

Таблиця результатів розрахунку показників ефективності ВЕС

Кількість агрегатів, шт.	«Зелений» тариф, грн./кВт·г	Виробництво ел./ен., МВт·г/рік	Річний прибуток, млн. €	Термін окупності, роки
10	2,6238	106673	8,4	5,3

Отримані результати наближеної оцінки ефективності вітроелектростанції великої потужності є саме оцінкою, яка не може бути абсолютною через наближеність вихідних даних та оціночних експертних характеристик. Тут можна розглядати варіанти змін різноманітних складових з метою оптимізації витрат, що залежать, зокрема і від чинних нормативів та їх змін, при цьому прибуткова частина так само залежить від ринкових пропозицій виробників. Річний виробіток електроенергії розраховується на онові точних, гарантованих замірів і демонструє значну залежність прибутковості ВЕС від «зеленого» тарифу.

Висновки

Отримані результати для 10-агрегатної ВЕС показують незначні відмінності від опублікованих практичних результатів ВЕС «Старий Самбір-1» [4], що дозволяє зробити висновок про адекватність отриманих характеристик та можливість отримання реальних даних про вітрове навантаження визначеної ділянки з відкритих джерел інформації. Остаточною основою для прийняття технічного рішення для конкретної задачі має бути техніко-економічне обґрунтування будівництва реальної ВЕС, що і відповідає чинним нормативам. Отримані результати враховують новітні зміни у нормативній базі та наявний валютний курс і успішно корелюються з показниками реальної вітроелектростанції у подібних умовах [4, 5] і демонструють значну ефективність ВЕС у Карпатському регіоні України.

Одночасно слід зауважити, що визначальними показниками ефективності ВЕС у наведеній ситуації є здійснені та підтверджені заміри вітрових навантажень та наявність відповідного «зеленого» тарифу, що має «заохочувальну» величину та часові обмеження.

1. *Нові рекорди світової вітроенергетики, [Електронний ресурс]: http://www.uwea.com.ua/news.php?news_id=223.* 2. *У 2014 році українські ВЕС вдвічі збільшили виробництво електроенергії, [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://enref.org/news/u-2014-rotsi-ukrajinski-ves-vdvichi-zbilshyly-vyrobnnytstvo-elektroenerhiji/>.* 3. *Ефективність потужних ВЕС в Карпатському регіоні. Маврін О. І., Покровський К. Б., Олійник В. П., Яворський М. С. Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали Восьмої міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 2–3 квітня 2015): Зб. наук. Статей. - Львів: ЛьвДЦНП. – С. 148–150.* 4. *WPP “Stary Sambir-1” nature does nothing in vain. [Електронний ресурс]: Режим доступу: http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/USELF-2_Launch_Event_Kozytskyi_eng_140627.pdf.* 5. *Гольберт А. Е. "Выявление проблем интеграции ветроэлектростанций в электроэнергетическую систему Украины" – Доклад для круглого стола. «Новые вызовы, которые связаны с активным развитием альтернативной энергетики. Её место и роль в ОЭС Украины» – ежегодного форума «Топливо-энергетический комплекс Украины: настоящее и будущее» (с. 2–3). [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.proza.ru/2011/09/19/975>.* 6. *Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.*

УДК 621.311.001.57

О. М. Равлик, В. Я. Стецик

Національний університет “Львівська політехніка”,

МОДЕЛЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЛІНІЙ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ 750 кВ

© Равлик О. М., Стецик В. Я., 2016

Розроблені математична і цифрова моделі довгої лінії для дослідження комутаційних процесів із урахуванням їх основних параметрів, що забезпечує необхідну адекватність моделювання.

Ключові слова: *комутаційні процеси, математична модель, перенапруга, точність моделі, фазова швидкість.*

Mathematical and digital models to study the long line switching processes with regard to their basic parameters are developed, providing the required adequate modeling.

