

*О.А. Данилов*

(Україна, м. Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В.Лазаряна)

## ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ВИМІРЮВАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ЗАХИСТАХ ФІДЕРІВ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ТРАНСПОРТУ

### Вступ

Останнім часом для захисту електричних мереж все більше впроваджуються мікропроцесорні комплекти. З'явилися багатофункціональні мікропроцесорні комплекти і для захисту фідерів контактної мережі постійного струму. На електрифікованих залізницях України використовують два пристрої: ЦЗАФ-3,3 ТОВ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» і МРЗС-05А-02 ПО «Київприлад» [1]. По технічним характеристикам обидва пристрої дуже схожі. Вони включають в собі наступні струмові захисти:

- максимальний струмовий захист;
- захист по швидкості зростання струму;
- захист по збільшенню струму за проміжок часу з урахуванням попереднього значення.

Максимальний струмовий захист спрацьовує при перевищенні струму уставки без урахування попередніх значень. Захист по швидкості зростання струму реагує на збільшення струму за 2 мілісекунди. Захист по збільшенню струму реагує на збільшення струму за деякий проміжок часу. Тягові навантаження електрифікованих залізниць постійного струму, на відміну від навантажень інших споживачів електроенергії, характеризуються особливими властивостями. Їх значення практично весь час змінюються, а зміни носять випадковий і швидкозмінний характер. Але аналогічний характер збільшення струму відповідає й аварійним режимам. Ці особливості вказують на складність їхнього поділу і специфічність вимог до захистів мережі постійного струму.

### Аналіз існуючих методів розрахунку

Тягові навантаження електрифікованих залізниць постійного струму характеризуються великими струмами. Існують ділянки де максимальні робочі струми можуть перевищувати мінімальні струми короткого замикання. Тому максимальний струмовий захист на цих ділянках буде мати хибні спрацьовування, або мертві зони в разі збільшення струму уставки.

Короткі замикання характеризуються великою швидкістю зростання струму і тому ця характеристика використовується для визначення аварійного режиму. Але існують і експлуатаційні випадки з великою швидкістю зростання струму. До них відносять:

- пуск електропоїзда;
- переключення схеми з'єднання тягових двигунів;
- відрив струмоприймача;
- прохід поїзда ізолюючого сполучення під струмом.

Досвід експлуатації показав, що захист по швидкості зростання струму дає найбільшу кількість хибних відключень. Тому на практиці цей захист на більшості ділянок не використовують.

Для налаштування захисту по збільшенню струму за проміжок часу необхідно запрограмувати дві величини: струм і час вимірювання. Як видно з рис. 1 збільшення струму залежить від сталого струму короткого замикання ( $I_{кз}$ ), сталої часу кола к.з. ( $T_k$ ), часу вимірювання ( $T_v$ ), струму навантаження ( $I_{нав}$ ), який протікав до виникнення аварії. Ця залежність описується відомою формулою зміни струму [2].

$$i_k = I_H + (I_K - I_H)(1 - e^{-t/T_k}) = I_H + \Delta I(1 - e^{-t/T_k}). \quad (1)$$

Час вимірювання збільшення струму рекомендовано вибирати достатньо малим, щоб було неможливо виміряти два кидки струму при переключенні ходової позиції електровозу, але в той же час достатнім для максимально повного вимірювання струму короткого замикання [3]. Тому час вимірювання лежить в межах від  $3T_k$  до 1с. Рекомендовано вибирати, в залежності від перерізу контактної мережі, час вимірювання від 0,1 до 0,5 секунди. В останній редакції інструкції розрахунку і вибору уставок, час вимірювання рекомендовано вибирати в межах від 0,1 до 0,6 секунди [4].

