

А. В. ГАДАЙ (канд. техн. наук, доц.), **І. О. БАНДУРА** (канд. техн. наук, доц.),
В. І. ВОЛИНЕЦЬ (канд. техн. наук, доц.), **Н. В. КОМЕНДА** (канд. техн. наук, доц.),
М. В. РОМАНЮК (канд. техн. наук, доц.)

Луцький національний технічний університет

haday@meta.ua

ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ СЕЛЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТІВ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ НАПРУГОЮ 0,4 кВ

Розглянуті питання забезпечення селективності пристроїв захисту в розподільчих мережах напругою 0,4 кВ споживачів. Проведений аналіз існуючих принципів координації автоматичних вимикачів. Показано, що повна селективність забезпечується в зоні струмів коротких замикань. Для перевірки селективності в усьому діапазоні струмів, необхідно будувати карти селективності і враховувати можливі переваження усіх елементів. Використання автоматичних вимикачів з енергетичною селективністю дозволяє реалізувати повну селективність до межі вимикаючої здатності електричних апаратів.

Ключові слова: селективність, пристрої релейного захисту, автоматичні вимикачі, електричні апарати, мережа 0,4 кВ.

Постановка проблеми. Вибір системи захисту електроустановки є вкрай важливим як для забезпечення економічної і функціональної роботи всієї установки, так і для мінімізації проблем, викликаних роботою установки у разі аварійних ситуацій.

Координація різних пристроїв захисту проводиться з метою:

- забезпечення безпеки людей та установки у будь-який момент часу;
- визначення та швидкого відключення тільки тієї зони, в якій виникла аварійна ситуація, а не всієї електроустановки або її великої частини;
- зменшення впливу наслідків пошкодження на інші складові частини установки (падіння напруги, втрата стабільності в електричних машинах);
- зменшення навантаження на компоненти та попередження пошкоджень у зоні несправності;
- забезпечення безперервності електропостачання;
- забезпечення належної якості електроенергії;
- забезпечення резервування у разі будь-якої несправності захисного пристрою, який відповідає за відключення схеми;
- забезпечення експлуатуючого персоналу та системи управління інформацією, необхідної для якнайшвидшого відновлення нормальної експлуатації з мінімальним втручанням у решту електроустановки та електромережі;
- досягнення оптимального компромісу між надійністю, простотою та економічною ефективністю.

Таким чином, правильно спроектована система захисту електроустановки повинна:

- розпізнавати, яка трапилася подія і де, розрізняючи ситуації особливі, але допустимі, та ситуації реальної відмови в межах даної зони впливу, уникаючи невиправданих відключень, що призводять до необґрунтованого відключення справної частини установки;
- максимально швидко спрацьовувати для обмеження пошкодження (руйнування, прискореного зносу механізму тощо), підтримуючи безперервність та стабільність подачі електроживлення.

Як видно, система захисту електроустановок повинна задовольняти дві протилежні вимоги: точна ідентифікація несправності та швидке вимкнення. Рішення про вибір пріоритетності однієї з вимог завжди має компромісний характер і залежить від вимог, що висувуються до конкретної електроустановки. Наприклад, коли важливіше уникнути небажаного відключення, перевага зазвичай надається системі непрямого захисту, заснованої на взаємних блокуваннях і передачі даних між різними пристроями, що вимірюють електричні параметри локально, тоді як для швидкого спрацьовування та обмеження руйнівного впливу короткого замикання необхідна система прямої дії з розчіплювачами, вбудованими у пристрої захисту. Загалом, у низьковольтних системах первинного та вторинного розподілу енергії перевага зазвичай надається останньому рішенню.

Метою статті є систематизація існуючих принципів забезпечення селективності автоматичних вимикачів в розподільчих мережах споживачів напругою 0,4 кВ.

Основний матеріал дослідження. Стандарт ДСТУ EN 60947-1:2017 [1] визначає поняття селективності.

Селективність у зоні надструмів – координація робочих характеристик двох і більше пристроїв захисту від надструмів так, щоб у разі виникнення надструмів в межах зазначеного діапазону спрацьовував тільки пристрій, призначений для роботи в цьому діапазоні, а інші не працювали». Надструм означає струм, який більший ніж номінальний струм, викликаний будь-якою причиною (перевантаження, коротке замикання тощо).

Отже, існує селективність між двома послідовно ввімкненими вимикачами щодо надструму, який протікає через обидва вимикачі, причому автоматичний вимикач зі сторони навантаження вимикається, забезпечуючи захист, а вимикач зі сторони живлення залишається ввімкненим, забезпечуючи електропостачання решта установки.

Стандарт ДСТУ EN 60947-2:2019 [2] дає визначення повної та часткової селективності. Повна селективність – це селективність у зоні надструмів коли у випадку послідовного вмикання двох пристроїв захисту від надструмів апарат зі сторони навантаження забезпечує захист без спрацювання другого захисного апарата. Часткова селективність – це селективність у зоні надструмів коли у випадку послідовного вмикання двох пристроїв захисту від надструмів апарат зі сторони навантаження забезпечує захист до певного рівня надструму без спрацювання другого захисного апарата.

Повна селективність забезпечується для будь-якого надструму, який можливий в електроустановці. Іншими словами, повна селективність забезпечується до меншого струму I_{cu} двох автоматичних вимикачів, оскільки максимальний струм короткого замикання в будь-якому випадку буде меншим або рівним найменшому струму I_{cu} .

Часткова селективність забезпечується лише для певного струму I_s (граничний струм селективності). Якщо струм перевищує цю величину, то селективність між двома автоматичними вимикачами не забезпечується. Іншими словами, часткова селективність між двома автоматичними вимикачами забезпечується до певної величини I_s , яка менша, ніж величина I_{cu} двох автоматичних вимикачів. Якщо максимальний струм короткого замикання не перевищує струм селективності I_s , то забезпечується повна селективність.

Для радіальної системи розподілу електроенергії (рис. 1) метою селективності електричних апаратів є відключення тільки пошкодженої ділянки кола із збереженням живлення максимально можливої кількості інших споживачів.

