

- може використовуватись інженерами, які працюють в експлуатації електроенергетичних систем, проектних інститутах, науковими працівникам та студентам вищих навчальних закладів електроенергетичних спеціальностей.

1. *The Electricity Council, 1981, IEE: Power System Protection 2 – System and Methods, pg. 86; Published by Peter Peregrinus Ltd., Stevenhage, UK.* 2. *Omicron Electronics Corp.: CMC Software User's Manual, chapter Distance relays.*

**УДК 621.314:621.316**

**З.М. Бахор, Б.І. Дурняк, А.Я. Яцейко, Р.А. Похна**  
 Національний університет “Львівська політехніка”,  
 кафедра електричних мереж та систем

## **ПЕРЕНАПРУГИ ПІД ЧАС ВИМКНЕННЯ ДВИГУНІВ**

© Бахор З.М., Дурняк Б.І., Яцейко А.Я., Похна Р.А., 2003

**Наведено результати дослідження кратностей комутаційних перенапруг на двигуні 250 кВт за різної довжини кабелю живлення і режиму роботи електромережі.**

**Shown results of experiments with switching overvoltage ratio on the engines with 250kWt for different lengths of feeding cable and operational modes in electrical network.**

### **Постановка проблеми**

Для мереж 6–35 кВ з ізольованою чи резонансно-заземленою нейтраллю властивими є внутрішні перенапруги – комутаційні, ферорезонансні, під час замикання фази на землю. Ці перенапруги є небажаними як за частотою виникнення, так і кратністю, а в деяких випадках і небезпечними, бо рівень перенапруги в мережі перевищує випробувальну напругу ізоляції електрообладнання. Комутаційні перенапруги супроводжують технологічні та аварійні перемикання в мережах. Здебільшого такі перемикання не приводять до перенапруг значних кратностей, але під час деяких комутаційних процесів, наприклад, увімкнення та вимкнення ненавантажених ліній, вимкнення ненавантажених трансформаторів, увімкнення та вимкнення двигунів тощо, виникають перенапруги значних кратностей, які можуть перевищувати перенапруги від замикання фази на землю та ферорезонансні [1, 2].

У статті наведено результати дослідження комутаційних перенапруг під час нормального та аварійного вимкнення двигунів 6 кВ. Ізоляція високовольтних двигунів розрахована на менші допустимі кратності внутрішніх перенапруг, ніж електрообладнання з нормальною та полегшеною ізоляцією. Так, якщо допустима кратність внутрішніх перенапруг для електрообладнання з полегшеною ізоляцією лежить в межах 4,2–5,2 відносно найбільшої робочої фазної напруги, то для ізоляції високовольтних електро-двигунів вона становить – 2,2–2,4 [1]. Ізоляція високовольтних двигунів є найвразливішим елементом стосовно внутрішніх перенапруг, тому дослідження рівня перенапруг у мережах з високовольтними двигунами заслуговує на увагу.

### Аналіз останніх досліджень

Необхідно відмітити, що на сьогодні в літературі досить широко висвітлені питання, які стосуються максимальних кратностей перенапруг під час увімкнення та вимкнення двигунів; математичним моделям мережі, двигунів, вимикачів; особливостям комутацій вакуумними вимикачами; питанню обмеження перенапруг ОПН-ами. Досить вдало і повно ці питання висвітлені у [1, 2].

Результати дослідження, описані в статті, доповнюють існуючі стосовно впливу довжини кабелю живлення двигуна на комутаційні перенапруги під час нормального та аварійного вимкнення двигуна.

