

УДК 621.311.161

**ІНФОРМАЦІЙНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОФІДЕРНОГО АНАЛІЗУ
Й ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ
З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМ ГЕНЕРУВАННЯМ****В.В. Кулик¹, О.Б. Бурикін², О.В. Глоба³**

1, 2 – Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна
e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

3 – Публічне акціонерне товариство «Вінницяобленерго»,
вул. Магістратська, 2, Вінниця, 21000, Україна
e-mail: kanc@voe.com.ua

Розглянуто шляхи та засоби вирішення задачі пофідерного аналізу втрат електроенергії у розподільних електричних мережах (РЕМ) з використанням наявного інформаційного забезпечення. Показано, що недосконалість систем комерційного й технічного обліку електроенергії, зміни схем транспортування електроенергії, а також вплив розосереджених джерел електроенергії (РДЕ) істотно ускладнюють розв'язання задачі. Запропоновано новий підхід та програмну реалізацію пофідерного аналізу втрат електроенергії для визначення напрямків підвищення енергоефективності РЕМ, який полягає у паралельних розрахунках та зіставленні результатів пофідерного балансу електроенергії та поелементного визначення втрат на підставі єдиного інформаційного забезпечення. Бібл. 3, рисунок, таблиця.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, розосереджене генерування, втрати електроенергії, пофідерний аналіз, оптимізація, інформаційне забезпечення.

Вступ. На сьогодні технологічні витрати електроенергії (ТВЕ) стали одним з показників рентабельності енергопостачальних компаній України. Технологічні витрати опосередковано характеризують якість менеджменту та керування інвестиціями і, зрештою, прибуток компанії. Отже, їх зменшення є однією з пріоритетних задач. Особливо це стосується розподільних електричних мереж (РЕМ) 10(6)...0,4 кВ, де зосереджено до 80 % комерційних та технічних втрат електроенергії й разом з тим практично відсутні повноцінні автоматизовані системи обліку електроенергії. Виходячи з цього, ТВЕ визначаються як різниця між надходженням електроенергії на шини 10(6) кВ живильних трансформаторних підстанцій (ТП) 110(35)/10(6) кВ та консолідованим корисним відпуском електроенергії, який фіксується абонентськими приладами обліку. Точність такого визначення ТВЕ виявляється обмеженою через недосконалість засобів обліку, випадки необлікованого відпуску електроенергії, неодноразовість реєстрації показів лічильників надходження й корисного відпуску та інші фактори. Крім того, з загальних балансових витрат електроенергії складно виокремити комерційні та технічні втрати. Тому змушене планування заходів з підвищення енергоефективності РЕМ на підставі таких результатів часто призводить до хибних рішень.

Протягом останніх десяти років перед відповідними підрозділами обласних енергопостачальних компаній України поставлено задачі підвищення точності оцінювання технологічних витрат електроенергії, а також забезпечення автоматизованого складання пофідерного балансу електроенергії, зокрема для пофідерного аналізу втрат. Враховуючи відносну простоту таких задач у класичній (детермінованій) постановці, практично у кожній енергокомпанії власними силами або з залученням сторонніх розробників було запропоновано алгоритмічно-програмне рішення. Однак практична експлуатація таких програмних засобів виявила низку проблем з інформаційним забезпеченням, які, знижуючи вірогідність результатів аналізу, дають змогу використовувати їх лише для формування звітів. Отже, основна задача пофідерного аналізу втрат електроенергії – отримання об'єктивних даних для пошуку осередків надлишкових втрат та розроблення заходів щодо їх зменшення не була остаточно вирішена.

Виходячи з цього, **метою роботи** є розроблення підходу для підвищення адекватності та інформативності пофідерного аналізу втрат електроенергії у розподільних електричних мережах шляхом натурно-імітаційного моделювання з використанням єдиної інформаційної

бази. Такий підхід дає змогу доповнювати результати балансування реальних вимірювань електроенергії псевдовимірюваннями та результатами поелементного визначення технічних втрат.

Постановка задачі. На разі можна вважати практично вирішеною лише проблему комерційного обліку електроенергії. Задача пофідерного аналізу втрат електроенергії у різних енергопостачальних компаніях вирішена частково. Стан проблеми в окремій енергопостачальній компанії прямо залежить від рівня експлуатації розподільних мереж, оснащення їх телеінформаційними засобами, а також запровадження інформаційних технологій для оброблення та аналізу даних.