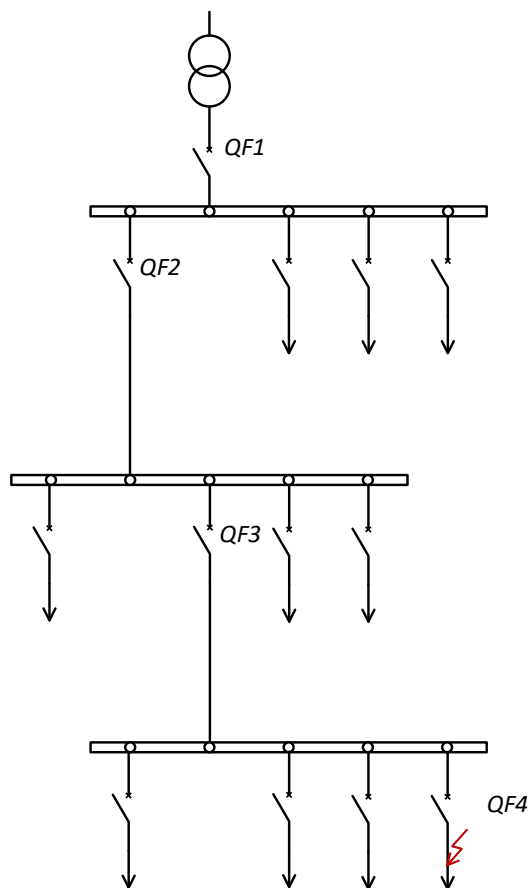


Рисунок 1 – Типова схема електропостачання

Якщо селективність відсутня, або погано організована, то одне коротке замикання може спровокувати спрацювання багатьох пристроїв захисту і привести до відключення всієї електроустановки або її значної частини. В результаті чого буде незадіяна значна частина установки і, як наслідок, економічні втрати для споживачів.

Аномальні струми, які зустрічаються в установках, можуть бути наступних типів:

- перевантаження неприпустимої тривалості;
- коротке замикання;

До особливих режимів відносяться:

- витоки струму в землю;
- перехідні процеси, провали або миттєве відключення (зникнення) напруги.

Для гарантії максимальної безперебійності електропостачання необхідно використовувати скоординовані між собою елементи захисту.

Кожному типу пошкодження в колі відповідає певний специфічний пристрій захисту (захист від перевантаження, витоку на землю, короткого замикання, зникнення напруги). Але одне пошкодження може викликати одночасне спрацювання декількох типів пристроїв захисту, наприклад:

- струм короткого, замикання створює зниження (провал) напруги і може викликати спрацювання розчіплювача мінімальної напруги:

- пошкодження ізоляції в ряді випадків при однофазному короткому замиканні може призводити до спрацювання диференційного захисту і спрацювання розчіплювача за струмом короткого замикання це залежить від режиму роботи нейтралі).

Для забезпечення селективності апаратів захисту для конкретного кола слід використовувати характеристики пристроїв захисту, наведених в каталогах виробників.

В процесі роботи, дослідження селективності обмежується розглядом випадків перевантаження по струму і короткому замиканні. В такому випадку селективність автоматичних вимикачів полягає в їх узгодженому спрацюванні у випадку настання аварійного режиму (рис. 2).

Апарати захисту в системі розподілу електроенергії є повністю селективними тоді і тільки тоді, коли при будь-якому аномальному струмі, з усіх автоматичних вимикачів, що зреагували на цю аномалію, спрацьовує тільки один, той який розташований безпосередньо перед точкою пошкодження, і залишається вимкненим скільки завгодно тривалий час [1].

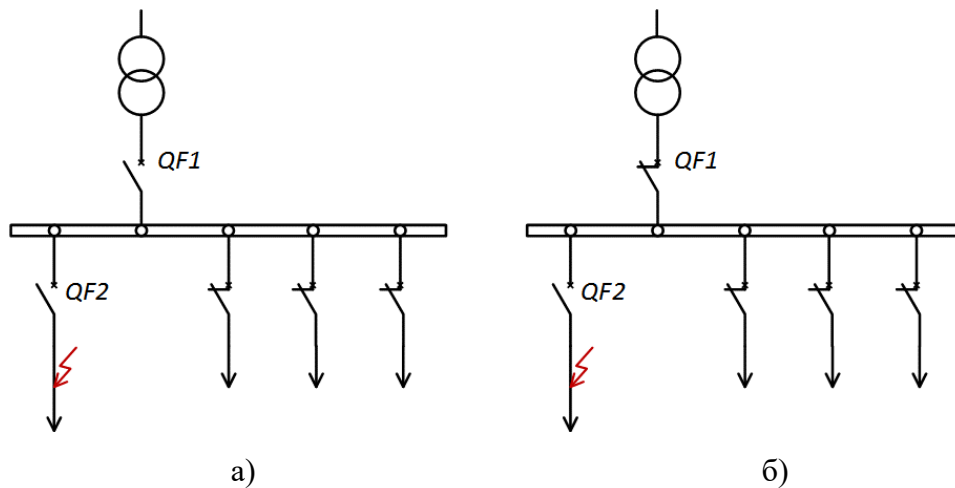


Рисунок 2 – Неселективна а) і селективна б) дія апаратів захисту при аварії на ділянці кола

При селективній дії у випадку виникнення короткого замикання повинен вимкнутись вимикач (QF2, рис. 2, б) розташований ближче до місця КЗ.

Якщо ж апарати захисту працюють неселективно, то у випадку появи короткого замикання вимкнуться два вимикачі (рис. 2, а), і тим самим припиниться живлення в не пошкодженій ділянці кола.

Існує два типи струмових пошкоджень в електроустановках: перевантаження і коротке замикання. У загальному випадку, надструм – це струм, величина якого перевищує найбільше номінальне значення.

Струм перевантаження – надструм в електрично не пошкодженому колі, величина якого не перевищує $(8-10)I_n$ автоматичного вимикача. За таких струмів зазвичай спрацьовує тепловий розчіплювачів та захист L електронних розчіплювачів.