### Задачі дослідження

Вимкнення двигунів супроводжується комутаційними перенапругами в мережі, рівень яких залежить від деяких факторів: напруги живлення мережі, комутаційних властивостей вимикача, параметрів мережі – фазних та міжфазних ємностей, стану ізоляції, налаштування компенсуючої котушки, наявності в мережі ТНКІ тощо. Вирішення питань вибору моделей об'єктів мережі, врахування тих чи інших факторів є першочерговими для задач – дослідження рівня перенапруг у мережі під час нормального та аварійного вимкнення двигуна та впливу довжини кабелю живлення двигуна на кратність перенапруг.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження комутаційних перенапруг під час вимкнення двигунів 6 кВ виконано на цифровому комплексі [3] для схеми мережі, зображеної на рис. 1. Від секції шин (1СШ) живиться мережа 6 кВ з ємнісним струмом замикання на землю 54 А, яка на схемі показана еквівалентною кабельною лінією КЛ2 та загальним навантаженням Н. Окремо виділено навантаження – високовольтний двигун Д (250 кВт, 6 кВ), який кабельною лінією КЛ1 через вимикач В під'єднаний до секції шин генераторної напруги станції. До шин під'єднаний трансформатор Т1, в нейтраль обмоток ВН якого увімкнена дугогасильна компенсуюча котушка КК системи Петерсена з дискретним регулюванням. Мережа працює з перекомпенсацією. Степінь розлаштування компенсації ємнісного струму замикання на землю становить 8,3 %. Шини 1СШ живляться від шин генераторної напруги станції 2СШ, які мають зв'язок з мережею 110 кВ через трансформатор Т2. До шин 2СШ під'єднано трансформатор напруги контролю ізоляції ТН.

Мережа, яка живиться від шин 6 кВ, під час комп'ютерного дослідження була подана еквівалентними міжфазними ємностями та ємностями фаз на землю. Кабель, по якому живиться електродвигун моделювався ланками, параметри яких визначалися з розрахунку 10–40 м кабельної лінії, залежно від її довжини, на ланку. Перехідний процес під час вимкнення двигуна супроводжується високочастотними коливаннями між ємністю кабелю та індуктивністю двигуна. Як показали дослідження, частота цих коливань становить приблизно 4000 Гц, що вимагає врахування поверхневого ефекту у струмопроводах – кабелі та двигуні. Збільшення активного опору струмопроводів за рахунок поверхневого ефекту виконане згідно з рекомендаціями, наведеними у [4], і призводить до зменшення перенапруг. На рівень перенапруг не впливає опір ізоляції кабельної лінії до двигуна, якщо значення  $\operatorname{tg}\delta$  ізоляції кабелю не знижується менше 0,0025.

