

УДК 621.311

**В. Ф. Сивокобиленко, д-р. техн. наук, проф.;** **В. К. Лебедєв, канд. техн. наук, доц.;**  
**О. В. Ковязін, асп.**

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ У МЕРЕЖАХ 6—10 кВ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛІЮ

Розглянуто питання обмеження перенапруг в мережі 6—10 кВ з використанням таких засобів як обмежувачі перенапруг і низьковольтні заземлення нейтралі. Встановлено, що найефективнішим є застосування обмежувачів перенапруг спільно із заземленням нейтралі через резистор. Це дозволяє знизити перенапруги до  $2,5U_{\phi}$  замість  $4U_{\phi}$  без застосування зазначених засобів.

### Вступ

Останнім часом актуальним є питання зменшення негативного впливу на електрообладнання короточасних перенапруг, що виникають в електричних мережах 6—10 кВ з ізолюваною нейтраллю. Зазвичай, джерелами цих перенапруг є дугові однофазні замикання на землю (ДОЗЗ), а також комутації високовольтних вакуумних вимикачів. Вплив перенапруг, спричинених ДОЗЗ, погіршує ізоляцію підключеного до мережі електрообладнання, тим самим зменшуючи його термін експлуатації і збільшуючи ймовірність появи міжфазних коротких замикань (КЗ). Найчастіше пошкоджуються електродвигуни та кабелі, які мають менші запаси електричної міцності. Крім того, вплив перенапруг може також призвести до виходу з ладу самих електроживильних установок, таких як трансформатор власних потреб (ТВП) та ін. Однак, незважаючи на те, що перенапруги завдають великої шкоди для електроустановок, до цих пір не розроблений ефективний спосіб їх обмеження. Найпоширеніші способи, відомі на сьогоднішній день, це: установлення на фідерах обмежувачів перенапруг (ОПН), заземлення нейтралі мережі через високовольтний резистор, заземлення нейтралі мережі через низьковольтний резистор, підключений в розімкнутий трикутник нейтралеутворюючого трансформатора [1]. Через складність проведення натурних експериментів для визначення найефективнішого способу обмеження перенапруг, які виникають під час ДОЗЗ в мережі 6—10 кВ, авторами статті розроблено метод математичного моделювання. При цьому враховується також електродвигуни з кабелем, приєднувальний трансформатор з резистором, ОПН багаторазового спрацьовування з урахуванням виділеної в ньому теплової енергії.

### Матеріали дослідження

Принципова схема мережі 6—10 кВ для моделювання показана на рис. 1. Основні елементи схеми: нижча обмотка трансформатора електроживлення, ОПН, кабель фідера КЛ, на якому моделюється замикання на землю і двигун Д, ємність мережі на землю  $C_{\Sigma}$  і опір ізоляції  $R_{i3}$ . Заступна схема такої мережі містить активні й індуктивні опори елементів, а також ємнісний і активний опори ізоляції мережі. З метою автоматизації формування математичної моделі електричної системи використовується її граф і матрично-векторний запис законів Ома і Кірхгофа [2].