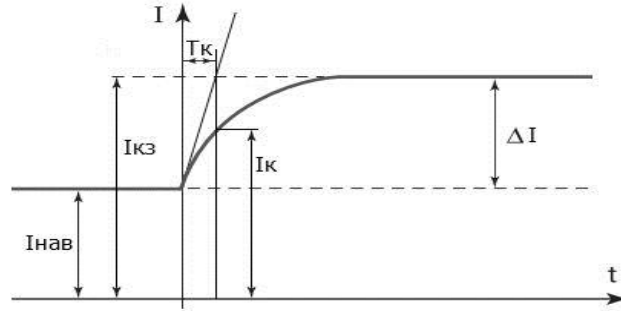


Рис. 1. Характер зміни струму короткого замикання

**Розрахунки та дослідження**

Для аналізу перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму були виконані вимірювання на двоколійній дільниці з контактною мережею М120+2МФ100 і рейками Р65. Дослідження проводились при робочих і аварійних режимах. Були виконані штучні короткі замикання в трьох характерних точках: біля підстанції, в середині і в кінці фідерної зони. Осцилограми струмів к.з. для наочності зведені разом і показані на рисунку 2. Час по осі абсцис показаний в мілісекундах. Для аналізу залежності струму від відстані і часу протікання будемо використовувати тільки першу половину осцилограм, оскільки значення, де струм зменшується, показує не характер зміни струму короткого замикання, а роботу швидкодіючого вимикача. Характер збільшення струму, як було зазначено вище, залежить від сталого струму короткого замикання і сталої часу кола к.з. Тягова мережа має активно-індуктивний характер, тому стала часу визначається як  $T_k = L_k / R_k$ , де  $L_k$  і  $R_k$  – індуктивність і активний опір кола короткого замикання. Стала часу  $T_k$  залежить від відстані між підстанцією і точкою к.з. Зі збільшенням відстані, стала часу зменшується. Це пояснюється тим, що відношення індуктивності реактора до опору підстанції більше, ніж відношення індуктивності тягової мережі до її омичного опору. Для експериментальної дільниці стала часу підстанції дорівнювала 0,04 с, а тягової мережі – 0,017 с. Результати розрахунків струмів короткого замикання і сталої часу кіл коротких замикань представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Струм і стала часу в залежності від відстані

Відстань, км	Напруга, В	Опір, Ом	Індуктивність, Гн	Стала часу, с	Струм к.з., А
0,9	3570	0,238	0,008	0,034	15000
8,9	3570	0,768	0,017	0,022	4648
17,6	3570	1,314	0,026	0,020	2716

З осцилограм видно, що струм, завдяки малому опору контактної мережі, стрімко зростає. Для близьких к.з. струм вже через декілька мілісекунд досягає небезпечних значень, при яких можливий перепал контактного проводу. Тому швидкодія релейного захисту контактної мережі постійного струму дуже важлива. Враховуючи, що вимикач має власний час відключення, то захист повинен реагувати на самий початок аварії, коли струм ще малий.