Key words: *switching processes, mathematical model, overvoltage, accuracy of model, phase velocity.*

Постановка проблеми

Лінії надвисокої напруги 750 кВ (ЛЕП НВН) виконують важливу системоутворювальну функцію в сучасній ОЕС України. За їх допомогою передається електрична енергія від потужних атомних електричних станцій у райони з дефіцитною генерацією, а також здійснюються міжсистемні перетоки потужності з метою забезпечення стабільної роботи ОЕС України. Під час експлуатації ЛЕП НВН наявні і планові (ввімкнення, відімкнення), і аварійні комутації (КЗ, АПВ). Під час комутації на ЛЕП НВН можуть виникати небезпечні рівні комутаційних перенапруг, які можуть бути причиною виходу з ладу лінійного чи підстанційного обладнання внаслідок пошкодження ізоляції.

Вихід з ладу ЛЕП НВН є недопустимим з погляду дотримання режиму ОЕС, а відновлення пошкоджених конструктивних елементів несе за собою значні економічні витрати та технічні труднощі. Тому комутаційні процеси та перенапруги, що їх супроводжують, висувають низку специфічних вимог до обладнання та його ізоляції, а безпечні показники роботи можна гарантувати лише на основі розрахунку якомога точніших математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень

Нині в Україні немає єдиного підходу до формування математичних моделей ліній 750 кВ, незважаючи на значну кількість публікацій. Актуальною залишається проблема з визначенням ступеня зосередженості параметрів моделі довгої лінії для забезпечення якомога точніших результатів моделювання комутаційних процесів. Також варто відзначити, що під час створення моделей ліній з розподіленими параметрами, доволі часто нехтують моделюванням поздовжніх та поперечних втрат у лінії, в такий спосіб збільшуючи похибку моделювання.

Найхарактернішим видом пошкодження на лініях 750 кВ слід вважати однофазне коротке замикання на землю, яке становить близько 96 % серед усіх видів КЗ. Ліквідація такого виду пошкодження лінії супроводжується цілою серією комутацій, під час яких максимальні значення кратності перенапруг можуть сягати значень порядку 3–3,6 U_{ϕ} . Варто зазначити, що навіть під час планового вмикання лінії на неробочий хід кратність перенапруги може сягати значення 2 U_{ϕ} [1].

Задачі і результати досліджень

Метою дослідження є створення математичної моделі ЛЕП НВН 750 кВ, яка дасть змогу відобразити максимально точні результати розрахунку комутаційних процесів. Для проведення досліджень ЛЕП НВН було обрано лінію 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська”.

Структурна схема моделі ЛЕП НВН об’єднує в себе прилеглі електроенергетичні системи, шунтувальні реактори, встановлені по кінцях лінії та схему самої ЛЕП з врахуванням місць транспозиції фазних проводів по довжині лінії (рис. 1).

У довгій лінії індуктивності, ємності, резистивні опори рівномірно розподілені по всій довжині. Струм та напруга на виході скільки завгодно малої ділянки (відрізка) лінії з розподіленими параметрами не дорівнює відповідному струму і напрузі на його вході і відрізняються і за величиною, і за фазою. Отже, струм і напруга в будь-якій точці лінії є функціями не тільки часу, але і просторових координат (наприклад, відстані від одного з кінців лінії). У загальному вигляді довгу лінію з розподіленими параметрами (рис. 2) можна відобразити як лінію з n комірок із зосередженими параметрами.

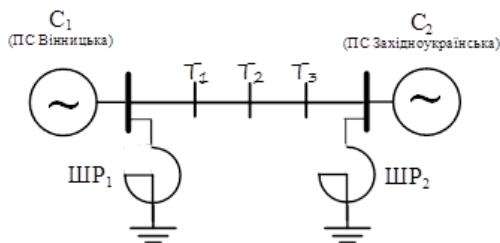


Рис. 1. Структурна схема довгої лінії

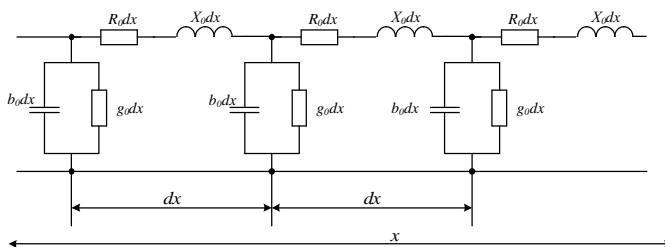


Рис. 2. Схема заміщення довгої лінії з розподіленими параметрами

Для створення математичної моделі ЛЕП НВН було використано програмний комплекс RE [2]. На основі вихідних даних для лінії 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська” були розраховані погонні параметри та сформована її розрахункова схема на рис. 3.