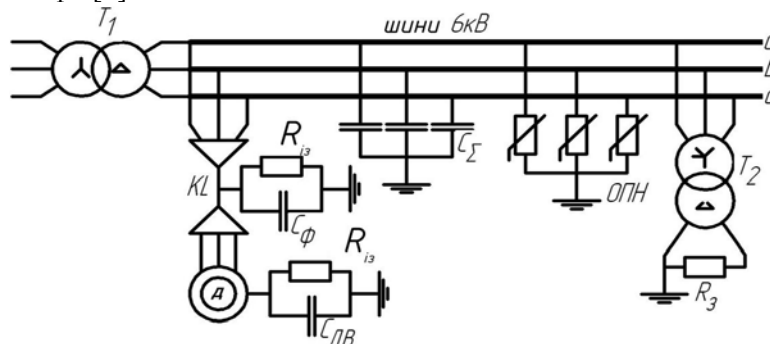


Рис. 1. Трифазна заступна схема мережі 6—10 кВ для моделювання ДОЗЗ

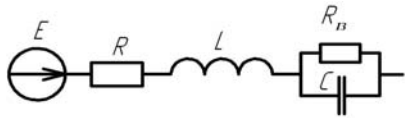


Рис. 2. Узагальнена вітка заступної схеми

Заступну схему кожного з елементів схеми зобразимо узагальненою віткою (рис. 2) з послідовно-паралельним з'єднанням її  $R, L, C$ -елементів, які враховують опір самого елемента ( $R, L$ ) і його ізоляції на землю ( $C, R_{is}$ ).

Для аналізу перехідних процесів, будемо використовувати дискретну математичну модель електричної схеми, яка базується на заміні похідних у вихідних диференціальних рівняннях моделі їх кінцевими різницями першого, другого або більш високих порядків. Таку заміну похідних виконують шляхом використання так званих формул диференціювання назад (ФДН), оскільки тут похідна функції в  $(k + 1)$ -й точці апроксимується по  $p + 1$  значенню цієї функції в попередніх точках [3]:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{k+1} = -\frac{1}{h} \sum_{s=0}^p a_s \cdot y_{k+1-s}, \quad (1)$$

де  $a_s$  – постійні коефіцієнти, які наприклад, для методу ФДН другого порядку ( $p = 2$ ) відповідно дорівнюють:  $a_0 = 1,5, a_1 = -2, a_2 = 0,5$ .

Для заданої схеми з урахуванням рис. 2 і (1) на кожному часовому кроці розрахунку  $h$  будемо проводити розрахунок матриць миттєвих дискретних значень опорів і векторів еквівалентних ЕРС віток, які відповідно для  $n$ -ї вітки дорівнює:

$$Z_n = R_n + \frac{a_0}{h} L_n + \frac{h R C_n}{a_0 R C_n C_n + h}; \quad (2)$$

$$E_{ekvn}^k = \frac{L_n}{h} \cdot \sum_{s=1}^p a_s \cdot i^{(k+1-s)} - \frac{1}{a_0 + \frac{h}{R C_n C_n}} \cdot \sum_{s=1}^p a_s \cdot u_c^{(k+1-s)}, \quad (3)$$

де  $u_c$  та  $i$  – миттєві значення напруги на ємності та струму на  $k$ -му кроці розрахунку.

Використання виразів (2), (3) дозволяє виконувати розрахунок перехідного процесу на основі алгоритмів і методів розрахунку стаціонарних режимів. Наприклад, у разі використання методу вузлових напруг, рівняння для розрахунку виглядатимуть таким чином:

$$Y_{uzl} = M Z^{-1} M^T; \quad (4)$$

$$U_{uzl}(t) = Y_{uzl}^{-1} M Z^{-1} (e(t) - E_{ekv}); \quad (5)$$

$$U_v(t) = M^T U_{uzl}(t); \quad (6)$$

$$i(t) = Z^{-1} (e(t) - E_{ekv} - U_v(t)); \quad (7)$$

$$u_{c_n}^{(k+1)} = \frac{h R C_n i(t)^{(k+1)}}{a_0 R C_n C_n + h} - \frac{R C_n C_n}{a_0 R C_n C_n + h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot u_{cn}^{(k+1-s)}, \quad (8)$$

де  $M$  – матриця з'єднань віток у вузлах схеми;  $Y_{uzl}$  – матриця вузлових провідностей;  $e(t)$  – вектор ЕРС віток;  $U_{uzl}(t)$  – вектор вузлових напруг;  $U_v(t)$  – вектор напруг віток;  $i(t)$  – вектор струмів віток;  $Rc$  – опір ізоляції фаз відносно землі;  $C$  – ємність фаз відносно землі;  $h$  – крок диференціювання.