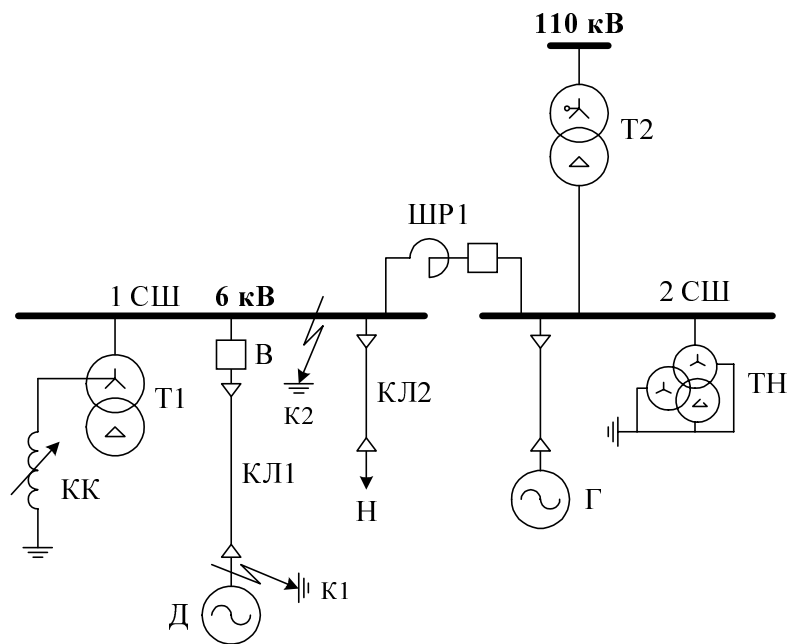


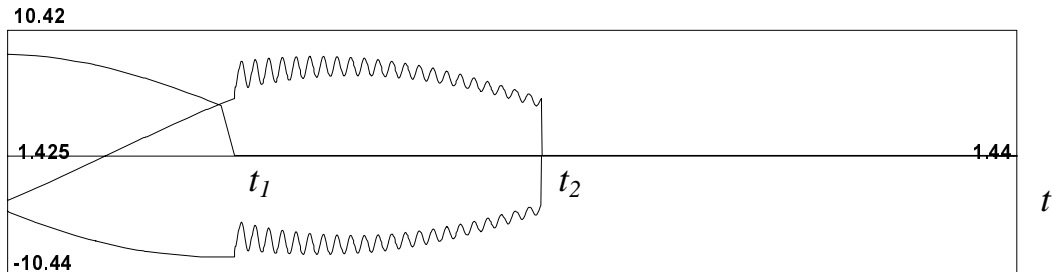
Рис. 1. Схема мережі

Комутаційні перенапруги, їх кратність під час вимкнення двигуна суттєво залежать від параметрів двигуна, його навантаження, довжини кабельної лінії між двигуном та вимикачем, комутаційних властивостей вимикача – його здатності зрізати струм до нульового значення, швидко відновлювати міжконтактний проміжок, гасити дугу високочастотного струму перехідного процесу. Як правило, всі типи вимикачів, окрім вакуумних, обривають струм у момент його проходження через нуль. Вакуумним вимикачам властивий процес вимкнення зі зрізами струму, що призводить до виникнення комутаційних перенапруг. Збільшення величини зрізу струму супроводжується зростанням рівня перенапруг.

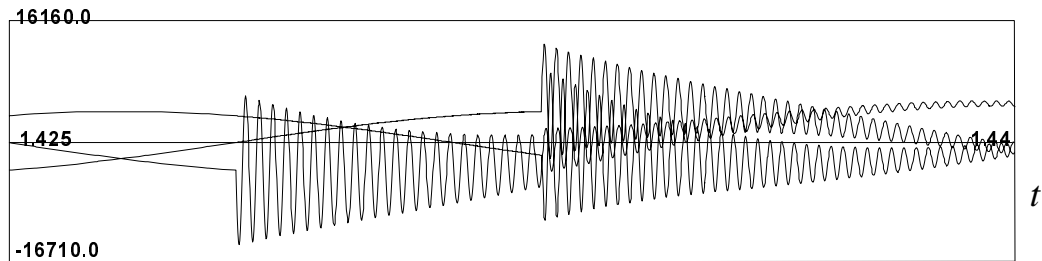
Одним з важливих під час дослідження було питання вибору моделі вимикача. Найбільш коректною стосовно виникнення комутаційних перенапруг під час вимкнення електродвигунів є модель вимикача [2], згідно з якою: швидкість наростання діелектричної міцності міжконтактного проміжку  $dU/dt$  з моменту першого переривання струму приймається постійною; перше переривання (зріз) струму до його “природного” нульового значення вважається можливим при заданому миттєвому значенні струму ( $i_{zp}$ ) через вимикач; при виникненні першого та наступного пробиття міжконтактного проміжку вважається можливим згасання високочастотного струму під час його переходу через «нуль» зі швидкістю  $di/dt$  не вище заданої. Були прийняті такі діапазони зміни параметрів:  $20 < dU/dt < 60$  кВ/мс,  $0 < i_{zp} < 5$  А,  $50 < di/dt < 100$  А/мкс. Ці параметри характерні для вакуумних вимикачів і їх врахування дозволило отримати наведені нижче кратності перенапруг.

Моделювання процесу вимкнення вимикачем струму двигуна виконане у такій послідовності. Для всіх фаз вимикача задавався час вимкнення (час розходження контактів вимикача) та величина струму зрізу 5 А. Якщо після вказаного часу струм двигуна через контакти вимикача досягав значення 5 А, то він приймав значення, яке дорівнює нулю – вимикалася одна фаза вимикача ( $t_1$ ), а потім дві інші ( $t_2$ ), що можна побачити на рис. 2, або вимикалася друга фаза вимикача ( $t_2$ ), а потім третя ( $t_3$ ) у разі замикання фази на землю біля двигуна, (рис. 3). На кабелі живлення двигуна та самому двигуні як в одному, так і в

другому випадку виникають перенапруги. При цьому відслідковувалася швидкість наростання напруги відновлення на контактах вимикача. Якщо вона перевищувала 60 кВ/мс, то наставало пробиття міжконтактного проміжку вимикача і струм двигуна продовжував протікати через фазу вимикача.