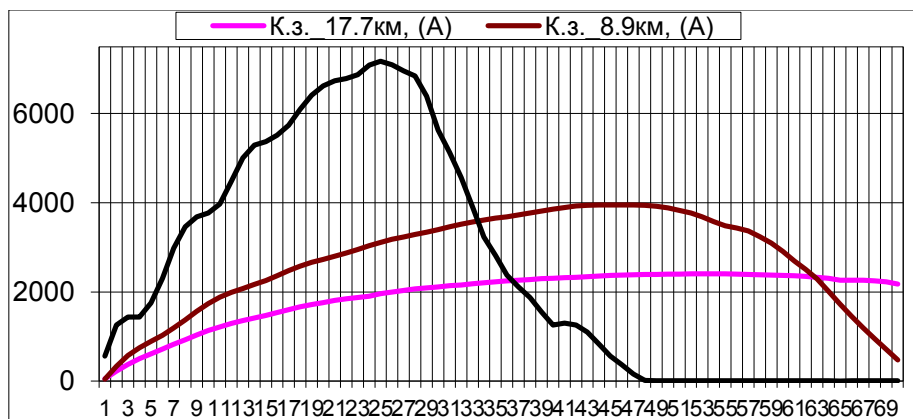
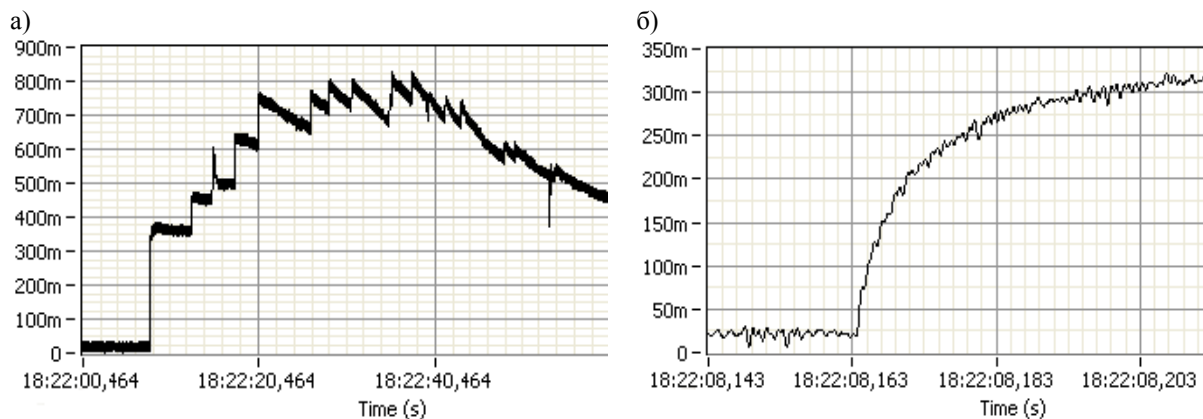


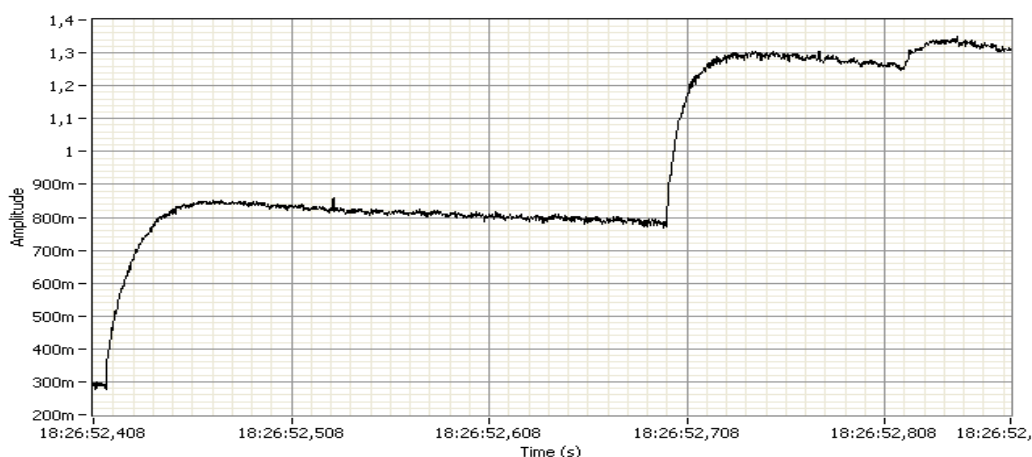
Рис. 2. Струми к.з. в залежності від відстані до підстанції

Для правильного налаштування релейного захисту необхідно знати характер зміни струму не тільки при короткому замиканні, але й при робочих режимах. При паралельній схемі живлення контактної мережі, струм електровозу розподіляється між чотирма живлячими фідерами. Крім того, на фідерній зоні можуть бути одночасно декілька потягів. Тому для аналізу перехідних процесів, які відбуваються в ре-