Перевага такого представлення моделі для аналізу перехідних процесів полягає в тому, що алгоритми розрахунку усталеного і перехідного процесів залишаються однаковими. Відмінність полягає у тому, що на кожному кроці розрахунку перехідного процесу необхідно оновлювати значення опору і ЕРС віток.

Дискретні моделі відрізняються високою стійкістю і для розглянутих процесів інші підходи не завжди дозволяють виконати розрахунок.

Нелінійна вольт-амперна характеристика ОПН апроксимована степеневою функцією (9)

$$U_{опн}(I_{опн}) = \alpha \cdot I_{опн}^\beta, \quad (9)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  – коефіцієнти нелінійного рівняння (9).

На основі формули (9) опір вітки з ОПН на кожному кроці розрахунку знаходиться як

$$R_{\text{опн}}(I_{\text{опн}}) = U^{(\beta-1)/\beta} \alpha^{1/\beta}. \quad (10)$$

Наведемо, як приклад, результати порівняння способів обмеження перенапруг в перехідних процесах під час ДОЗЗ (рис. 1). Параметри мережі: номінальна напруга мережі  $U_{\text{ном}} = 6$  кВ; сумарна ємність мережі  $C_{\Sigma} = 3$  мкФ; величина опору при низьковольтному заземленні нейтралі мережі через трансформатор  $R_{\text{н}} = 20$  Ом (обрана з умови рівності активного і ємнісного струмів ОЗЗ). Параметри трансформатора для підключення низьковольтного резистора: номінальна напруга  $U_{\text{ном}} = 6/0,4$  кВ; номінальна потужність  $S_{\text{н}} = 10$  кВА. Методики вибору значення високовольтного і низьковольтного резисторів, а також розрахунку параметрів трансформатора описані в [1]. Для моделювання ОПН приймалася ВАХ заводу «Таврида Електрик» стосовно ОПН-КР / TEL-6/6.0 УХЛ 2. Ця характеристика та її апроксимація по (9) з коефіцієнтами  $\alpha = 1,87$  і  $\beta = 0,082$  показані на рис. 3.

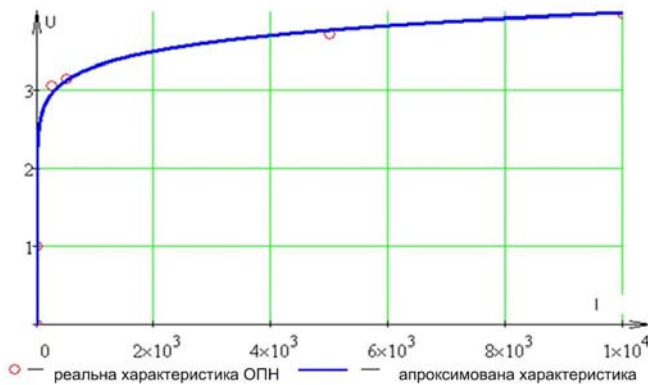


Рис. 3. Апроксимована вольт-амперна характеристика ОПН

Розрахункові осцилограми ДОЗЗ для мережі з ізолюваною нейтраллю за відсутності ОПН показані на рис. 4а. Дугове замикання виникає при максимумі фазної напруги, а згасання дуги — при проходженні струму високочастотної складової через нуль. У кожному наступному запалюванні дуги перенапруги на фазах зростають через відсутність шляху розряду ємності мережі. У разі чотириразового послідовного запалювання дуги перенапруги можуть досягати п'ятикратної амплітуди фазної напруги  $5U_{\text{фном}}$ .