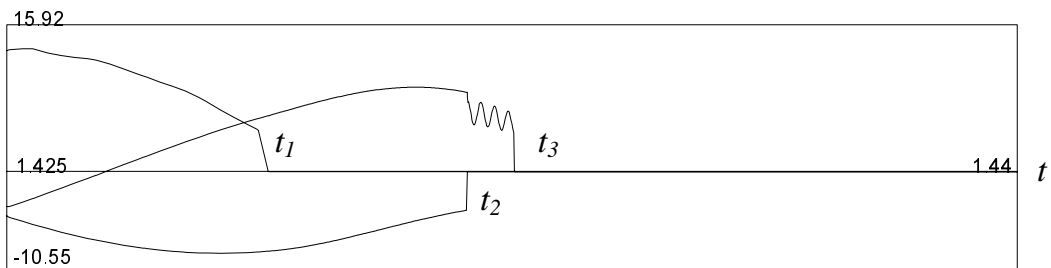


а

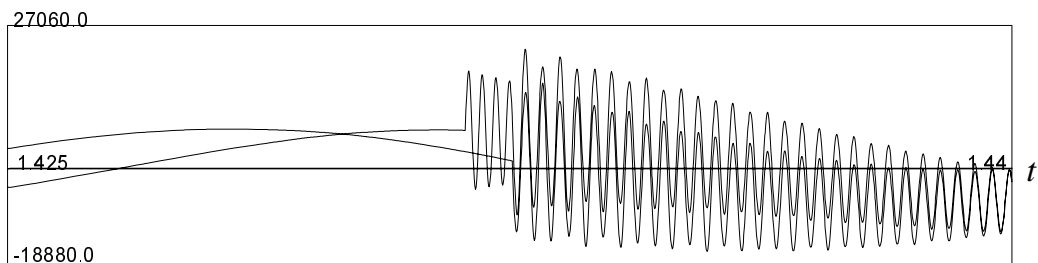


б

Рис. 2. Координати режиму під час вимкнення двигуна при нормальній роботі мережі:  
а – струми вимикача; б – фазні напруги на двигуні



а



б

Рис. 3. Координати режиму під час вимкнення двигуна та замикання фази на землю біля двигуна:  
а – струми вимикача; б – напруги на двигуні

### Результати дослідження

Дослідження вимкнення двигуна виконано для таких умов: при нормальному режимі роботи мережі; на виводах двигуна або у самому двигуні виникло замикання фази на землю; в мережі, приєднаній до шин існує тривале замикання фази на землю. Вимкнення виконувалися під час номінального навантаження двигуна, відсутності навантаження на його валу та проміжних значеннях навантаження двигуна.

Під час нормального режиму роботи мережі процес вимкнення двигуна супроводжується перенапругами, рівень яких знижується зі збільшенням довжини кабелю живлення двигуна і збільшується зі зниженням навантаження на валу двигуна. Так, при зміні довжини кабелю з 40 до 400 м і збільшенні навантаження з нуля (неробочий режим двигуна) до номінального, кратність перенапруг на двигуні та кабелі його живлення знизилася з 3,28 до 1,53. На рис. 4, а показано зміну середнього арифметичного значення кратностей перенапруг (відносно амплітуди робочої фазної напруги) на двигуні від довжини його кабелю живлення під час вимкнення двигуна, який працює з номінальним навантаженням на валу (1) та без навантаження (2). Середнє квадратичне відхилення оцінки кратностей перенапруг не перевищувало 0,05 для номінального навантаження та 0,15 для ненавантаженого двигуна.