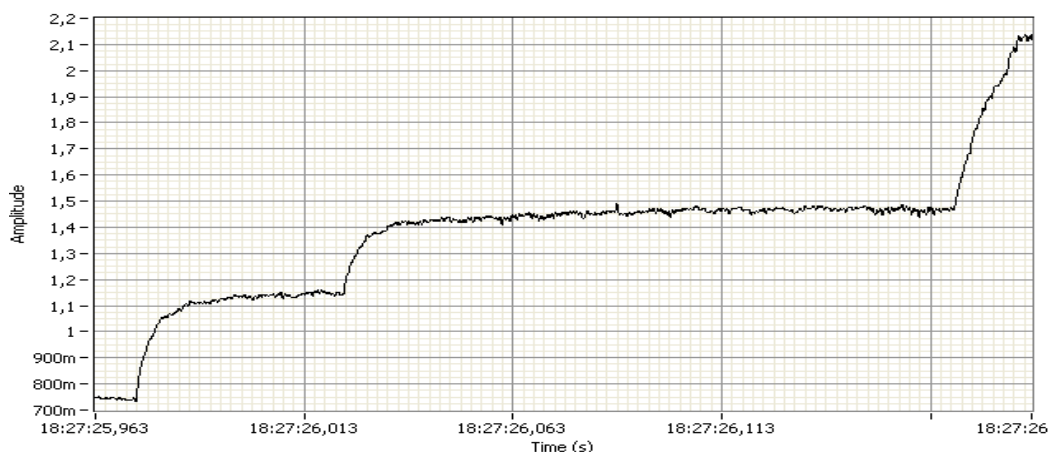
жимі експлуатації електровозу, було прийняте рішення вимірювати струм не на підстанції, а безпосередньо в силовому колі електровозу. На рисунку 3 показано зміну струму електровозу ВЛ8 при пуску і подальшому розгоні. Для налаштування релейного захисту визначальними будуть режими при яких струм найбільше змінюється за мінімальний час. З рисунку 3 видно, що найбільше зростання струму при розгоні відбувається на початку, в момент пуску. На рисунках 4, 5 показані інші режими з найбільшими комутаційними змінами струму.



**Рис. 3. Зміна струму електровозу при пуску**  
а) загальний струм при розгоні; б) фронт зміни струму при пуску



**Рис. 4. Струм при переключенні схеми з'єднання з «С» на «СП»**



**Рис. 5. Струм при переключенні схеми з'єднання з «СП» на «П»**

Для приведення числових значень до величини струму в амперах, необхідно амплітуду помножити на 1000. Знайдемо збільшення струму для трьох інтервалів часу:

- 1) для інтервалу часу 2 мс, який використовується в захисті по швидкості зростання струму;
- 2) для інтервалу близького до сталої часу кола к.з. з максимальним зростанням струму;

3) для інтервалу перехідного процесу переключення схеми з'єднання тягових двигунів. Характерні інтервали часу і відповідні зміни струму для різних схем переключень представлені в табл. 2.

Таблиця 2

**Збільшення струму за різні інтервали часу при різних схемах з'єднань тягових двигунів**

Режим роботи	Початковий струм, А	Інтервал 1		Інтервал 2		Інтервал 3	
		час, с	струм, А	час, с	струм, А	час, с	струм, А
Пуск	0	0,002	100	0,02	260	0,06	300
Перехід з «С» на «СП»	300	0,002	140	0,05	600	0,32	1050
Перехід з «СП» на «П»	750	0,002	180	0,02	650	0,22	1460
К.з в кінці лінії без навантаження	0	0,002	400	0,02	2800	0,22	4706
К.з. в кінці лінії з навантаженням	750	0,002	341	0,02	2353	0,22	3956

Як видно з таблиці, найбільші швидкості зміни струму виникають при груповому переключенні тягових двигунів зі схеми «СП» на «П». Крім того, при цьому режимі найбільший попередній струм, який зменшує приріст струму при короткому замиканні. Як зазначено в [3], для тягової мережі М120+МФ100+Р65 пропонується вибирати час вимірювання  $0,2 \div 0,25$  с. В цей інтервал як раз попадає найбільша зміна струму при переході зі схеми «СП» на «П». Для відстроювання від хибних відключень необхідно вибирати струмову уставку значно більшу за 1460 А, тому що на дільниці ймовірно знаходження й інших електровозів. Але, як зазначалося вище, необхідно відключати струми на початку виникнення к.з.