Струм короткого замикання – надструм, обумовлений замиканням з мізерно малим повним опором між точками, які в нормальних умовах експлуатації повинні мати різний потенціал. Величина такого струму перевищує в 8-10 разів номінальний струм автоматичного вимикача. Досить тривалий струм перевантаження може привести до пошкодження. Струм короткого замикання може бути результатом пошкодження або неправильного з'єднання [3]. Від такого струму захищає електромагнітний розчіплювач та захисти S, D, I електронних розчіплювачів.

Струм короткого замикання повинен бути відключений за мінімально можливий час за рахунок миттєвого розчіплювача автоматичного вимикача або розчіплювача з витримкою часу. Розглянемо зону селективності в залежності від типу пошкодження.

Зона перевантаження починається від порогу спрацювання I_{nt} пристрою захисту від перевантаження. Крива відключення $t_c = f(I_p)$ має спадний характер і повинна бути узгоджена з кривою допустимої термічної стійкості кабелю.

Широко відомий метод перевірки даної умови полягає в зображенні кривої відключення в функції струму відключення в подвійному логарифмічному масштабі (рис. 3). Так, для якогось значення струму перевантаження селективності при перевантаженні забезпечується, якщо тривалість відключення автоматичного вимикача QF1, розміщеного вище (ближче до джерела), більше максимального часу відключення автоматичного вимикача QF2 (враховуючи час дуги). Ця умова реалізується практично при співвідношенні $I_{nt1} / I_{nt2} > 1,6$. [4]

Техніка, що дозволяє прийти до селективності в режимі короткого замикання між двома апаратами, базується на використанні автоматичних вимикачів і/або пристроїв різних типів і налаштувань, яка дозволила б уникнути перетинання часо-струмових характеристик спрацювання.

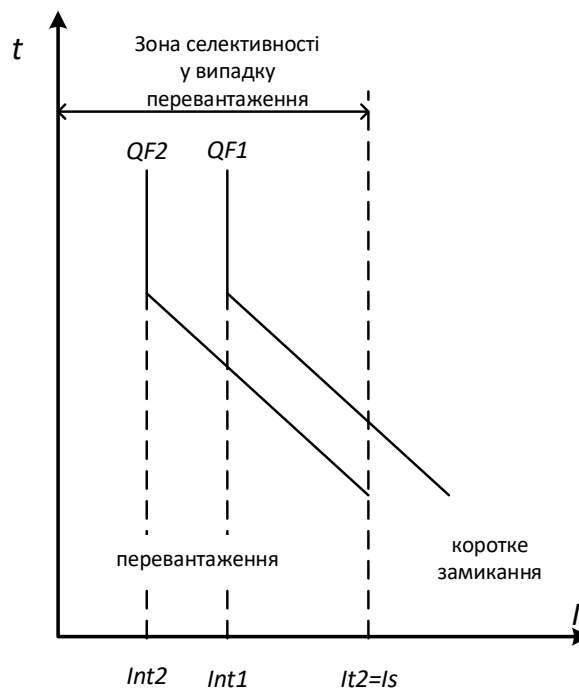


Рисунок 3 – Струмова селективність автоматичних вимикачів при перевантаженні

У зоні короткого замикання висновок про селективність впливає з порівняння кривих пристроїв захисту розташованих нижче і вище від джерела.

Існують кілька способів, що дозволяють досягти селективності між двома апаратами в режимі короткого замикання [5, 6].

Струмова селективність забезпечується за рахунок різних струмів рушання миттєводіючих розчіплювачів автоматичних вимикачів, які послідовно встановлені в мережі. Відомо, що чим ближче до джерела короткого замикання, тим надструм на цій ділянці більший. Встановивши автоматичні вимикачі по ділянках, можна легко визначити, на якій з них сталося коротке замикання. Такий тип селективності використовується, в основному, на кінцевих ділянках системи електропостачання.

Для практичної реалізації методу необхідний автоматичний вимикач з електромагнітним розчіплювачем. Такий метод застосовується тільки для захисту від струмів короткого замикання і веде до забезпечення лише часткової селективності. Селективність буде тим більш ефективніша, чим більша різниця струмів короткого замикання в різних точках мережі за рахунок різних опорів провідників малого перетину (рис. 4). Зона селективності буде тим більша, чим більше різниця уставок спрацювання розчіплювачів QF1 і QF2 і чим далі точка пошкодження віддалена від місця установки QF2 ($I_{nt2} < I_{nt1}$).

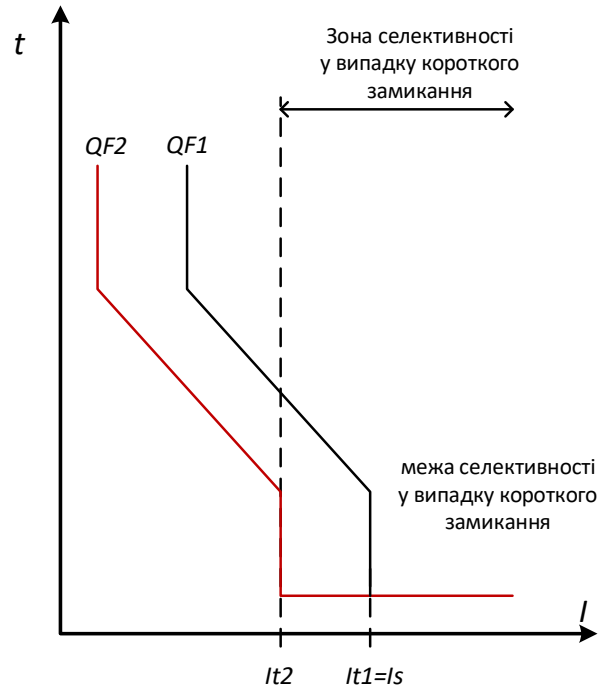


Рисунок 4 – Струмова селективність автоматичних вимикачів в зоні струмів короткого замикання

Виробниками рекомендується мінімальне співвідношення між номіналами електромагнітних розчіплювачів з урахуванням розкиду реальних значень спрацювання:

$$I_{n1} / I_{n2} = 1,6 \quad (1.1)$$

Селективність за часом полягає в налаштуванні різних витримок часу в апаратах захисту, що знаходяться на різних рівнях системи електропостачання і реагують на надструм, що виникає, в колі. Чим ближче розташований апарат до джерела, тим більше повинно бути його витримка спрацювання.