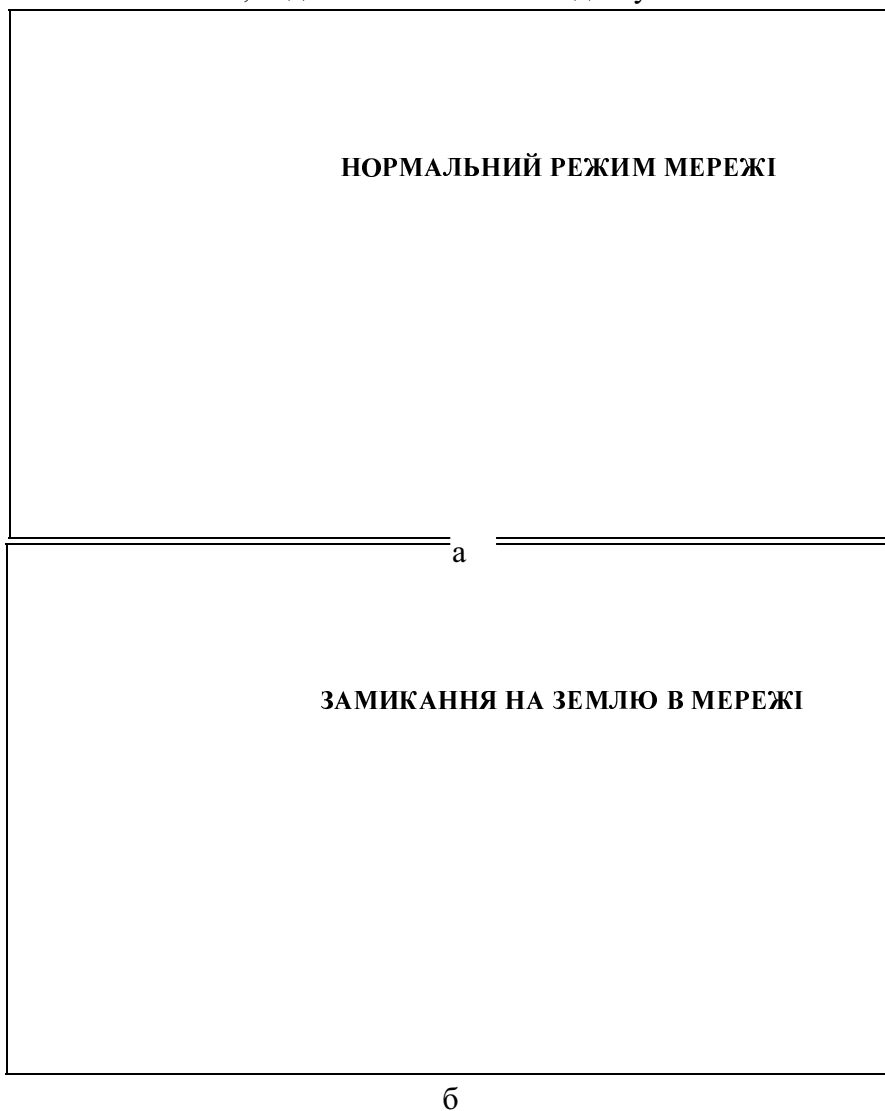


Рис. 4. Кратність перенапруг під час вимкнення двигуна

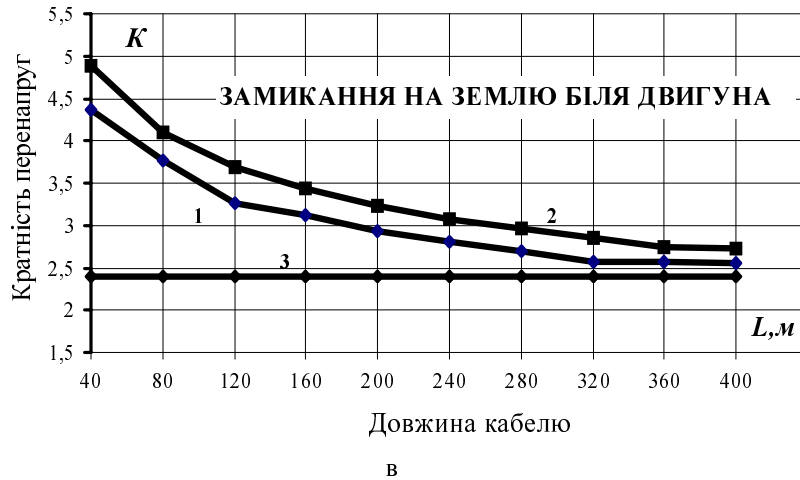


Рис. 4. Кратність перенапруг під час вимкнення двигуна (продовження)

Кратність перенапруг, яка виникала під час вимкнення двигуна, за певної довжини кабелю живлення, його параметрах (ємностях та провідностях) перевищувала допустиму кратність внутрішніх перенапруг для електродвигунів (3). З показаних на рис. 4, а залежностей видно, що під час вимкнення ненавантаженого двигуна небезпечні для його ізоляції перенапруги мають більшу кратність та виникають у ширшому діапазоні ємностей кабелю, ніж за номінального навантаження.

