

**НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ РОБОТИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ****П. В. Махлін, О. А. Шрам**

Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Жуковського 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: alexshrum@yahoo.com

**О. П. Кузьменко**

ДП НЕК «Укренерго» РДЦ Дніпровської ЕС

вул. Гребельна 2, м. Запоріжжя, 69096, Україна.

Запропоновано методику та проведено дослідження неповнофазних режимів роботи ліній електропередач високої напруги розподільчих мереж енергосистеми, що виникають при обриві фаз без коротких замикань. Такі режими не завжди супроводжуються великими аварійними струмами або струмами зворотної чи нульової послідовності достатніми для спрацьовування релейного захисту. Проведений аналіз роботи основного та резервного захисту в цих режимах та побудовані залежності струмів зворотної та нульової послідовностей від місця пошкодження. Встановлено, що в окремих режимах роботи енергосистеми значення цих струмів недостатні для пуску ланцюгів відключення, тому обрив може бути визначений тільки за вимірювальними приладами у фазах, або за непрямими показниками і усунутий оперативним персоналом. Запропоновані рекомендації по розробці інструкцій для оперативного персоналу для виявлення таких пошкоджень в електричних мережах.

**Ключові слова:** неповнофазний режим, релейний захист, коротке замикання, несиметричний режим, ЛЕП, обрив фази.

**НЕПОЛНОФАЗНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ****П. В. Махлин, А. А. Шрам**

Национальный университет «Запорожская политехника»

ул. Жуковского 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: alexshrum@yahoo.com

**О. П. Кузьменко**

ГП НЭК «Укрэнерго» РДЦ Днепропетровской ЭС

ул. Плотинная 2, г. Запорожье, 69096, Украина.

Предложена методика и проведены исследования неполнофазных режимов работы линий электропередач высокого напряжения распределительных сетей энергосистемы, возникающих при обрыве фаз без коротких замыканий. Такие режимы не всегда сопровождаются большими аварийными токами или токами обратной или нулевой последовательности достаточными для срабатывания релейной защиты. Проведенный анализ работы основной и резервной защиты в этих режимах и построены зависимости токов обратной и нулевой последовательностей от места повреждения. Установлено, что в отдельных режимах работы энергосистемы значения этих токов недостаточны для пуска цепей отключения, поэтому обрыв может быть определен только по измерительным приборам в фазах, или по косвенным показателям и устранен оперативным персоналом. Предложены рекомендации по разработке инструкций для оперативного персонала для выявления таких повреждений в электрических сетях.

**Ключевые слова:** неполнофазный режим, релейная защита, короткое замыкание, несимметричный режим, ЛЭП, обрыв фазы.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Електроенергетичні системи – це складний виробничий комплекс, всі елементи якого одночасно беруть участь у єдиному виробничому процесі вироблення, перетворення, передачі та споживання електроенергії. Основною специфічною особливістю цього процесу є швидкоплинність та неминучість аварійних пошкоджень. Одним із видів порушень роботи в електроенергетичних системах є пориви проводів лінії електропередач (ЛЕП), неповнофазні комутації, порушення контактів, що викликають неповнофазні режими. Такі режими не завжди супроводжуються великими аварійними струмами або струмами зворотної чи нульової послідовності достатніми для спрацьовування релейного захисту. Згідно з ПУЕ [1] для ЛЕП з двостороннім живленням застосовується диференційно-фазний високочастотний захист, як основний, та резервні захисти – триступеневий дистанційний захист та чотириступеневий захист нульової послідовності. При поривах проводів можливі режими без короткого замикання (КЗ) на землю та з КЗ на землю. При КЗ на землю виникає великий

аварійний струм достатній для спрацьовування основного захисту, що реагує на зворотну або нульову складову струму КЗ, або ступеню струмового захисту нульової послідовності (СЗНП) з боку підстанції де сталося КЗ. На іншу підстанцію сигнал на відключення передається через спеціальний зв'язок. При поривах проводів фаз ЛЕП без КЗ на землю струм пошкодження, як правило, недостатній для спрацьовування основного захисту [2, 3]. Для захисту нульової послідовності струм може бути також недостатній навіть для спрацьовування четвертого ступеню. В цьому випадку необхідно мати сигналізацію від неповнофазних режимів. Для ЛЕП з одностороннім живленням при КЗ на землю з боку джерела живлення реагує основний захист – дистанційний або струмовий, а при КЗ з боку навантаження проблема аналогічна пориву без КЗ.

Досвід експлуатації [2–4] показує, що у складних електричних мережах при поривах проводів ЛЕП виникають режими, які приводять до неселективної роботи релейного захисту та надлишкових відключень. Такі випадки неодноразово мали місце в ме-

режах енергосистем. Аналіз пошкоджень на ЛЕП 110 - 220 кВ показує, що понад 60% аварійних порушень припадає на однофазні замикання й обриви однієї фази ЛЕП [5, 6]. На лініях з одностороннім живленням, як правило, залишаються відключеними всі фази лінії протягом усього часу пошуку місця пошкодження і ремонту. Продовження роботи ЛЕП двома фазами за задалегідь складеною інструкцією дозволяє в більшості випадків значно скоротити тривалість перерви енергопостачання. Крім переходів на роботу повітряної лінії (ПЛ) двома фазами в результаті пошкодження, неповнофазний навантажувальний режим може бути передбачений як захід, що дозволяє проводити роботи на ЛЕП без перерви електропостачання, наприклад пофазної плавки ожеледі.

У разі обриву фази ПЛ без КЗ пристрої релейного захисту цієї лінії можуть прийти в дію, якщо після обриву струм нульової послідовності і потужність нульової послідовності будуть більше заданих значень, що визначається величиною струму навантаження попереднього режиму [7, 8].