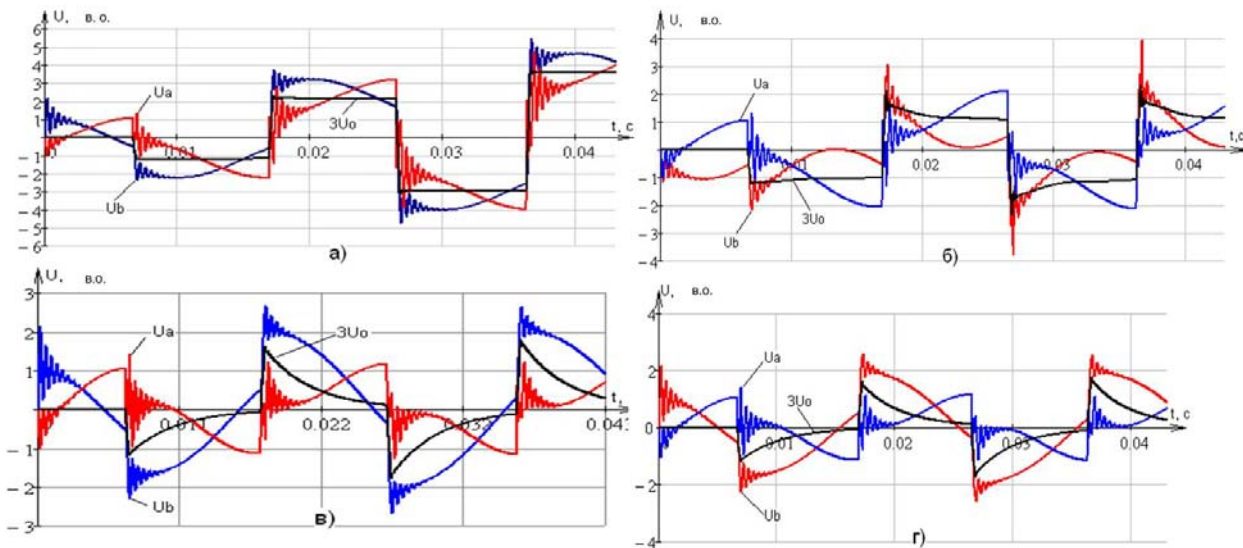


Рис. 4. Осцилограми фазних напруг під час ДОЗЗ при переході струму високочастотної частоти через нуль: а — без обмеження перенапруг; б — з установкою ОПН; в — з підключенням низьковольтного резистора; г — зі спільним підключенням ОПН і низьковольтного заземлення нейтралі

Результати розрахунку такого ж режиму за наявності ОПН в мережі показані на рис. 4б. Найбільша кратність амплітуди фазної напруги при цьому складає не більше  $4U_{\text{фном}}$ . Як впливає з наведених даних ефективність ОПН не дуже висока для випадків, коли гасіння дуги відбувається через нуль високочастотної складової струму, що пов'язано з тим, що ємності не встигають розрядитись через опір ОПН в повній мірі.

У разі заземлення нейтралі мережі через низьковольтний резистор (ОПН відсутній) максимальна кратність перенапруги, як це впливає з рис. 4в, не перевищує  $2,8U_{\text{фном}}$ . Ще більше

зменшення перенапруг можна домогтися, включивши ОПН із заземленою нейтраллю через резистор (рис. 4г). У такому випадку перенапруги не перевищують  $2,65U_{\text{фном}}$ .

На рис. 5а–г показані осцилограми процесів ДОЗЗ, що виникають на максимумі фазної напруги, а згасання дуги — при проходженні струму промислової частоти через нуль. Як впливає з рис. 5а, в мережі без встановлених засобів обмеження перенапруги досягають  $3,6U_{\text{фном}}$ , це пояснюється тим, що за час між згасанням дуги і черговим пробоем заряд, який накопився в ємностях встигає частково розрядитися. У мережі без резистивного заземлення до встановлених ОПН (рис. 5б) перенапруги можуть досягати  $3,27U_{\text{фном}}$ , що підтверджує недостатню ефективність ОПН.