Задача оперативного аналізу режимів РЕМ, особливо до 1 кВ, досі є практично невирішеною. І причини тут не у технічній неможливості, а у відсутності економічного обґрунтування. Це пов'язано зі значною розмірністю даних мереж (сотні тисяч вузлів та віток у межах одного району), відсутністю встановлених засобів збору інформації про режимні параметри тощо. Та головна причина полягає у об'єктивній відсутності практичних задач з прямим комерційним ефектом, які б потребували результатів оперативного аналізу режимів РЕМ.

Однак досвід вирішення проблеми оцінювання та аналізу втрат електроенергії в розподільних електромережах дає змогу констатувати неможливість розв'язання задачі формування пофідерного балансу електроенергії (яка має очевидний комерційний ефект) без залучення засобів оперативного аналізу або імітації режимів РЕМ. Оскільки прямий контроль необхідних параметрів електромереж є неможливим, то для розв'язання задачі слід застосувати комп'ютерне моделювання за результатами натурних експериментів. На початкових етапах запровадження оперативного аналізу режимів електромереж можна обмежитися періодичними розрахунками з імітацією динаміки роботи розподільних мереж на підставі відповідних вихідних даних, які зібрано протягом звітного періоду. Саме такий варіант пропонується у цій статті.

Проведення паралельних електротехнічних розрахунків сприяє підвищенню адекватності пофідерного аналізу втрат [3]. Ефект досягається таким шляхом:

- зменшення похибки вихідної інформації, що пов'язана з неодноразовістю реєстрації показів лічильників надходження та відпуску електроенергії протягом звітного періоду;
- часткової компенсації дефіциту вихідної інформації, особливо в умовах періодичних змін схем транспортування електроенергії в РЕМ, а також функціонування розосереджених джерел енергії (ВДЕ);
- розрахунку та виділення з балансу окремих складових ТВЕ, які принципово не можуть бути визначені в інший спосіб з використанням наявного інформаційного забезпечення (наприклад, втрати в електромережах 0,4 кВ за відсутності інформації про надходження електроенергії);
- встановлення в якості мінімально можливих значень ТВЕ технічних втрат електроенергії, розрахованих поелементно та консолідованих для заданих фрагментів РЕМ.

Крім того, зіставлення втрат, отриманих з пофідерного балансу електроенергії, та технічних втрат, що розраховані поелементно, дає можливість оцінити потенціал заходів з удосконалення обліку електроенергії та інформаційної інфраструктури РЕМ. Так, значна розбіжність (більше 50 %) між ними протягом низки суміжних звітних періодів свідчить про неадекватність оцінювання пофідерного балансу електроенергії й необхідність заходів щодо вдосконалення обліку, зокрема, інвестування в інформаційне забезпечення. Відсутність розбіжності дає можливість обґрунтовано вивільнити кошти інвестиційних програм для підсилення інших напрямків діяльності енергокомпанії.

Таким чином, для забезпечення адекватного пофідерного аналізу втрат доцільно поєднувати складання пофідерного балансу електроенергії з поелементними розрахунками технічних втрат на базі єдиного інформаційного забезпечення.

Формування вихідної інформації для пофідерного аналізу втрат електроенергії. Розвиток інформаційного забезпечення дає змогу не лише підвищувати якість взаєморозрахунків за спожиту електроенергію, але і розв'язувати низку технічних задач, серед яких ана-

ліз окремих складових ТВЕ та планування заходів щодо їх зменшення.

Відповідно до [1] нормативні ТВЕ визначаються за виразом

$$\Delta W_{\text{ТВЕ}} = \Delta W_{\text{ТР}} + \Delta W_{\text{НВП}} + \Delta W_{\text{ПЛО}}, \quad (1)$$

де $\Delta W_{\text{ТР}}$ – технічні розрахункові втрати електроенергії в елементах ЕМ; $\Delta W_{\text{НВП}}$ – нормативні витрати електроенергії на власні потреби підстанцій та розподільних пунктів; $\Delta W_{\text{ПЛО}}$ – розрахункові витрати електроенергії на плавлення ожеледі.