На основі вищесказаного актуальною задачею є проведення аналізу процесів, що виникають при неповнофазних режимах, побудова залежностей величини струмів зворотної та нульової послідовності від різних факторів та реакції релейного захисту.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** При обриві однієї фази трифазного ланцюга (рис. 1) виникає несиметричний режим, що характеризується наступними граничними умовами:

$$\begin{cases} \dot{I}_{LA}^{(1)} = 0 \\ \Delta \dot{U}_{LB}^{(1)} = 0 \\ \Delta \dot{U}_{LC}^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

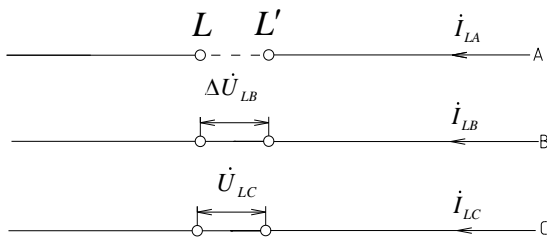


Рисунок 1 – Трифазний ланцюг з обривом фази А в місці  $L - L'$

Для аналізу розглянутого аварійного режиму в розрив фази вводять джерело поздовжньої напруги  $\dot{U}_{LA}^{(1)}$  і складають схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей [9, 10].

Враховуючи метод симетричних складових граничні умови (1) можуть бути записані у вигляді

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2} = \Delta \underline{U}_{LA0} = \frac{\Delta \underline{U}_{LA}}{3}, \quad (2)$$

$$\underline{I}_{LA} = -(\underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{LA0}). \quad (3)$$

За цим рівнянням може бути синтезована комплексна схема заміщення розглянутого порушення поздовжньої несиметрії за якою складають розрахункові вирази для визначення струму прямої послідовності

$$\underline{I}_{LA1} = \frac{E_{A\Sigma}}{z_{1ekv} + z_{LL1}}, \quad (4)$$

і спаду напруги прямої послідовності в місці розриву

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{I}_{LA1} z_{LL1}, \quad (5)$$

$$z_{LL1} = \frac{z_{2ekv} z_{0ekv}}{z_{2ekv} + z_{0ekv}}, \quad (6)$$

де  $z_{LL1}$  – додатковий опір, внесений в схему заміщення прямої послідовності щодо затискачів  $L_1 - L'$  гілками схем заміщення зворотної та нульової послідовностей.

З урахуванням (3), струми зворотної та нульової послідовностей, що протікають в інших гілках комплексної схеми заміщення визначаються виразами

$$\underline{I}_{LA2} = \frac{-E_{A\Sigma} z_{LL1}}{z_{2ekv} (z_{1ekv} + Z_{LL1})}, \quad (7)$$

$$\underline{I}_{LA0} = \frac{-E_{A\Sigma} z_{LL1}}{z_{0ekv} (z_{1ekv} + Z_{LL1})}. \quad (8)$$

Напруга джерела прямої послідовності, що включиться в місці пошкодження, визначається виразом:

$$\underline{U}_{LA} = \frac{3E_{A\Sigma} z_{LL1}}{z_{1ekv} + z_{LL1}}. \quad (9)$$

Отримані розрахункові співвідношення (4) - (9) являють собою рівняння зв'язку симетричних складових параметрів режиму особливої фази. Струми і напруги інших фаз виражаються через оператор фази. Напруга в будь-якій точці мережі визначаються за розрахунковими виразами струмів (4), (7), (8) з використанням перетворень комплексної схеми заміщення щодо розглянутої точки мережі для обчислення опорів зв'язку даної точки з джерелом живлення.

У складних енергосистемах між вузловими підстанціями є лінії зв'язку високої напруги. Як правило ці лінії є ЛЕП з двостороннім живленням. Їх завантаження та напрям потужності може постійно змінюватись у часі та залежить від багатьох факторів: від електроенергії, що споживається по кожній підстанції, від запланованих та ремонтних робіт та аварійних відключень та інших. Крім того, у енергосистемі є пікові електростанції – гідроелектростанції, режим видачі електроенергії яких залежить від часу доби, кількості необхідної електроенергії для енергосистеми у час максимального її навантаження та

аварійної ситуації. Тому завантаження ліній зв'язку з гідроелектростанціями теж не є стабільним. На рис. 2 показана структурна схема системи електропостачання промислового району, яка складається з двох вузлових підстанцій (ПС1 та ПС2), гідроелектростанції (ГЕС), та двох транзитних підстанцій промислового підприємства. На лініях зв'язку між підстанціями та з ГЕС згідно з ПУЕ [1] встановлений диференційно-фазний високочастотний захист (ДФЗ), як основний, та резервний захист – триступеневий дистанційний захист та чотириступінчатий захист нульової послідовності. Запуск передавача і ланцюгів відключення основного захисту ЛЕП – диференціально-фазного високо-частотного захисту при несиметричних аварійних режимах виконується від струмів зворотної  $I_2$  або нульової послідовності  $I_0$ .

Розрахунок струмів і напруг при обриві фази розглядаємо для ліній зв'язку Л1 та Л2 між вузловими підстанціями ПС1 та ПС2; ліній Л3 та Л4 між вузловою підстанцією ПС1 і транзитною підстанцією промислового підприємства ПС3, на яку також подається живлення з гідроелектростанції; ліній Л5 та Л6 між вузловою підстанцією ПС1 та транзитною під-

станцією промислового підприємства ПС4. Дослідження проводились при різних режимах генерації ГЕС:

- 0% генерації гідроелектростанції;
- 50% генерації гідроелектростанції;
- 100% генерації гідроелектростанції.