Характерною ілюстрацією застосування даного методу забезпечення селективності є аварійна ситуація, показана на рис. 1, де використовуються всі апарати захисту електроустановки (QF1, QF2; QF3, QF4). Апарат QF4 – найближчий до місця аварії – швидше спрацює, ніж, апарат QF3, котрий, в свою чергу, реагує на аварію швидше ніж QF2 і т.д. Припустимо, апарат QF4 вимкнувся, і аварійний струм було ліквідовано. Апарати QF1, QF2, і QF3, спрацювання яких не потрібне, залишаються у вихідному стані.

Для досягнення повної такої селективності необхідно щоб криві $t_c = f(I_{K3})$ двох автоматичних вимикачів не перетиналися в жодній точці за будь-яких величин струмів короткого замикання.

Різниця в часі спрацювання Δt між двома послідовними апаратами є ступінь селективності, котрий складається з трьох складових:

- час t_c , за який автоматичний вимикач розмикає коло;
- час затримки спрацювання dt ;
- час t_r , за який апарати захисту повертаються в початковий стан.

Тому Δt має відповідати співвідношенню:

$$\Delta t > t_c + t_r + dt \quad (1.2)$$

При великих струмах короткого замикання повна селективність забезпечується, якщо розрізняються також дві горизонтальні ділянки кривих праворуч від I_{II} (рис. 5).

Витримка часу спрацювання апаратів при селективності за часом відраховується з моменту перевищення струму в колі струму спрацювання розчіплювача. Існують два типи такої селективності:

- за часом – витримка часу встановлюється як постійна і незалежить від значення надструму при перевищенні ним уставки спрацювання;
- за обернено залежною витримкою часу – чим більший надструм, тим менше час витримки. Якщо уставки налаштовані на $I_{ном}$, то захист від перевантаження забезпечується з одночасним захистом, кола від короткого замикання.

Використання автоматичних вимикачів з витримкою часу призводить до загального часу відключення від 20 мс (миттєве) до сотень мілісекунд при спрацюванні із сповільненням (рис. 5).

Очевидним недоліком селективності за часом, крім існування вищезазначених меж застосування, є також необхідність певного часу на очікування «рішення» системи захисту електроустановки. Цей час очікування є необхідним, виходячи з самого принципу організації даного методу.

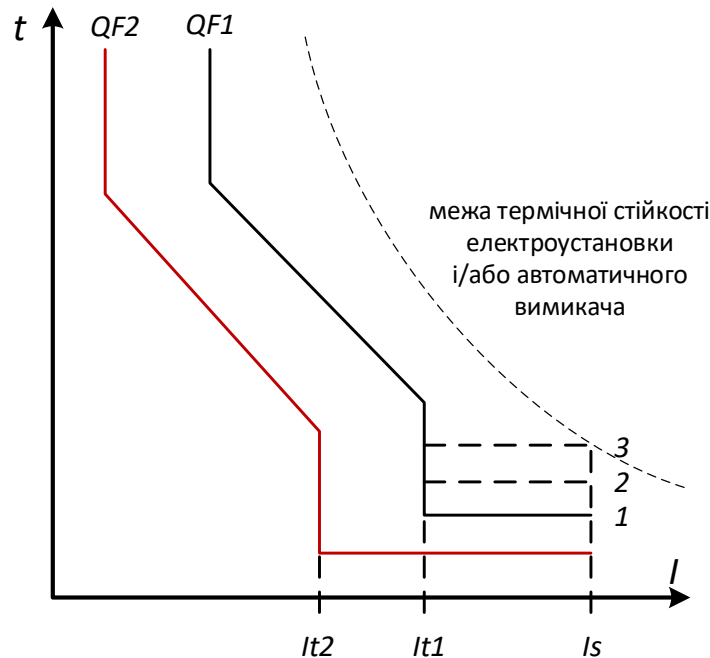


Рисунок 5 – Селективність за часом: QF1 – швидкодіючий апарат; QF2 – селективний апарат з витримкою часу 1-2-3

При цьому на систему електропостачання діє аварійний струм, що призводить до додаткового зносу обладнання і більш високим вимогам до його термічної та динамічної стійкості. Зменшення часу очікування на ступенях тимчасової затримки можливо при зменшенні розкиду значень під часо-струмових характеристиках автоматичних вимикачів (підвищення точності спрацювання), що, безумовно, пов'язано зі значним збільшенням собівартості обладнання. Застосування в апаратах мікропроцесорних розчіплювачів, також пов'язане зі збільшенням собівартості, дозволяє підвищити швидкодію системи захисту шляхом збільшення точності роботи.

Струмообмежувальні автоматичні вимикачі мають такі особливості:

- вони обмежують струм короткого замикання, завдяки високій швидкодії розмикання контактів і зростання напруги на дузі;
- чим вищий очікуваний струм короткого замикання, тим вище їх швидкодія.

Таким чином, вибір нижче-розташованого (далі від джерела) струмообмежувального вимикача дозволяє отримати «псевдочасову» селективність між двома рівнями захисту. Таке рішення за рахунок струмообмежувального дії і швидкого відключення дозволяє знизити термічне і електродинамічне навантаження на електроустановку в цілому (рис. 6). Пунктиром на рис. 6 позначена характеристика апарату, що має невелике сповільнення. Як видно з рисунку, застосування таких апаратів дозволяє забезпечити селективність автоматичних вимикачів в зоні струмів короткого замикання.

Компанією «Шнайдер Електрик» розроблений принцип селективності «SELLIM», який реалізовується на їх власних автоматичних вимикачах. Згідно з принципом роботи цієї системи, вище автоматичного вимикача QF2 встановлюється надструмообмежувальний вимикач QF1, обладнаний спеціальним розчіплювачем, який не спрацює протягом першого півперіоду струму короткого замикання (рис. 7). Коротке замикання в точці K2 фіксується розчіплювачами автоматичних вимикачів. Автоматичний вимикач QF2 з миттєво діючим розчіплювачем вимикається щойно струм короткого замикання перевищить уставку спрацювання розчіплювача з сповільненням не більше половини періоду струму (0,01 с). Розчіплювач автоматичного вимикача QF1 фіксує першу півхвилю струму короткого замикання, але не вимикає вимикач. Струм короткого замикання відштовхує контакти вимикача, обмежуючи результуючий ударний струм. Таке обмеження струму короткого замикання означає, що автоматичні вимикачі встановлені нижче, можуть використовуватись з вимикаючою здатністю, яка менша, ніж струм короткого замикання.