У свою чергу технічні втрати $\Delta W_{\text{ТР}}$ визначаються так:

$$\Delta W_{\text{ТР}} = \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{Лзи}} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{ТРзи}} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{ТРпи}} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{Ии}}, \quad (2)$$

де $\Delta W_{\text{Лзи}}$ – сумарні змінні (навантажувальні) розрахункові втрати електроенергії в ЛЕП i -го ступеня напруги; $\Delta W_{\text{ТРзи}}$ – сумарні змінні розрахункові втрати електроенергії в трансформаторах i -го ступеня напруги; $\Delta W_{\text{ТРпи}}$ – сумарні умовно-постійні розрахункові втрати електроенергії в трансформаторах i -го ступеня напруги; $\Delta W_{\text{Ии}}$ – сумарні умовно-постійні розрахункові втрати електроенергії в інших елементах i -го ступеня напруги; k – кількість ступенів напруги мережі.

Структура балансових ТВЕ $\Delta W_{\text{БТВЕ}}$ відрізняється від нормативних наявністю понаднормативної складової $\Delta W_{\text{ПН}}$, що спричинена несвоечасною сплатою за електроенергію, недообліком та несанкціонованими відборами тощо. Протягом останніх років завдяки зусиллям енергозбутових підрозділів енергопостачальних компаній понаднормативні втрати електроенергії $\Delta W_{\text{ПН}}$ були істотно зменшені, тобто $\Delta W_{\text{БТВЕ}} \approx \Delta W_{\text{ТВЕ}}$. Таким чином, набула актуальності задача зменшення технічних втрат як основної складової балансових ТВЕ.

Для електромереж i -го ступеня напруги технічні втрати $\Delta W_{\text{ТРi}}$ можна визначити по елементно, використовуючи відповідний математичний апарат та результати розрахунку режиму середніх навантажень [2]:

$$\Delta W_{\text{ТРi}} = \Delta W_{\text{Лзи}} + \Delta W_{\text{ТРзи}} + \Delta W_{\text{ТРпи}} + \Delta W_{\text{Ии}}, \quad (3)$$

а балансові $\Delta W_{\text{БВи}}$ – складаючі баланс електроенергії з зафіксованими надходженням $W_{\text{НАДХi}}$ та корисним відпуском $W_{\text{ВІДПi}}$ протягом звітної періоду:

$$\Delta W_{\text{БВи}} = W_{\text{НАДХi}} - W_{\text{ВІДПi}}; \quad (4)$$

$$W_{\text{НАДХ}} = W_{\text{ПС}} + W_{\text{СУМ+}} - W_{\text{СУМ-}} + W_{\text{ВДЕ}} + W_{\text{СП+}} - W_{\text{СП-}}; \quad W_{\text{ВІДП}} = W_{\text{ЮР}} + W_{\text{ПОБ}} + W_{\text{ВП}},$$

де $W_{\text{ПС}}$ – зафіксоване надходження по введенню ТП з мереж 110(35) кВ; $W_{\text{СУМ+}}, W_{\text{СУМ-}}$ – зафіксоване надходження від електромереж суміжних експлуатуючих організацій або до них відповідно (тут враховують також перетікання електроенергії між суміжними фідерами електромереж енергокомпанії під час їх роботи за тимчасовими схемами); $W_{\text{ВДЕ}}$ – зафіксоване надходження від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ); $W_{\text{СП+}}, W_{\text{СП-}}$ – зафіксоване надходження електроенергії з електромереж споживачів та зафіксований безвтратний відпуск до таких мереж; $W_{\text{ЮР}}, W_{\text{ПОБ}}$ – корисний відпуск юридичним та побутовим споживачам ТП-10(6) кВ або окремої ЛЕП 0,4 кВ; $W_{\text{ВП}}$ – відпуск на виробничі потреби.