Для визначення чутливості основного та резервного релейного захисту ЛЕП при обриві проводу фази проводимо розрахунок режимів, що мали місце до обриву фази. Так як основний захист (ДФЗ) реагує на струм зворотної послідовності, то для дослідження його чутливості розраховується складова струму зворотної послідовності та по ній визначається можливість спрацювання ланцюгів передавача та чутливість ланцюгів відключення захисту. Для визначення можливості спрацювання та чутливості резервного захисту розраховуємо складову струму нульової послідовності. Ці струми порівнюються зі струмами зворотної послідовності пуску передавача основного захисту ліній і струмами зворотної послідовності пуску ланцюгів відключення для визначення чутливості основного захисту ліній до даного виду пошкодження.

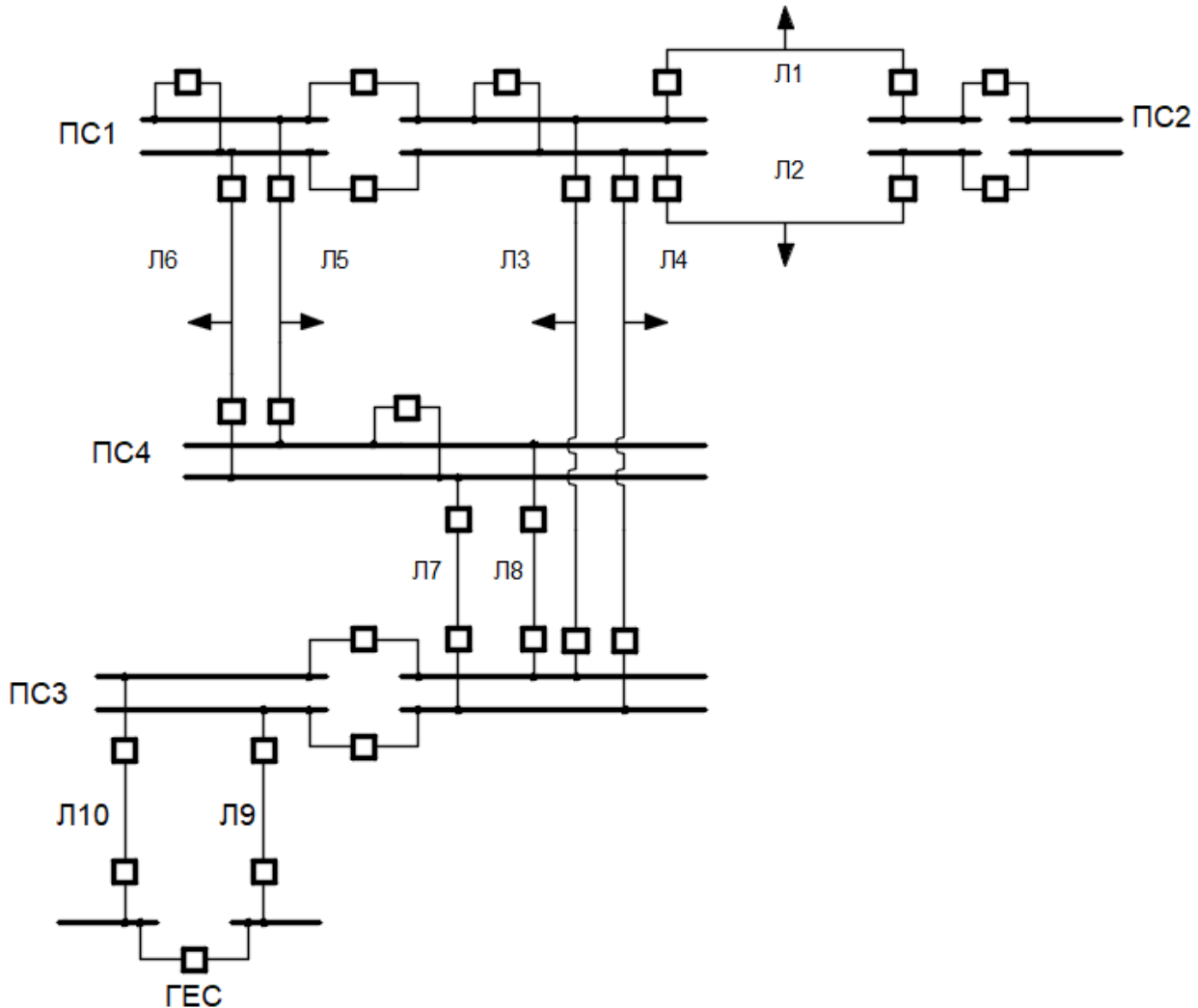


Рисунок 2 – Структурна схема системи електропостачання промислового району

Найбільше завантаження ліній зв'язку Л1 та Л2 між вузловими підстанціями ПС1 та ПС2 відбувається коли ГЕС генерує 100% потужності. Результати розрахунку струму зворотної послідовності при

обриві проводу фази біля шин ПС1 та біля шин ПС2 наведені у табл. 1. Як видно з табл. 1 струми зворотної послідовності не достатні ні для пуску передавача, ні для пуску ланцюгів відключення. Таким

чином враховуючи, що даний режим (100% генерації ГЕС) характеризується найбільшими струмами попереднього режиму, можна зробити висновок, що при обриві фази без КЗ на лініях Л1 та Л2 основний захист ДФЗ реагувати не буде.

Для оцінки роботи резервного захисту розраховані струми нульової послідовності при обриві фази ліній Л1 та Л2 від місця пошкодження у трьох режимах. При цьому у режимі 50% генерації потужно-

сті ГЕС розглянутий режим коли напруга від ГЕС подається тільки на одну систему шин ПС3. З урахуванням того, що на ПС1 всі міжшинні та секційні вимикачі включені на завантаження ЛЕП Л1 та Л2 це ніяк не впливає, а ЛЕП Л3 та Л5 завантажені максимально. Результати розрахунку потрібних значень струмів та напруг нульової послідовності ( $3I_0$  та  $3U_0$ ) при обриві фази А лінії Л1 приведені у табл. 2, а в табл. 3 лінії Л2.