Традиційно, для спрощення, струм уставок к.з., а потім і всі перевірки, розраховуються для сталого режиму. Через це вибирають час вимірювання при якому струм к.з. досягне свого розрахованого значення. Для зменшення струму, на який буде реагувати захист, треба зменшувати час вимірювання. Струм к.з. змінюється в часі по закону, який близький до експоненційного. Мікропроцесорні захисти дозволяють з великою точністю вимірювати збільшення струму за малі проміжки часу. Якщо прийняти, що час вимірювання буде рівний постійній часу кола короткого замикання, то розрахунок значно спрощується. Для  $t=T_k$  вираз формули (1) прийме вигляд:

$$(1 - e^{-t/T_k}) = (1 - e^{-1}) = 1 - 0,368 = 0,632 \quad (2)$$

По значенням таблиці 2 знайдемо чутливість захисту. Для  $t=0,22$  відношення  $I_{кз}/I_{нав} = 2,7$ , а для  $t=0,02$ ,  $I_{кз}/I_{нав} = 3,6$ . Таким чином, використовуючи для визначення зміни струму менший час вимірювання, збільшується чутливість захисту.

Треба відзначити, що захист по збільшенню струму у різних виробників не однаковий. В ЦЗАФ-3,3 час вимірювання можна виставляти від 1 до 990 мс з інтервалом 10 мс, який достатньо великий і може вносити похибки між розрахунками і реальною роботою захисту. Мікропроцесорний захист МРЗС дозволяє програмувати час від 0 до 500 мс з інтервалом 1мс. Крім цього в ЦЗАФ-3,3, через коефіцієнт адаптації, є можливість зміни струму уставки в залежності від попереднього навантаження.

### **Висновки**

На залізницях України, електрифікованих постійним струмом, широкого розповсюдження набули сучасні комплекти мікропроцесорного захисту контактної мережі від коротких замикань, які містять у собі декілька струмових захистів. На окремих ділянках максимальний струмовий захист не завжди може відрізнити нормальний від аварійного режиму. Досвід експлуатації показав велику кількість хибних спрацьовувань захисту по швидкості наростання струму насамперед через відриви струмоприймача та проїзд ізолюючих сполучень під навантаженням. Існуюча методика налаштування захисту по збільшенню струму містить складні і неоднозначні розрахунки уставок, і на практиці він майже не використовується.

Проведений аналіз перехідних процесів показав, що найбільша зміна струму при нормальній експлуатації виникає при переключенні тягових двигунів зі схеми з'єднання «СП» на «П». Пропонований інструкцією час вимірювання струму  $0,1 \div 0,6$  с є великим. Зменшення часу виміру струму до 0,02 с підвищує чутливість захисту. Для спрощення розрахунку можна приймати час вимірювання рівний постійній часу кола короткого замикання.

### **Список літератури**

1. Устройство цифровых защит и автоматики фидеров ЦЗАФ-3,3. Руководство по эксплуатации 1СР.251.208-01РЭ. С-Петербург, Издательство НИИЭФА-ЭНЕРГО, 2005 г., 74 с.
2. Фигурнов Е.П. Релейная защита: Учебник. В 2ч. Ч.2. 3-е изд. Перераб. И доп. [Текст] / Е.П. Фигурнов.-М.:ГОУ

«Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009.-604 с.

3. Инструкция по выбору уставок защит терминала ЦЗАФ-3,3. (дополнение к части 1-ой «Руководящих материалов по релейной защите систем тягового электроснабжения», ЦЭ ОАО «РЖД», 2005 г)-М., 2009.-51 с.