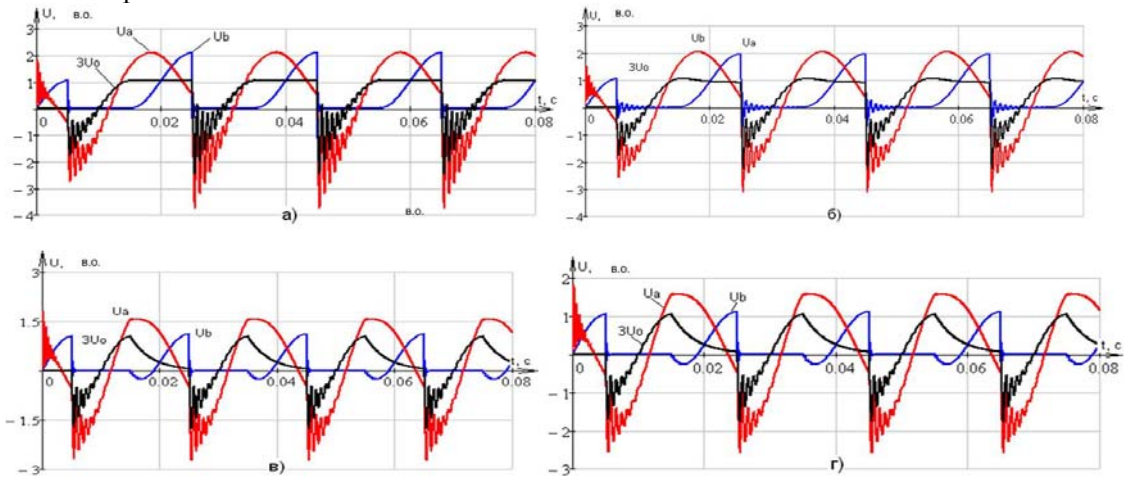


Рис. 5. Осцилограми фазних напруг при ДОЗЗ при переході струму промислової частоти через нуль: а — без обмеження перенапруг; б — з установкою ОПН; в — з підключенням низьковольтного резистора; г — зі спільним підключенням ОПН і низьковольтного заземлення нейтралі

Моделюючи ДОЗЗ для мережі із заземленою нейтраллю через резистор (рис. 5в), рівні перенапруг досягають  $2,75U_{\text{фном}}$ .

На рис. 5г зображені осцилограми перенапруг ДОЗЗ з установкою ОПН та заземлення нейтралі мережі за допомогою резистора. Такий спосіб є найефективнішим, оскільки перенапруги не перевищують  $2,55U_{\text{фном}}$ .

Моделювання ДОЗЗ показало також, що за відсутності резистора в нейтралі мережі і тривалому ДОЗЗ, що виділяється ОПН, енергія перевищує допустиме значення.

### Висновки

1. Розроблено математичну модель мережі 6–10 кВ, яка дозволяє вибрати найефективніший спосіб обмеження перенапруг, а також перевірити ОПН на термостійкість.
2. В процесі моделювання дугових однофазних замикань на землю встановлено, що найефективнішим є застосування обмежувачів перенапруг спільно із заземленням нейтралі через резистор. Це дозволяє знизити перенапруги до  $2,5U_{\text{ном}}$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях на землю / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, А. В. Ковязин, Р. П. Сердюков [и др.] // Сб. научн. тр. ДонГТУ : серия: электротехника и энергетика. — Выпуск 9 (158). — Донецк, 2009. — С. 211—220.
2. Сивокобыленко В. Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев. — Донецк, 2002. — 134 с.
3. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики / В. С. Перхач. — Львов. : Вища школа, 1982. — 378 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11

Рекомендована до друку 24.12.11

**Сивокобыленко Віталій Федорович** — завідувач кафедри, **Лебедев Віктор Костянтинович** — доцент, **Ковязін Олексій Вікторович** — аспірант.

Кафедра електричних станцій, Донецький національний технічний університет, Донецьк