Таблиця 1 – Результати розрахунку струмів зворотної послідовності обриву фази А ліній Л1, Л2

Вид пошкодження	Пуск передавача по $I_2$ , кА	Пуск ланцюгів відключення по $I_2$ , кА	Л1		Л2	
			$I_2$ з боку ПС1	$I_2$ з боку ПС2	$I_2$ з боку ПС1	$I_2$ з боку ПС2
Обрив у шин ПС1	0,12	0,36	-0,071	-0,07	-0,063	-0,064
Обрив у шин ПС2			-0,064	-0,064	-0,074	-0,073

Таблиця 2 – Результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А лінії Л1

№ п/п	Місце пошкодження	Режим роботи ГЕС, %	3 боку підстанції ПС1				3 боку підстанції ПС2			
			$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$	$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$
1	на шинах ПС1	0%	84	-47	780	<1	72	-106	240	<1
		50%	-65	36	780	<1	55	-82	240	<1
		100%	200	112	780	<1	170	-253	240	<1
2	на шинах ПС2	0%	-76	19	780	<1	82	-164	240	<1
		50%	-41	10	780	<1	44	-88	240	<1
		100%	156	39	780	<1	168	-338	240	<1

Таблиця 3 – Результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А лінії Л2

№ п/п	Місце пошкодження	Режим роботи ГЕС, %	3 боку підстанції ПС1				3 боку підстанції ПС2			
			$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$	$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$
1	на шинах ПС1	0%	-63	36	780	<1	54	-79	240	<1
		50%	-76	43	780	<1	65	-96	240	<1
		100%	-21	118	780	<1	178	-262	240	<1
2	на шинах ПС2	0%	-78	19	780	<1	84	-169	240	<1
		50%	-38	9	780	<1	41	-83	240	<1
		100%	-154	38	780	<1	167	-366	240	<1

Як видно з табл. 2, 3 у всіх режимах струм нульової послідовності менше струму спрацьовування четвертого ступеню СЗНП, коефіцієнт чутливості менше одиниці ( $K_{\text{ч}} < 1$ ). Таким чином резервний захист також не буде реагувати на режим при обриві фази.

Для оцінки можливості спрацьовування основного захисту при обриві фази проведені дослідження

Таблиця 4 – Результати розрахунку струмів зворотної послідовності обриву фази А ліній Л3, Л4

Вид	Пуск передавача	Пуск ланцюгів	Л3	Л4
-----	-----------------	---------------	----	----

струму зворотної послідовності. Результати розрахунку при обриві проводу фази у шин ПС1 та у шин ПС3 наведені у табл. 4, а залежність струму зворотної послідовності, що протікає через напівкомплект диференційно-фазного захисту з боку підстанції ПС1 та ПС3 від місця пошкодження приведена на рис. 3.

пошкодження	ча по $I_2$ , кА	відключення по $I_2$ , кА	$I_2$ з боку ПС1	$I_2$ з боку ПС2	$I_2$ з боку ПС1	$I_2$ з боку ПС2
Обрив у шин ПС1	0,12	0,24	-0,231	-0,225	-0,249	-0,243
Обрив у шин ПС3			-0,241	-0,242	-0,226	-0,228

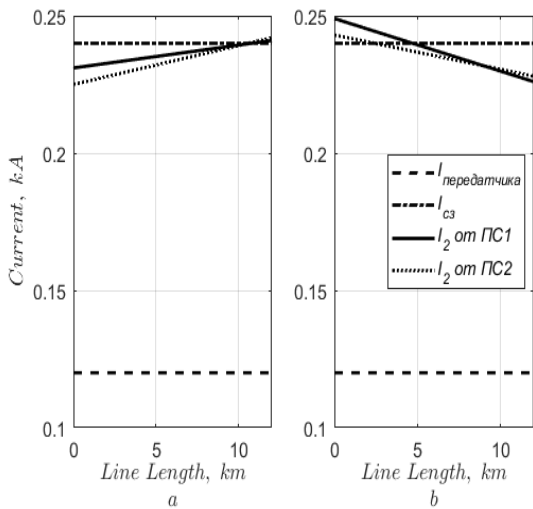


Рисунок 3 – Залежність струмів зворотної послідовності ліній Л3 (а) та Л4 (б) при обриві фази А від місця пошкодження

Як видно з табл. 4 та з рис. 3 струми зворотної послідовності достатні для пуску передавача та в окремих випадках перевищують струм пуску ланцюгів відключення, але чутливість захисту явно не-

достатня. З урахуванням того, що передавачі один раз на добу з кожного боку ЛЕП вмикаються та обмінюються високочастотними сигналами (для перевірки справності захисту) виникнення позачергового вмикання повинно сигналізувати про можливість пошкодження ЛЕП.

Для оцінки роботи резервного захисту побудовані залежності струму нульової послідовності при обриві фази ліній Л3 та Л4 від місця пошкодження у трьох режимах. З урахуванням того, що у режимі 50% генерації потужності ГЕС розглянутий режим коли напруга від ГЕС подається тільки на одну систему шин ПС3, то для ЛЕП Л4 цей режим не відрізняється від режиму при 0% генерації потужності ГЕС. У табл. 5 приведені результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А лінії Л3 та порівняно з струмами спрацьовування четвертого ступеню СЗНП, що встановлені з боку підстанцій ПС1 та ПС3, а в табл. 6 для лінії Л4. На рис. 4, 5 показані залежності струмів нульової послідовності лінії Л3, та лінії Л4, відповідно, при обриві фази А від місця пошкодження, що протікають з боку підстанції ПС1 та з боку підстанції ПС3.