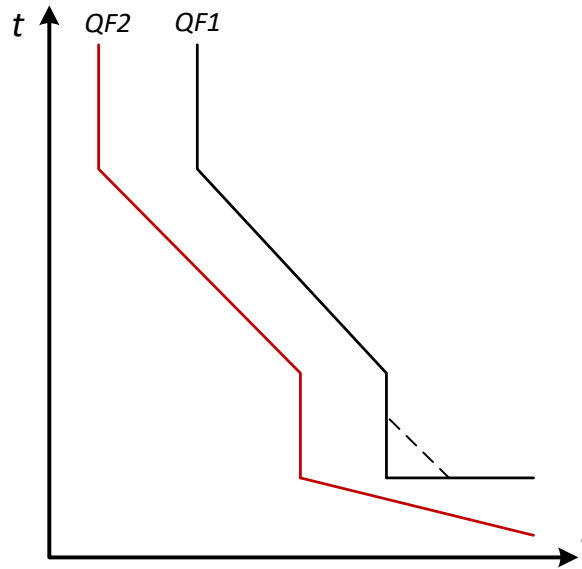


Рисунок 6 – «Псевдочасова» селективність: QF1 – швидкодіючий апарат; QF2 - струмообмежувальний автоматичний вимикач

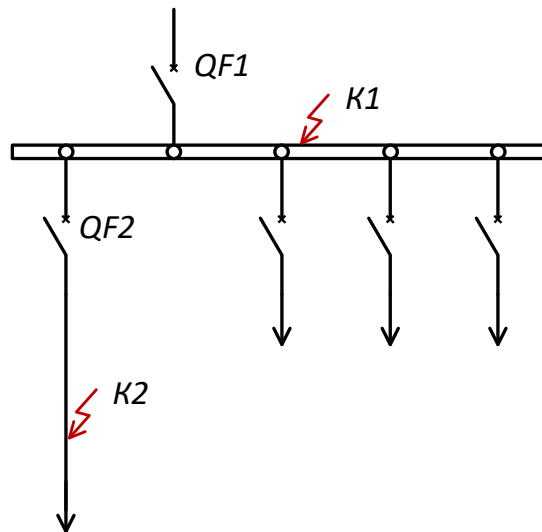


Рисунок 7 – Селективність «SELLIM»

Коротке замикання в точці K1 відштовхує контакти струмообмежувального вимикача QF1, обмежуючи тим самим дію аварійного струму на електричне обладнання. Після, або протягом другої півхвили обмеженого струму короткого замикання автоматичний вимикач QF1 вимикається.

В основі методу логічної селективності лежить обмін інформацією між автоматичними вимикачами різного рівня в радіальній системі електропостачання. Принцип дії досить простий. Всі автоматичні вимикачі, через які протікає аварійний струм короткого замикання, який більший, ніж уставки їх розчіплювачів, надсилають сигнал «логічне очікування» тому апарату, котрий знаходиться вище точки пошкодження (ближче до джерела). Розчіплювач автоматичного вимикача, який ближче до точки короткого замикання (зі сторони живлення), такий сигнал не отримує і реагує на пошкодження без сповільнення.

На рис. 8 представлений приклад реалізації даного методу для двох послідовно встановлених автоматичних вимикачів QF1 і QF2. При короткому замиканні на затискачах QF2 аварійний струм буде протікати через QF1 і QF2.

Логічне реле апарату QF2 відправить сигнал логічного очікування на логічне реле QF1, що не допустить спрацювання QF1. Якщо коротке замикання відбувається на затискачах QF1, то сигнал логічного очікування не надходить на логічне реле QF1 і даний автоматичний вимикач спрацює, в даному випадку, миттєво.

Такий тип селективності забезпечує незначний час вимкнення короткого замикання на усіх рівнях мережі. Логічна селективність застосовується в селективних апаратах низької напруги з великим номінальним струмом, а також використовується в промислових мережах високої напруги.

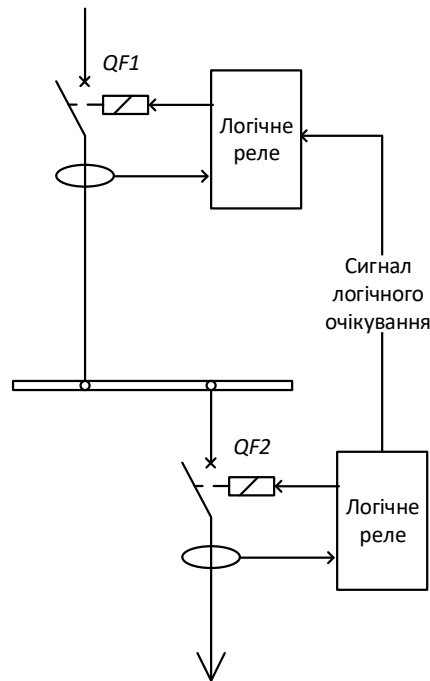


Рисунок 8 – Логічна селективність

Існує залежність між часом спрацювання електромагнітних розчіплювачів і значеннями їх номінальних струмів. Багато виробників в каталогах на свою продукцію наводять так звані, таблиці селективності (рис. 9), в яких вони показують марки автоматичних вимикачів між якими забезпечується повна селективність – селективність на всьому діапазоні надструмів [6].

