність застосування схем “Н4” та “Н5” у електричних мережах ОСР та ОСП в Україні потребує техніко-економічного обґрунтування з урахуванням усіх можливих чинників. Проте такі схеми можуть мати місце на початковому етапі розвитку майбутньої вузлової ПС, коли у перспективі спорудження РУ передбачається за схемою 35(110-220)-5 “одна робоча, секціонована вимикачем, система шин”.

ЛІТЕРАТУРА

- Буйний Р.О., Гай О.В., Діхтярук І.В., Ворушило А.О. Щодо показників надійності елементів електричних мереж // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2022. — № 3-6. — С. 14-17.
- Буйний Р.О., Гай О.В., Діхтярук І.В., Ворушило А.О. Про обґрунтування переліку схем розподільних установок підстанцій напругою 35-750кВ і сферу їх застосування // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2022. — № 3-6. — С. 18-23.
- Звіт про науково-дослідну роботу (заключний). Розробка пропозицій щодо оптимізації застосування схем розподільних установок електричних підстанцій з елегазовими та вакуумними вимикачами. — К.: НЕК “Укренерго”, 2022. — 241 с.
- Cigré JWG V3/C1/C2.14, Circuit Configuration Optimization, CIGRÉ, No. 585, June, 2014.
- ABB Switchgear Manual, Cornelsen Verlag, Berlin 10th, 10th revised edition, 2001. 903 с
- Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna Stacje elektroenergetyczne najwyższych napięć PSE — SF.STACJE/2015.
- Правила улаштування електроустановок. — Видання офіційне. Міністерство енергетики України. — Х.: Форт, 2017. — 760 с.
- СОУ-Н ЕЕ 20.178:2008 Схеми принципові електричних розподільчих установок напругою від 6 до 750 кВ електричних підстанцій: Настанова.