Оскільки у такий спосіб визначаються величини $\Delta W_{\text{ТРi}}$ та $\Delta W_{\text{БВи}}$, що мають однаковий фізичний зміст, то за умов відповідного інформаційного забезпечення технічні втрати мають відповідати балансовим, а зменшення відхилення між ними можна використовувати як ознаку підвищення якості вихідної інформації та методичного забезпечення задачі зменшення втрат електроенергії. Виходячи з цього, задачу оптимізації втрат електроенергії в електромережах у проектній постановці доцільно подавати як багатокритеріальну:

$$\begin{cases} \Delta W_{\text{ТРi}} \rightarrow \min; \\ dW_{*i} = \frac{|\Delta W_{\text{ТРi}} - \Delta W_{\text{БВи}}|}{W_{\text{НАДХi}}} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

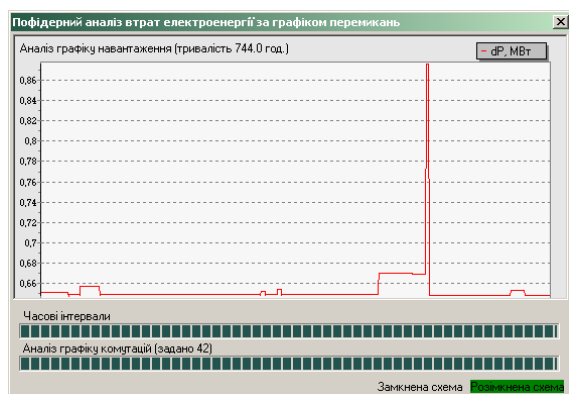
Зв'язок між критеріями оптимальності зумовлений використанням спільного інформаційного забезпечення.

Виходячи з формул (3), (4) для пофідерного розрахунку втрат електроенергії в РЕМ необхідно використовувати різноманітні джерела інформації. Вихідні дані доцільно поділити на умовно-постійні (з тривалим циклом оновлення, наприклад, один раз на рік) та змінні, що оновлюються у межах звітної періоду (таблиця).

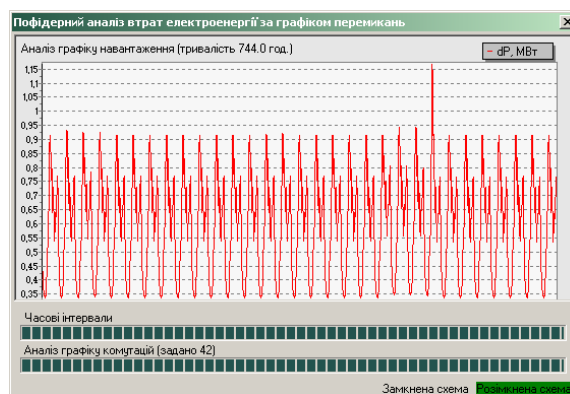
Особливості реалізації пофідерного аналізу втрат електроенергії. Слабким місцем сучасних РЕМ є недостатня кількість засобів обліку внутрішніх перетікань електроенергії, тобто перетікань між виділеними за нормальною схемою фрагментами електромереж (фідерами) одного класу напруги або між суміжними за напругою мережами. Разом з тим такі перетікання постійно виникають внаслідок ліквідації аварійних ситуацій, резервування споживачів вищих категорій надійності тощо. Тривалість таких режимів переважно мала – до кількох діб, однак значні потужності післяаварійних режимів не дають змоги ігнорувати зазначені перетікання енергії під час складання балансу. Тому їх намагаються замінювати псевдовимірами $W'_{\text{СУМ+}}$, $W'_{\text{СУМ-}}$, які переважно визначаються вручну без проведення належних імітаційних розрахунків. Такі похибки оцінювання балансу електроенергії мають випадковий характер, тому не можуть бути усунені простим коригуванням.

Умовно-постійні параметри	Змінні параметри
Нормальна схема електромереж 10(6) кВ	Дані комерційного обліку електроенергії у розрізі окремих ЛЕП 0,4 кВ або ТП 10/0,4 кВ з виділенням абонентських $W_{\text{ЮР}}$, $W_{\text{ПОБ}}$, $W_{\text{ВП}}$
Параметри приєднаних електромереж 0,4 кВ для визначення їх еквівалентних опорів та технічних втрат електроенергії в них	Дані технічного обліку надходження електроенергії до електромереж 10...0,4 кВ через введення 10 кВ підстанцій та іншими шляхами (сумарні показники) $W_{\text{ПС}}$, $W_{\text{СУМ+}}$, $W_{\text{СУМ-}}$, $W_{\text{ВДЕ}}$, $W_{\text{СП+}}$, $W_{\text{СП-}}$
Розміщення та прив'язка засобів комерційного або технічного обліку електроенергії в РЕМ	Дані комерційного та технічного обліку електроенергії в середині електромереж – зафіксовані обсяги електроенергії на вводах ТП 10/0,4 кВ, а також перетікання через лінії зв'язку та комутаційні апарати (деталізовані $W_{\text{СУМ+}}$, $W_{\text{СУМ-}}$, $W_{\text{ВДЕ}}$)
Розміщення та ідентифікатори комутаційних апаратів на вводах 10(6) кВ підстанцій та у фідерах 10(6) кВ, якими можуть виконуватися перемикання протягом звітної періоду	Дані щодо перемикань комутаційних апаратів, які були виконані у електромережах протягом звітної періоду (дата, час, ідентифікатор комутаційного апарата)