Таблиця 5 – Результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А лінії Л3

№ п/п	Місце пошкодження	Режим роботи ГЕС, %	З боку підстанції ПС1				З боку підстанції ПС3			
			$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{ч}$	$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{ч}$
1	на шинах ПС1	0%	-177	134	800	<1	148	-379	432	<1
		50%, 100%	-580	440	800	<1	487	1450	432	1,13
2	на шинах ПС3	0%	146	-82	800	<1	-160	420	432	<1
		50%, 100%	-523	293	800	<1	570	-1498	432	1,32

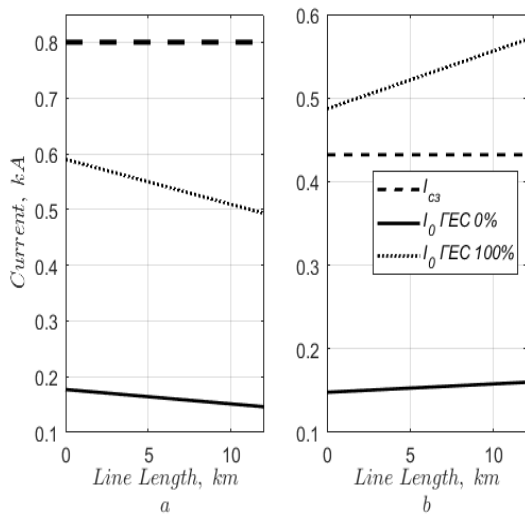


Рисунок 4 – Залежність струмів нульової послідовності лінії Л3 при обриві фази А від місця пошкодження, що протікають з боку підстанції ПС1 (а) та з боку підстанції ПС3 (б)

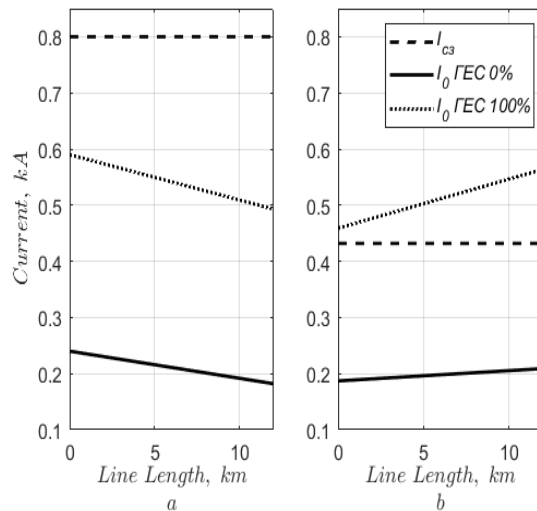


Рисунок 5 – Залежність струмів нульової послідовності лінії Л4 при обриві фази А від місця пошкодження, що протікають з боку підстанції ПС1 (а) та з боку підстанції ПС3 (б)

Таблиця 6 – Результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А лінії Л4

№ п/п	Місце пошкодження	Режим роботи ГЕС, %	З боку підстанції ПС1				З боку підстанції ПС3			
			$3I_0, A$	$3U_0, B$	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, A	$K_{\text{ч}}$	$3I_0, A$	$3U_0, B$	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, A	$K_{\text{ч}}$
1	на шинах ПС1	0%,50%	240	-187	800	<1	-187	505	432	<1
		100%	-590	461	800	<1	459	-1244	432	1,1
		100%	-532	316	800	<1	528	-1475	432	1,2
2	на шинах ПС3	0%,50%	182	-88	800	<1	-209	593	432	<1
		100%	-493	238	800	<1	565	-1607	432	1,3

Як видно з табл. 5 та рис. 4 для захисту лінії Л3 боку ПС1 мінімальний струм спрацювання четвертого ступеню СЗНП дорівнює 800 А, а струми, що протікають з цього боку лінії, менше уставки спрацювання. Звідси випливає, що захист з боку підстанції ПС1 не буде спрацьовувати.

Для захисту з боку підстанції ПС3 при живленні тільки від підстанції ПС1, струми в лінії значно менше уставки спрацювання четвертого ступеню СЗНП. У випадку коли обриву фази А передуватиме режим генерації 50% потужності ГЕС і вище струм за напрямком відповідає налаштуванням реле на пряму потужності, коефіцієнт чутливості по струму більше 1, але недостатній. Таким чином при 50% і вище генерації потужності ГЕС і обриві фази А лінії Л3 можливе, але не гарантоване спрацювання захисту. Таким чином при генерації ГЕС менше 50% потужності з боку ПС3, а також у всіх випадках живлення тільки з боку ПС1 обрив може бути визначений тільки за допомогою вимірювальних приладів, або за іншими непрямими показниками і усунутий оперативним персоналом.

Як видно з табл. 6 та рис. 5 для лінії Л4 спостерігається схожа реакція релейного захисту. З боку підстанції ПС1 струми нульової послідовності менше уставки спрацювання четвертого ступеню захис-

ту. Отже, захист працювати не буде. З боку підстанції ПС3 коефіцієнт чутливості недостатній, тому спрацювання захисту можливе, але не гарантоване.

Для аналізу роботи основного захисту ліній Л5 та Л6 проведені розрахунки режиму роботи з найбільшим їх завантаженням. У табл. 7 приведені результати розрахунку струму зворотної послідовності, а на рис. 6 показані залежності струму зворотної послідовності від місця пошкодження ЛЕП.

Як видно з табл. 7 та з рис. 6 струми зворотної послідовності достатні для пуску передавача та значно менші струму пуску ланцюгів відключення.