4. Инструкция о порядке расчета и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока, 2012.-96 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Гетьманом Г.К.*

УДК 621.316.722.076.12

**Ф.П. Шкрабець, д-р техн. наук, Ю.В. Куваєв, О.В. Остапчук, канд. техн. наук.**

*(Україна, Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")*

### ПІДТРИМКА РІВНЯ РОБОЧОЇ НАПРУГИ ЗА РАХУНОК СИСТЕМИ ПОДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

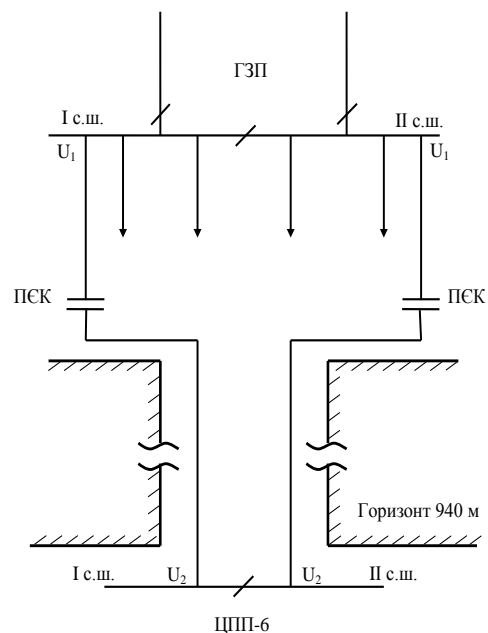
**Вступ.** Останнім часом у гірничий промисловості України спостерігається тенденція збільшення глибини виймання корисних копалин та пов'язаного з цим розвитку гірничих виробок. Збільшення загальної довжини виробок призводить до розгалуження підземної мережі та збільшенням електричних втрат, а також збільшенню рівня відхилень напруги у споживачів глибоких горизонтів. Отже вибір найбільш вдалих технічних рішень для підземної системи електропостачання гірничих підприємств з метою забезпечення відповідних показників якості електричної енергії у споживачів є досить актуальним.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним з варіантів забезпечення необхідних показників якості є збільшення перетину стовбурних кабелів, підвищення рівня напруги розподільної мережі та застосування пристроїв подовжньої компенсації [1]. При застосуванні першого способу мається на увазі збільшення кількості кабелів живлення та їх перетину до максимального значення (для стаціонарних установок 185 мм<sup>2</sup>, для пересувних – 95 мм<sup>2</sup>). Проте такий захід призводить до збільшення витрат кольорового металу та загального здорожчання мережі. Крім того кількість кабелів регламентується об'ємом шахтного стовбура, що знижує ефективність використання розглянутого технічного рішення. Другий спосіб можна використовувати при можливості технічного переоснащення електрообладнання на новий клас напруги. Також відповідний захід потребує значних капіталовкладень та наявності електрообладнання відповідного виконання [2]. Для глибоких горизонтів доцільно використовувати пристрої подовжньої компенсації [3]. Перші спроби використання даного способу були розглянуті ще в [4], але не було досліджено вплив сучасних конденсаторних установок на роботу приймачів електричної енергії в умовах глибоких шахт.

**Метою роботи** є дослідження впливу засобів подовжньо-ємнісної компенсації (ПЄК) на роботу споживачів глибоких горизонтів та розробка методики їх розрахунку.

**Матеріали досліджень.** В умовах гірничих підприємств, окремі приводи яких мають різкозмінне навантаження, тому доцільно використовувати ПЄК, яка забезпечується включенням послідовно до живильної лінії конденсаторної установки. Опір ємності конденсаторів компенсує (частково або повністю) або навіть перекомпенсує індуктивний опір лінії, внаслідок чого в ній зменшується втрата напруги. Схема електропостачання глибокого горизонту з використанням установки ПЄК приведена на рис. 1.

Значення добавки напруги, створюване послідовно включеними конденсаторами, пропорційне значенню струму навантаження і змінюється автоматично в залежності від струму, практично безінерційно.



**Рис. 1 – Електропостачання глибокого горизонту з установкою ПЄК**