Для визначення внутрішніх перетікань електроенергії за відсутності вимірів пропонується використовувати результати імітаційних розрахунків за даними комерційного й технічного обліку електроенергії з урахуванням динаміки зміни схеми електромереж протягом звітної періоду. За значеннями сумарного відпуску (надходження) електроенергії, а також тривалості приєднання до електромережі визначаються середні потужності для кожної ТП 10(6)/0,4 кВ. Далі для кожного півгодинного інтервалу звітної періоду розраховується режим середніх навантажень РЕМ з урахуванням поточного положення комутаційних апаратів, визначаються усереднені перетікання електроенергії $W'_{\text{СУМ+}}$, $W'_{\text{СУМ-}}$ та технічні розрахункові втрати $\Delta W'_{\text{ТР}}$ (рисунок а). Сумарні значення параметрів дають змогу розв'язати дві задачі: частково компенсувати відсутність засобів вимірювання внутрішніх перетікань електроенергії, а також забезпечити наближене визначення технічних втрат електроенергії методом чисельного інтегрування [3].



а



б

Зменшення похибки визначення внутрішніх перетікань та втрат електроенергії досягається шляхом врахування типових графіків електроспоживання та генерування ВДЕ. Півгодинні графіки навантаження (генерування) для кожної ТП 10(6)/0,4 кВ розраховуються за значеннями сумарного відпуску (надходження) електроенергії, тривалості приєднання до електромережі, а також типу електроспоживання. Далі для кожного півгодинного інтервалу звітного періоду розраховується усталений режим РЕМ з урахуванням імітованого навантаження та генерування ВДЕ, а також відповідного положення комутаційних апаратів. Визначаються півгодинні перетікання електроенергії $W_{\text{СУМ}+}(t)$, $W_{\text{СУМ}-}(t)$ та технічні розрахункові втрати $\Delta W_{\text{ТР}}(t)$ (рисунок б).

Перехід від середніх потужностей до імітації графіків навантажень підвищує точність оцінювання балансу електроенергії, зменшуючи відхилення між балансовими $\Delta W_{\text{ББ}}$ та технічними розрахунковими $\Delta W_{\text{ТР}}$ втратами. Для наведеного прикладу Ямпільських електромереж 10...0,4 кВ розрахункові балансові втрати завдяки уточненню внутрішніх перетікань в РЕМ зменшилися на 3 % (з 1,12 до 1,07 млн. кВт·год за місяць), а розрахункові технічні зросли на 6 % (з 0,71 до 0,75 млн. кВт·год за місяць). Таким чином, відносне відхилення втрат dW (5) зменшилося з 2,1 до 1,6 %, що свідчить про підвищення якості інформаційного забезпечення завдяки залученню додаткових даних щодо характеру електроспоживання для окремих ТП 10(6)/0,4 кВ та графіків видачі електроенергії для ВДЕ.

Висновки. Запропонований комплексний підхід щодо повірного аналізу втрат електроенергії у розподільних мережах 10(6)...0,4 кВ може використовуватися для розв'язання задач планування технічних та організаційних заходів щодо їх зменшення на рівні енергопостачальних компаній. Для уточнення й приведення у відповідність до реальних умов експлуатації РЕМ розрахункової моделі електричної мережі можливо і доцільно використовувати додаткові дані стосовно динаміки електричної мережі (зміна топології, положення комутаційних апаратів тощо), графіків електроспоживання, а також вироблення електроенергії засобами розосередженого генерування.