Для оцінки роботи резервного захисту також побудовані залежності струму нульової послідовності при обриві фази ліній Л5 та Л6 від місця пошкодження у трьох вищезазначених режимах роботи ГЕС. Також, як для ліній у режимі 50% генерації потужності ГЕС розглянутий режим коли напруга від ГЕС подається тільки на першу систему шин ПС3, а з ПС3 подається напруга на шини підстанції то для ЛЕП Л6 цей режим не відрізняється від режиму при 0% генерації потужності ГЕС. У табл. 8, 9 приведені результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А ліній Л5 і Л6, відповідно, та порівняно з струмами спрацьову-

вання четвертого ступеню СЗНП, а на рис. 7, 8 залежності струмів нульової послідовності ліній Л5 та Л6 при обриві фази А від місця пошкодження, що протікають з боку підстанції ПС1 та з боку підстанції ПС4.

Як видно з табл. 8 та рис. 7 для захисту лінії Л5 боку ПС1 та ПС4 при максимальній генерації потужності ГЕС струм нульової послідовності достатній для спрацювання четвертого ступеню СЗНП, а при мінімальній – він значно менше уставки спрацювання і захист як з боку підстанції ПС1 так і з боку підстанції ПС4 не буде спрацювати. Таким чином при максимальній генерації потужності ГЕС і обриві фази А ліній Л5 та Л6 можливе спрацювання захисту. Відповідно при генерації ГЕС менше 50% потужності з боку ПС3, а також у всіх випадках живлення тільки з боку ПС1, обрив може бути визначений

тільки за допомогою вимірювальних приладів, або за іншими непрямими показниками і усунутий оперативним персоналом.

З урахуванням того, що при режимі максимальної генерації потужності ГЕС струми найбільші, то при менших струмах попереднього режиму, а, отже, і менших струмах обриву фази пуск ланцюгів відключення не відбудеться, тобто захист не спрацює.

Для аналізу роботи резервного захисту ліній – чотирьохступеневого СЗНП, проведений розрахунок складових струму нульової послідовності. У табл. 4 – 9 порівнюється струм нульової послідовності ліній при обриві фази А зі струмом спрацювання ступенів СЗНП. Також критерієм спрацювання захисту, якщо він спрямований, є коефіцієнт чутливості реле на пряму потужності.

Таблиця 7 – Результати розрахунку струмів зворотної послідовності обриву фази А ліній Л5, Л6

Вид пошкодження	Пуск передавача по $I_2$ , кА		Пуск ланцюгів відключення по $I_2$ , кА		Л5		Л6	
	Л-405	Л-406	Л-405	Л-406	$I_2$ з боку ПС1	$I_2$ з боку ПС2	$I_2$ з боку ПС1	$I_2$ з боку ПС2
Обрив у шин ПС1	0,12	0,12	0,36	0,3	-0,196	0,192	-0,18	-0,167
Обрив у шин ПС4					0,191	-0,194	-0,184	-0,197

Таблиця 8 – Результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А ліній Л5

№ п/п	Місце пошкодження	Режим роботи ГЕС, %	З боку підстанції ПС1				З боку підстанції ПС4			
			$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$	$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$
1	на шинах ПС1	0%	-174	111	180	<1	151	-500	288	<1
		50%, 100%	-392	249	180	2,2	339	-1123	288	1,2
2	на шинах ПС4	0%	83	-42	180	<1	-109	391	288	<1
		50%, 100%	-429	215	180	2,4	562	-2013	288	1,9

Таблиця 9 – Результати розрахунку струмів та напруг нульової послідовності при обриві фази А ліній Л6

№ п/п	Місце пошкодження	Режим роботи ГЕС, %	З боку підстанції ПС1				З боку підстанції ПС4			
			$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$	$3I_0$ , А	$3U_0$ , В	Струм спрац. 4 ступ. СЗНП, А	$K_{\text{ч}}$
1	на шинах ПС1	0%, 50%	202	-122	180	1.1	174	-655	288	<1
		100%	410	248	180	2.3	353	-1331	288	1,2
2	на шинах ПС4	0%, 50%	123	-58	180	<1	162	672	288	<1
		100%	388	181	180	2.2	509	-2117	288	1,8

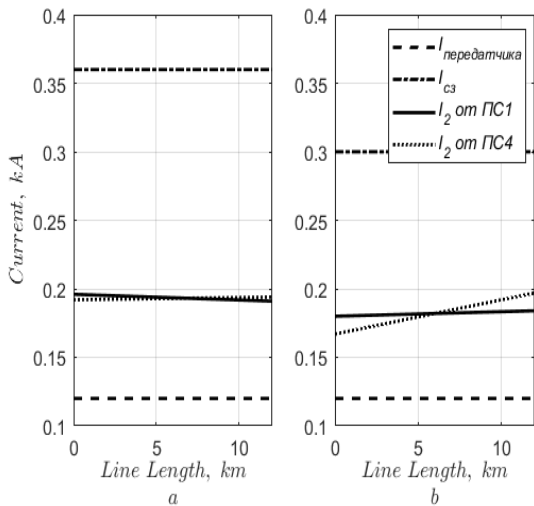


Рисунок 6 – Залежність струмів зворотної послідовності ліній Л5 (а) та Л6 (б) при обриві фази А від місця пошкодження

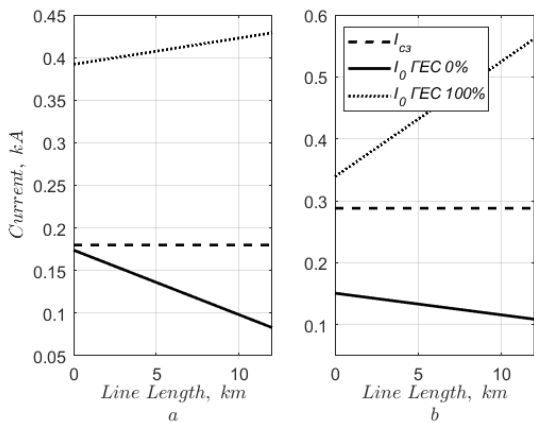


Рисунок 7 – Залежність струмів нульової послідовності лінії Л5 при обриві фази А від місця пошкодження, що протікають з боку підстанції ПС1 (а) та з боку підстанції ПС4 (б)