Дані, наведені у цих таблицях, виробники отримані експериментально. Експерименти були проведені для визначення зони повної селективності автоматичних вимикачів, котрі мають різні номінальні струми електромагнітних розчіплювачів. «Таблиці селективності» зручні, оскільки не вимагають застосування часо-струмових характеристик для визначення меж селективної роботи апаратів. Оскільки така селективність не потребує ніяких додаткових засобів для її забезпечення, і вона заснована лише на фізичних властивостях об'єктів що вивчаються, тому вона називається природною (або повною) селективністю

Основним недоліком «таблиць селективності» є те, що в них закладені чіткі умови величини уставок для забезпечення меж селективності захисних пристроїв. Ці умови зменшують діапазон селективно-працюючих автоматичних вимикачів. Насправді регулюючи величину уставок автоматичних вимикачів, можна погодити вибірку роботу вимикачів між собою, де за таблицями селективність не забезпечується. Крім того, межі селективності в таблицях іноді відрізняється від даних вимикачів тієї ж компанії. Такі таблиці абсолютно непридатні для аналізу взаємозамінності з обладнанням інших виробників, так як вони базуються на експериментальних даних, отриманих для вимикачів тільки власного виробництва.

Під час розгляду природної селективності електромагнітних розчіплювачів було показано, що струмова селективність існує за межами теоретичної норми (рис. 4). Проте, було не врахована струмообмежувальна властивість автоматичних вимикачів, які проявляється при підвищенні струмів короткого замикання ($I > 12I_{ном}$). В нинішній час при виборі селективного обладнання розробники систем електропостачання орієнтуються дані які наведені в каталогах виробників. Відповідно до цих даних можна визначити межі селективності для кожної комбінації автоматичних вимикачів і для кожного типу розчіплювачів. Вибір апаратів також визначає їх вартість і надійність, як виражається, зокрема і в ймовірності неселективного спрацювання.

Енергетична селективність є оригінальним методом забезпечення повної селективності на всіх рівнях захисту при мінімальних витратах і значно спрощує проблему розподілу енергії на низькій напрузі [7]. Цей метод є ні що інше, як поліпшення і узагальнення «псевдочасової» селективності, і суть його полягає в наступному. Повна селективність буде забезпечена, якщо для всіх струмів $I_{кз}$ енергія, яка пройшла через розташований нижче автоматичний вимикач виявиться менше енергії, необхідної для приведення в дію розчіплювача автоматичного вимикача, розташованого вище.



Таблиця селективності

автоматичні вимикачі TX³ і DX³/автоматичні вимикачі DX³, DPX³ і DPX

Нижчий модульний автоматичний вимикач	Висхідний автоматичний вимикач	DX ³ 16000 - 10 kA / DX ³ 10000 - 16 kA				DX ³ 6000L 10 kA / DX ³ 10000L 16 kA								DX ³ 25 kA / DX ³ 36 kA							
		Тип захисної характеристики В				Тип захисної характеристики С								Тип захисної характеристики С							
		In (A)	32	40	50	63	32	40	50	63	80	100	125	32	40	50	63	80	100	125	
TX ³ - 10 kA Тип захисної характеристики В і С	≤6	128	160	200	252	240	300	375	472	1300	1600	2000	240	300	300	472	1300	1600	2000		
	10	128	160	200	252	240	300	375	472	1150	1450	1800	240	300	300	472	1150	1450	1800		
	13	128	160	200	252	240	300	375	472	1000	1300	1600	240	300	300	472	1000	1300	1600		
	16	128	160	200	252	240	300	375	472	950	1200	1500	240	300	300	472	950	1200	1500		
	20		160	200	252	240	300	375	472	900	1100	1400	240	300	300	472	900	1100	1400		
	25		160	200	252	240	300	375	472	850	1000	1300	240	300	300	472	850	1000	1300		
	32				252		300	375	472	750	950	1200		300	375	472	750	950	1200		
	40							375	472	700	850	1100			375	472	700	850	1100		
	50								472	650	800	1000				472	650	800	1000		
	63									600	800	1000					650	800	1000		
DX ³ -E - 6 kA Тип захисної характеристики В	≤6	128	160	200	252	240	300	375	472	4000	T	T	700	1200	1500	3000	4000	T	T		
	10	128	160	200	252	240	300	375	472	3000	5000	T	500	700	1000	1800	3000	5000	T		
	16	128	160	200	252	240	300	375	472	2000	3600	5500	300	500	700	1300	2000	3600	5500		
	20		160	200	252	240	300	375	472	1600	3000	4000	300	400	500	1000	1600	3000	4000		
	25		160	200	252	240	300	375	472	1300	2400	3300	240	400	500	800	1300	2400	3300		
	≤6	128	160	200	252	240	300	375	472	4000	T	T	700	1200	1500	3000	4000	T	T		
	10	128	160	200	252	240	300	375	472	3000	5000	T	500	700	1000	1800	3000	5000	T		
	13	128	160	200	252	240	300	375	472	2500	4000	6000	400	600	1200	1500	2500	4000	6000		
	16	128	160	200	252	240	300	375	472	2000	3600	5500	300	500	700	1300	2000	3600	5500		
	20		160	200	252	240	300	375	472	1600	3000	4000	300	400	500	1000	1600	3000	4000		
DX ³ -E - 6 kA Тип захисної характеристики С	25		160	200	252	240	300	375	472	1300	2400	3300	240	400	500	800	1300	2400	3300		
	32				252		300	375	472	1000	1800	2700		300	500	600	1000	1800	2700		
	40							375	472	800	1600	2400			400	600	800	1600	2400		
	50								472	800	900	1700			400	500	800	900	1700		
	63									650	900	1200				500	800	900	1200		
	≤6	128	160	200	252	240	300	375	472	4000	T	T	700	1200	1500	3000	4000	T	T		
	10	128	160	200	252	240	300	375	472	3000	5000	T	500	700	1000	1800	3000	5000	T		
	16	128	160	200	252	240	300	375	472	2000	3600	5500	300	500	700	1300	2000	3600	5500		
	20		160	200	252	240	300	375	472	1600	3000	4000	300	400	500	1000	1600	3000	4000		
	25		160	200	252	240	300	375	472	1300	2400	3300	240	400	500	800	1300	2400	3300		
DX ³ 10000L - 10 kA Тип захисної характеристики В і С	32				252		300	375	472	1000	1800	2700		300	500	600	1000	1800	2700		
	40							375	472	800	1600	2400			400	600	800	1600	2400		
	50								472	800	900	1700			400	500	800	900	1700		
	63									650	900	1200				500	800	900	1200		
	≤6	128	160	200	252	240	300	375	472	4000	T	T	700	1200	1500	3000	4000	T	T		
	10	128	160	200	252	240	300	375	472	3000	5000	T	500	700	1000	1800	3000	5000	T		
	16	128	160	200	252	240	300	375	472	2000	3600	5500	300	500	700	1300	2000	3600	5500		
	20		160	200	252	240	300	375	472	1600	3000	4000	300	400	500	1000	1600	3000	4000		
	25		160	200	252	240	300	375	472	1300	2400	3300	240	400	500	800	1300	2400	3300		
	DX ³ 10000L - 16 kA Тип захисної характеристики В і С	32				252		300	375	472	1000	1800	2700		300	500	600	1000	1800	2700	
40								375	472	800	1600	2400			400	600	800	1600	2400		
50									472	800	900	1700			400	500	800	900	1700		
63										650	900	1200				500	800	900	1200		
80										600	750					650	800	900	1200		
100											750					750	800	900	1200		