У мережах 6 кВ замикання фази на землю виникають досить часто і можуть тривати до декількох годин. Оскільки замикання тої чи іншої фази на землю в мережі має випадковий характер, то під час дослідження рівня комутаційних перенапруг розглядалося вимкнення двигуна при замиканні на землю кожної з фаз мережі. Замикання фази на землю в мережі під час дослідження розглядалося як тривале металеве замикання. Вимкнення двигуна під час роботи мережі з замиканням фази на землю зі сторони мережі К2 (рис. 1) супроводжувалося перенапругами більшої кратності (рис. 4, б), ніж вимкнення двигуна під час нормальної роботи мережі. Отримані максимальні кратності перенапруг на двигуні не перевищували 3,83 при номінальному його навантаженні та 4,13 – під час неробочого режиму двигуна. Ще більший рівень перенапруг був отриманий під час вимкнення двигуна та замикання фази на землю біля самого двигуна К1 (рис. 1). Були отримані кратності перенапруг, які незалежно від навантаження двигуна перевищили 5.

На рис. 4, б та 4, в наведено зміну середнього арифметичного значення кратностей перенапруг на двигуні від довжини його кабелю живлення під час вимкнення двигуна, який працює з номінальним навантаженням на валу (1) та без навантаження (2), та замиканні фази на землю відповідно у мережі та біля двигуна. Найбільше середнє квадратичне відхилення оцінки кратностей перенапруг у обох випадках не перевищувало 0,25.

Якщо під час вимкнення двигуна в мережі чи біля двигуна є замикання фази на землю, то перенапруги, які супроводжують вимкнення, мають рівень, що перевищує допустиму кратність внутрішніх перенапруг для електродвигунів (3) в досить широкому діапазоні довжини кабелю живлення двигуна. А вимкнення двигуна під час замикання фази на землю біля двигуна супроводжується перенапругами, рівень яких співвимірний з

допустимою кратністю внутрішніх перенапруг для електрообладнання з полегшеною ізоляцією. Очевидно, що перенапруги у таких випадках є небезпечними не тільки для ізоляції двигуна, але й для ізоляції кабелю живлення.

### Висновки

1. Вимкнення двигуна потужністю 250 кВт вакуумним вимикачем супроводжується перенапругами, рівень яких значною мірою визначається параметрами кабелю живлення двигуна. При малих довжинах цього кабелю на двигуні можуть існувати комутаційні перенапруги, рівень яких буде перевищувати допустиму кратність внутрішніх перенапруг для електродвигунів. Максимальні значення перенапруг супроводжують вимкнення ненавантаженого двигуна.

2. Небезпечними своєю кратністю є перенапруги під час вимкнення двигуна та замикання фази на землю в мережі чи біля самого двигуна. Кратність перенапруг може перевищувати більше ніж у 2 рази допустиму кратність внутрішніх перенапруг для електродвигунів. Перенапруги під час вимкнення двигуна та замикання фази на землю біля двигуна своєю кратністю можуть бути небезпечними не тільки для ізоляції двигуна, але й для ізоляції кабелю його живлення.

3. Результати досліджень дають можливість для двигуна потужністю 250 кВт та кабелю його живлення оцінити можливий рівень перенапруг при застосуванні вакуумних вимикачів; необхідність встановлення ОПН та рівня обмеження перенапруг на двигуні.

*1. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Ф.А. Гиндуллин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М., 1989. – 192 с. 2. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). – СПб., 2000. – 114 с. 3. Равлик О.М., Гречин Т.М., Лисяк Г.М. Програмный комплекс для дослідження електротехнічних систем // Тез. доп. наук.-техн. конф. Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці. – Львів, 1995. – С. 79. 4. Варецький Ю.О., Равлик О.В., Бахор З.М. Особливості моделювання процесів при замиканнях фази на землю у мережах з ізольованою нейтраллю // Технічна електродинаміка. – 1994. – № 2. – С. 23–25.*