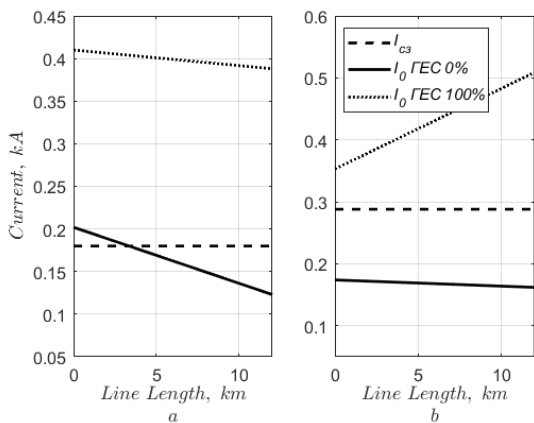


Рисунок 8 – Залежність струмів нульової послідовності лінії Л6 при обриві фази А від місця пошкодження, що протікають з боку підстанції ПС1 (а) та з боку підстанції ПС4 (б)

При обриві фази А струм нульової послідовності приблизно дорівнює  $3I_0 = I_{нагр}$ . З урахуванням то-

го, що струм у фази А знижується до нуля, струм  $3I_0$  близький до геометричної суми струмів фази В і фази С і рівний за модулем струму фази А  $3I_0 \approx I_A$ . Якщо в мережах є трансформатори із заземленими нейтраліми, то при обриві фази А струм цієї фази може частково протікати по обхідному шляху. В результаті чого струм  $3I_0$  менше струму  $I_A$  по модулю на величину струму фази А, що протікає по обхідному шляху-  $I_{3A}$ .

$$|3I_0| = |I_A| - |I_{3A}|, \quad (10)$$

де  $I_{3A}$  - величина струму фази А, що протікає по обхідному шляху.

Для ліній Л1, Л2 уставка спрацювання четвертого ступеню захисту нульової послідовності з боку підстанції ПС1 дорівнює 780 А. З табл. 4 та 5 видно, що при обриві фази А струми, що виникають в лініях Л1, Л2 значно менше 780 А. Звідси випливає, що захист з боку підстанції ПС1 не спрацює. Уставка спрацювання четвертого ступеню СНЗП з боку підстанції ПС2 дорівнює 240 А, а струми, що виникають в лініях Л1, Л2 значно менше. Звідси випливає, що захист з боку підстанції ПС2 також не спрацює. В даному випадку визначення виникнення неповнофазного режиму покладається на вимірювальні прилади, тобто визначається амперметрами, встановленими в фазах, або за непрямыми показниками, таким як збільшення напруги нульової послідовності, а його ліквідація – на роботу оперативного персоналу.

Для захисту лінії Л3 боку ПС1 мінімальний струм спрацювання четвертого ступеню СЗНП дорівнює 800 А, а струми, що протікають з цього боку лінії, менше уставки спрацювання (табл. 6) Таким чином захист з боку підстанції ПС1 не спрацює. При живленні лінії тільки від підстанції ПС1, струми в лінії значно менше уставки спрацювання четвертого ступеню захисту, що дорівнює 432 А. У випадку коли обриву фази А передував режим генерації 50% потужності ГЕС і вище струм збігається з дією реле напругу потужності, коефіцієнт чутливості по струму, а також коефіцієнт чутливості реле напругу потужності більше мінімально допустимого. Таким чином при 50% і вище генерації потужності ГЕС і обриві фази А лінії Л3 можливе спрацювання четвертого ступеня захисту. При живленні від ГЕС менше 50% з боку ПС3, а також у всіх випадках з боку ПС1, обрив може бути визначений тільки за вимірювальними приладами у фазах, або за непрямыми показниками і усунутий оперативним персоналом.

В табл. 7 спостерігається схожа поведінка релейного захисту на лінії Л4. З боку підстанції ПС1 струми менше уставки спрацювання четвертого ступеню захисту. Отже, захист працювати не буде. А з боку підстанції ПС3 захист працювати буде, якщо обриву передував режим повної генерації потужності ГЕС.

Уставка спрацювання четвертого ступеню захисту ліній Л5, Л6 з боку ПС1 дорівнює 180 А. З табл. 8 і 9 видно, що коефіцієнт чутливості по струму і ко-



ефіцієнт чутливості реле напряму потужності достатній для спрацювання захисту, якщо обриву передував режим 50% генерації потужності ГЕС і вище для лінії Л5 і 100% генерації потужності ГЕС для лінії Л6. Напрямок потужності в лініях Л5, Л6 збігається за напрямком з налаштуванням реле напряму потужності. Тобто захист спрацює. Уставка спрацювання захисту з боку підстанції ПС4 для цих ліній дорівнює 288 А. Захист з боку підстанції ПС4 працюватиме за аналогічної умови.

**ВИСНОВКИ.** Проведені дослідження неповнофазних режимів роботи ЛЕП 150 кВ з двостороннім живленням з ефективно заземленою нейтраллю, що виникають при поривах проводів ЛЕП без коротких замикань (КЗ), неповнофазних комутаціях, порушеннях контактів.

Проведений аналіз роботи основного та резервного захисту при неповнофазних режимах роботи ЛЕП 150 кВ розподільчих мереж.

Виявлено, що струми зворотної та нульової послідовності, на які реагують пускові органи основного диференційно-фазного захисту та які залежать в значній мірі від робочого режиму ЛЕП до пошкодження, як правило, недостатні для пуску ланцюгів відключення та не завжди достатні для пуску ланцюгів передавача.

Виявлено, що в багатьох випадках для спрацювання четвертого ступеню струмового захисту нульової послідовності (резервного захисту) струм також недостатній.