DX ³ 25 kA / DX ³ 36 kA						DPX ³ 160 з або без диф. захисту 16 / 25 / 36 / 50 kA						DPX ³ 250 з або без диф. захисту 25 / 36 / 50 / 70 kA				DPX 250, DPX-H 250 і DPX-L 250					DPX 630, DPX-H 630, DPX-L 630, DPX 1250, DPX-H 1250, DPX-L 1250 DPX 1600 і DPX-H 1600		
Тип захисної характеристики D						16 / 25 / 36 / 50 kA						25 / 36 / 50 / 70 kA				40, 63, 100, 160, 250					от 160 А до 1600 А		
32	40	50	63	80	100	125	40	63	80	100	125	160	100	160	200	250	40	63	100	160	250		
384	480	600	756	2000	2400	3000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	6	6	T	T	T		
384	480	600	756	1750	2150	2700	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	5	5	T	T	T		
384	480	600	756	1500	2000	2400	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	480	600	756	1400	1800	2200	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	480	600	756	1350	1650	2100	5	5	5	6	T	T	8	T	T	T	4	4	8	T	T		
384	480	600	756	1300	1500	2000	4,5	4,5	4,5	4,5	T	T	6	T	T	T	3	3	6	T	T		
	480	600	756	1100	1450	1800					3	4	4	T	T	5	T	T	2	5	T		
		600	756	1000	1250	1650					3	3	3	T	T	5	T	T	2	5	T		
			756	950	1200	1500					3	3	5,5	7	4	8	T	T		4	8		
				950	1200	1500					3	3	5	6	4	8	T	T		4	8		
700	1200	1500	3000	4000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
500	700	1000	1800	3000	5000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	5	5	T	T	T		
384	500	700	1300	2000	3600	5500	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	480	600	1000	1600	3000	4000	5	5	5	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	480	600	800	1300	2400	3300	4,5	4,5	4,5	4,5	T	T	T	T	T	T	3	3	T	T	T		
700	1200	1500	3000	4000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
500	700	1000	1800	3000	5000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	5	5	T	T	T		
400	600	1200	1500	2500	4000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	500	700	1300	2000	3600	5500	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	480	600	1000	1600	3000	4000	5	5	5	T	T	T	T	T	T	T	4	4	T	T	T		
384	480	600</																					

Принцип енергетичної селективності захищений патентом Merlin Gerin і реалізований в автоматичних вимикачах серії Compact NS. Для реалізації даного, методу необхідно використовувати струмообмежувальні і швидкодіючі автоматичні вимикачі, що відповідають сучасному рівню розвитку систем електропостачання, а саме:

- зниження навантажень на електроустановку за рахунок обмеження струмів короткого замикання і тривалості його існування;
- зростання встановленої потужності і, як наслідок, збільшення струмів короткого замикання і вимикаючої здатності.

Використання автоматичних вимикачів серії Compact NS дозволяє отримати повну селективність у випадку струмів короткого замикання до 150 кА, якщо виконуються дві умови:

- відношення номінальних струмів послідовно встановлених автоматичних вимикачів повинно бути не менше 2,5;
- відношення між уставками розчіплювачів цих автоматичних вимикачів повинно бути не менше 1,6.

Якщо вказані вимоги не виконуються, то забезпечується лише часткова селективність.