1. *Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електричної енергії та вибору заходів щодо їх зниження:* СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-96:2014. – Київ: Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго», 2014. – 84 с.
2. *Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В.* Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2008. – 280 с.
3. *Кулик В.В., Бурикин О.Б., Лесько В.О., Кравцов К.І.* Автоматизована інформаційно-розрахункова система аналізу режимів розподільних електричних мереж // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. Спец. вип. – 2012. – С. 121–130.

УДК 621.311.161

В.В. Кулик¹, О.Б. Бурыкин², О.В. Глоба³

1, 2 – Винницький національний технічний університет,
Хмельницькое шоссе, 95, Винница, 21021, Україна

3 – Публичное акционерное общество «Винницаоблэнерго»,
ул. Магистратская, 2, Винница, 21000, Україна

Информационно-програмное обеспечение пофидерного анализа и оптимизации потерь электроэнергии в распределительных сетях с распределенным генерированием

Рассмотрены пути решения задачи пофидерного анализа потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях (РЭС) с использованием имеющегося информационного обеспечения. Показано, что несовершенство систем коммерческого и технического учета электроэнергии, изменения схем передачи электроэнергии, а также влияние распределенных источников электроэнергии (РИЭ) существенно затрудняют решение задачи. Предложены новый подход и программная реализация пофидерного анализа потерь электроэнергии для определения направлений повышения энергоэффективности РЭС, который заключается в параллельных расчетах и сопоставлении результатов пофидерного баланса электроэнергии и поэлементного определения потерь на основе единого информационного обеспечения. Библи. 3, рисунок, таблица.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, распределенное генерирование, потери электроэнергии, пофидерный анализ, оптимизация, информационное обеспечение.

V.V. Kulyk¹, O.B. Burykin², O.V. Globa³

1, 2 – Vinnytsia National Technical University,

Khmelnitske shosse, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine

3 – Public Joint Stock Company "Vinnytsiaoblenergo",

Magistratska str., 2, Vinnytsia, 21000, Ukraine

Information software for the feeder-balance and optimization of electric power losses in distributive networks with local generation

The ways of solving the problem of the feeder-balance analysis of electric power losses in distribution electric networks (DEN) using the available information support are considered. Imperfection of the systems of commercial and technical metering of electric power, changes in the transmission patterns of electric power, as well as the effect of distributed electric power sources (DES) make it very difficult to solve the problem. A new approach and software implementation of the feeder analysis of electric power losses is proposed to determine the directions for increasing the energy efficiency of DEN. It consists in parallel calculations and comparison of the results of the feeder-balance electricity and the element-wise determination of losses on the basis of a single information support. References 3, figure, table.

Key words: distribution electric networks, distributed generation, power losses, feeder-balance analysis, optimization, information support.

Надійшла 07.09.2017

Received 07.09.2017

УДК 621.315.1

КЕРОВАНА КОМУТАЦІЯ ЕЛЕГАЗОВИМИ ВИМИКАЧАМИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В.В. Кучанський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Представлено результати дослідження причин аварій лінійних елегазових вимикачів при комутаціях компенсованих ліній електропередач 750 кВ. Сформульовано рекомендації по запобіганню аваріям через тривале невідімкнення полюсом елегазового вимикача струму, що не переходить через нуль внаслідок наявності в ньому великої аперіодичної складової. Виконано аналіз аномальних режимів ліній електропередачі надвисокої напруги з різним ступенем компенсації зарядної потужності. Досліджено електромагнітні процеси в компенсованих лініях електропередачі залежно від моментів комутації. Виявлено моменти різкої зміни параметрів перехідних процесів під час комутації в лініях надвисокої напруги. Розглянуто заходи обмеження тривалості існування аперіодичної складової струму. Біблі. 5, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: коротке замикання, трифазне автоматичне повторне ввімкнення, керована комутація, аперіодична складова струму.

Загальна характеристика проблеми. В магістральних електричних мережах відбулась заміна повітряних вимикачів на елегазові. Ця модернізація зумовлена тим, що сучасна електротехнічна промисловість не виготовляє повітряні вимикачі і в разі пошкодження здійснити ремонт і поновити електропостачання буде неможливо. В порівнянні з повітряними