З урахуванням того, що в розподільчих мережах однофазних робочих режимів практично не буває, а струми у ЛЕП відносно близькі до симетричних за допомогою мікропроцесорної техніки необхідно фіксувати струми робочого режиму та забезпечувати сигналізацію при різкому зниженні струму в одній із фаз.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. Україна. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Форт, 2017. 760 с.

2. S. Mohajeryami, M. Doostan and Z. Salami, An analysis of open-phase fault in power generation station. *2016 North American Power Symposium (NAPS)*. Denver, CO. 2016. P 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2016.7748004.

3. P. Makhlin, A. Shram and O. Kuzmenko, Open-Phase Operating Modes in High Voltage Distribution Networks. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019. P. 112–115. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764219

4. І. М. Луценко, Є. В. Кошеленко, П. С. Циган. Впровадження комбінованих систем релейного захисту в розподільчих електричних мережах 6-10 кВ. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Вип. 5(112). С. 39–45.

5. Hannien S. Single phase earth faults in high impedance ground networks characteristics, indication and location. Technical Research Center of Finland (VTT), Espoo, Finland; 2001. 139 с.

6. Нагай И. В. О совершенствовании защит от неполнофазных режимов электрических сетей. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. № 1. С. 63–66.

7. C. Li, R. Reinmuller. Open Phase Detection in DER Operation by Using Power Quality Data Analytics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2971151.

8. Ведерников А. С., Гольдштейн В. Г., Халилов Ф. Х. Повышение надежности и энергоэффективности двухцепных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат. 2010. 272 с.

9. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник для ВНЗ / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, Л. І. Несен. ДВНЗ "Нац. гірн. ун-т". - 5-те вид., доопрац. та допов. - електрон. текст. дан. - Дніпро: НГУ, 2016. 600 с.

10. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с.

#### IMPROPER OPERATING MODES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

**P. Makhlin, A. Shram**

Zaporizhzhia Polytechnic National University  
vul. Zhukovsky 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine. E-mail: alexshrum@yahoo.com

**O. Kuzmenko**

Ukrenergo State Enterprise NPC, Dniprovsk Power System  
vul. Hrebelska 2, Zaporizhzhia, 69096, Ukraine

**Purpose.** The analysis of processes occurring in open-phase modes, determining dependencies of currents from various factors, and the reaction of relay protection is considered in the article. **Methodology.** Voltages and currents of open-phase operating modes are calculated using equation of an asymmetric mode of one phase breakage in a three-phase circuit. To assess the operation of the backup protection, the dependences of the currents of the zero and negative sequences at the break of the phase of the lines on the place of damage are plotted in different operating modes. **Results.** It has been found that currents of the negative and zero sequence are largely depended on the operating mode of the transmission lines before the damage and triggered by the basic differential-phase protection fault detectors. These currents are usually insufficient to start-up the trip circuits and are not always sufficient to start-up the transmitter chains. **Originality.** The analysis of operation of the main and reserve protection at open-phases operation modes of 150 kV transmission lines in distribution networks is carried out. It has been shown that at low load currents of the previous mode currents may not be sufficient for the operation of the relay protection. Thus, the open-phase operation mode of the feeder should be determined on the basis of indications of ammeters in the phases of the line or indirect indicators and should be eliminated by operational staff. **Practical value.** There are practically no single-phase operat-

ing modes in distribution networks and currents in transmission lines are relatively close to symmetric. Thus, using the adaptive algorithms of microprocessor Smart Grid systems allows increasing the sensitivity of relay protection in open-phase modes, reducing the number of excessive power cuts, and also shortening the duration of interruption of power supply (SAIDI, SAIFI, CAIDI) and emergency failure of electricity to consumers. References 10, tables 9, figures 8.

**Keywords:** improper mode, relay protection, short circuit, asymmetric mode, transmission line, phase break.

#### REFERENCES

1. Electrical Installation Regulations. - Edition is official. Ministry of Energy and Coal of Ukraine. (2017), Kharkiv: Fort, 760 p.
2. Mohajeryami, S., Doostan M., Salami, Z. (2016), "An analysis of open-phase fault in power generation station", *North American Power Symposium (NAPS.)*. Denver, CO, pp. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2016.7748004.
3. Makhlin, P., Shram, A., Kuzmenko, O. (2019), "Open-Phase Operating Modes in High Voltage Distribution Networks", *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, pp. 112-115. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764219
4. Lutsenko, I., Koshelenko, E., Tsyhan, P. (2018), "Introduction of combined relay protection systems in distribution electric networks 6-10 kV", *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho* [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University], no 5(112), pp. 39 – 45.
5. Hannien, S. (2001), Single phase earth faults in high impedance ground networks. Characteristics, indication and location. Technical Research Center of Finland (VTT), Espoo, Finland, 139 p.
6. Vedernikov, A. S., Gol'dshtejn, V. G., Halilov, F. H. (2010), Improving the reliability and energy efficiency of double-circuit power transmission lines, Moscow: Energoatomizdat, 272 p.
7. Nagaj, I. V. (2011), "On improving protection against open-phase modes of electrical networks", *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromehaniika*. [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics.], no. 1, pp. 63-66.
8. Li C., Reinmuller R. (2020), "Open Phase Detection in DER Operation by Using Power Quality Data Analytics", *IEEE Transactions on Power Delivery*, DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2971151.
9. Pivnjak, G. G., Zhezhelenko, I. V., Papai'ka, Ju. A., Nesen, L. I. (2016), Transients in power supply systems: a textbook for universities, Dnipro: NGU, 600 p.
10. Krjuchkov, I. P., Starshinov, V. A., Gusev, Ju. P., Piratorov, M. V. (2008), Transients in electric power systems, M.:Publishing house MEI, 416 p.

Стаття надійшла 01.07.2020.