Висновки. Аналіз існуючих принципів селективності свідчить про складність та незавершеність забезпечення координації роботи пристроїв захисту в розподільних мережах 0,4 кВ споживачів. Струмова селективність забезпечується лише в зоні дії струмів короткого замикання. Для її виконання необхідні вимикачі з електромагнітними, або електронними розчіплювачами, обладнанні з постійною уставкою сповільнення. Цей тип розчіплювачів застосовується для виконання селективності за часом і обмеження термічного впливу струмів короткого замикання на електроустановку і апарат. Застосування апаратів з «псевдочасовою» селективністю забезпечує селективність роботи автоматичних вимикачів в зоні струмів короткого замикання. Селективність «SELLIM» забезпечується з швидкодією 0,01 с, але можливе лише в автоматичних вимикачах «Шнайдер Електрик». Для логічної селективності необхідний канал зв'язку між комутаційними апаратами та наявність автоматичних вимикачів з відповідними портами зв'язку. Найпростіше забезпечити селективність, використовуючи вимикачі одного виробника за допомогою таблиць селективності. Але таке рішення на практиці зустрічається не завжди. Метод енергетичної селективності дозволяє з урахуванням співвідношення між номіналами, реалізувати або часткову селективність, або повну аж до межі вимикаючої здатності автоматичних вимикачів. Для забезпечення енергетичної селективності між двома і більше струмообмежувальними апаратами необхідно враховувати, що в залежності від місця короткого замикання в обмеженні аварійного струму братиме участь різна кількість автоматичних вимикачів, а отже, величина обмеженого струму також буде різною. Використовуючи автоматичні вимикачі з високим рівнем струмообмеження і швидкістю вимкнення, яка обернено залежить від струму короткого замикання, можна забезпечити повну селективність на кількох рівнях мережі. Це дозволяє спростити аналіз селективності, мінімізувати електродинамічний, термічний вплив та зменшити рівень посадки напруги внаслідок дії короткого замикання. Удосконалення систем захисту електроустановок дозволяє проектувати системи електропостачання без зайвих запасів перевантаження електрообладнання, що зменшує їх вартість, габарити і масу. З іншого боку, в разі виникнення збоїв в роботі електрообладнання – це обмежує аварійні струми і запобігає виходу з ладу непошкодженої частини електроустановки, що значно знижує час простоїв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ EN 60947-1:2017 Апаратура комутаційна та апаратура керування низьковольтна. Частина 1. Загальні правила (EN 60947-1:2007; A1:2011; A2:2014, IDT; IEC 60947-1:2007, A1:2010; A2:2014, IDT).
2. ДСТУ EN 60947-2:2019 Пристрої комплектні розподільчі низьковольтні. Частина 2. Автоматичні вимикачі (EN 60947-2:2017, IDT; IEC 60947-2:2016, IDT).
3. ДСТУ EN 60898-1:2019 Вимикачі для захисту від надструмів автоматичні побутової та аналогічної призначеності. Частина 1. Автоматичні вимикачі змінного струму (EN 60898-1:2019, IDT; IEC 60898-1:2015, MOD).
4. ДСТУ EN 60898-2:2022 Вимикачі для захисту від надструмів автоматичні побутової та аналогічної призначеності. Частина 2. Автоматичні вимикачі змінного та постійного струму (EN 60898-2:2021, IDT; IEC 60898-2:2016, MOD).
5. Itoh T., Miyamoto T., Wada Y. Mori T., Sasao H. Desing considerations of permanent power fuse. Conference Paper NC72 103–5 IEEE Winter meeting. 1982.
6. ABB SACE. (2005, QT1 Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers. 52. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/65ddf36f7c3bd0fec1257ac500377a37/\\$file/1sdc007100g0204.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/65ddf36f7c3bd0fec1257ac500377a37/$file/1sdc007100g0204.pdf)
7. Coordination of low voltage protection devices. Low Voltage Expert Guide n°5: 2008.
8. Serpinet M., Morel R. Energy-based discrimination for low-voltage protective devices. Cahier Cahier Technique Schneider no. 167. 2020.

REFERENCES

1. DSTU EN 60947-1: 2017 Low-voltage switching and control equipment. Part 1. General Rules (EN 60947-1: 2007; A1:2011; A2:2014, IDT; IEC 60947-1:2007, A1:2010; A2:2014, IDT).
2. DSTU EN 60947-2: 2019 Low-voltage switchgear sets. Part 2. Circuit breakers (EN 60947-2: 2017, IDT; IEC 60947-2:2016, IDT).
3. DSTU EN 60898-1: 2019 Switches for overcurrent protection are automatic for household and similar purposes. Part 1. AC circuit breakers (EN 60898-1: 2019, IDT; IES 60898-1: 2015, MOD).
4. DSTU EN 60898-2: 2022 Circuit breakers for protection against overcurrent automatic household and similar purpose. Part 2. AC and DC circuit breakers (EN 60898-2: 2021, IDT; IEC 60898-2:2016, MOD).
5. Itoh T., Miyamoto T., Wada Y. Mori T., Sasao H. Desing considerations of permanent power fuse. Conference Paper NC72 103–5 IEEE Winter meeting. 1982.
6. ABB SACE. (2005, QT1 Low voltage selectivity with ABB circuit-breakers. 52. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/65ddf36f7c3bd0fec1257ac500377a37/\\$file/1sdc007100g0204.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/65ddf36f7c3bd0fec1257ac500377a37/$file/1sdc007100g0204.pdf)
7. Coordination of low voltage protection devices. Low Voltage Expert Guide n°5: 2008.
8. Serpinet M., Morel R. Energy-based discrimination for low-voltage protective devices. Cahier Cahier Technique Schneider no. 167. 2020.

A. HADAI, I. BANDURA, V. VOLYNETS, N. KOMENDA, M. ROMANYUK
Lutsk National Technical University

Overview of the principles of selectivity of protections in the distribution networks of consumers with voltage 0.4 kV. The analysis of existing principles of selectivity indicates the complexity and incompleteness of ensuring the coordination of the operation of protection devices in distribution networks of 0.4 kV consumers. Current selectivity is ensured only in the area of action of short-circuit currents. To ensure it, electromagnetic or electronic decouplers with a constant deceleration setting are required. This type of disconnectors is used to perform time selectivity and limit the thermal impact of short-circuit currents on the electrical installation and device. The use of devices with "pseudo-time" selectivity ensures the selectivity of the operation of automatic switches in the area of short-circuit currents. Selectivity "SELLIM" is provided with a speed of 0.01 s, but it is possible only in automatic circuit breakers "Schneider Electric". Logical selectivity requires a communication channel between switching devices and the presence of circuit breakers with appropriate communication ports. It is easiest to ensure selectivity by using switches from the same manufacturer using selectivity tables. But such a solution is not always found in practice. The method of energy selectivity allows, taking into account the ratio between ratings, to implement either partial selectivity or full selectivity up to the limit of the breaking capacity of automatic switches. To ensure energy selectivity between two or more current-limiting devices, it must be taken into account that depending on the location of the short circuit, a different number of circuit breakers will be involved in limiting the emergency current, and therefore, the value of the limited current will also be different. By using circuit breakers with a high level of current limitation and a tripping speed that is inversely related to the short-circuit current, full selectivity can be provided at several levels of the network. This makes it possible to simplify the analysis of selectivity, minimize electrodynamic and thermal effects and reduce the level of voltage drop due to the action of a short circuit. Improvement of electrical installation protection systems makes it possible to design power supply systems without excessive reserves of electrical equipment overload, which reduces their cost, dimensions and weight. On the other hand, in the event of malfunctions in the operation of electrical equipment, this limits emergency currents and prevents failure of the undamaged part of the electrical installation, which significantly reduces downtime.

Key words: *selectivity, relay protection devices, circuit breakers, electrical devices, 0.4 kV network.*