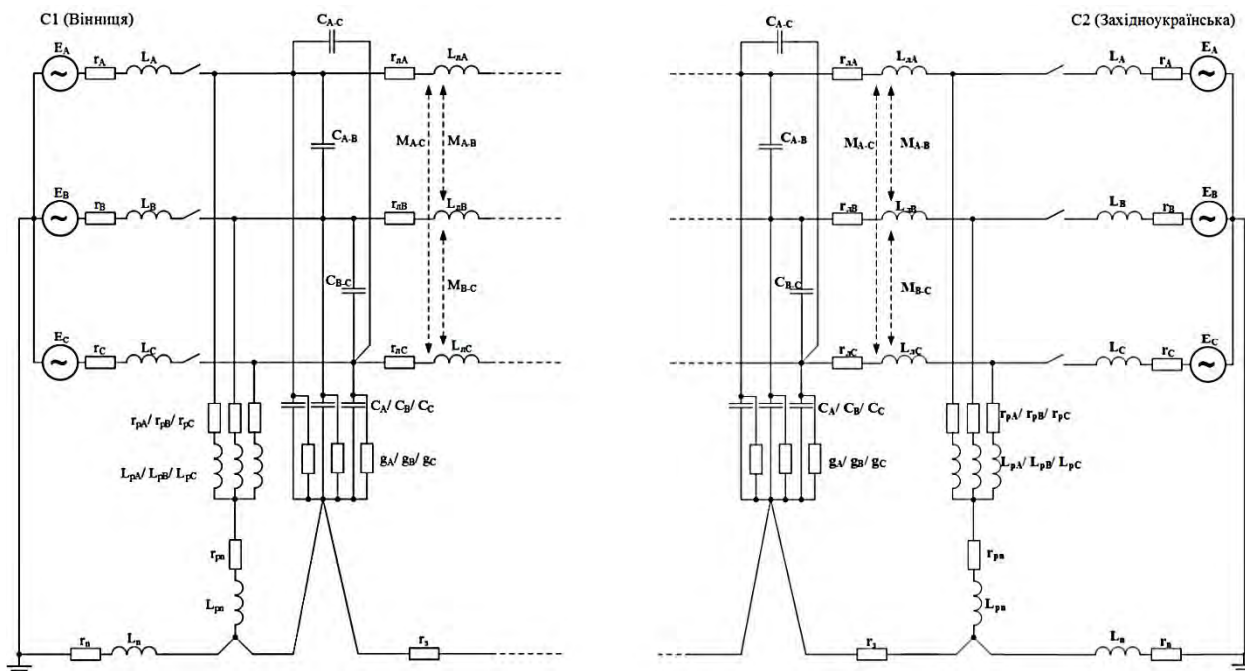


Рис. 3. Розрахункова схема моделі ЛЕП НВН 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська”

Поперечні активні провідності проводів на землю і між ними враховують втрати активної потужності, що зумовлені струмами спливу ізоляцією (гірляндами підвісних ізоляторів) лінії та явищем коронування проводів фаз лінії. У розрахунковій схемі втрати активної енергії на корону моделюються поперечними провідностями g_A, g_B, g_C . Поздовжні втрати активної енергії, що обумовлені наявністю активного опору в фазних проводах, моделюються активними опорами $r_{лA}, r_{лB}, r_{лC}$.

Для перевірки точності моделювання розглядалось три варіанти моделі ЛЕП НВН з 12, 24 та 48 комірками з врахуванням транспозиції фазних проводів.

Хвиля напруги приходить у різні точки проводу з запізненням, яке залежить від відстані цих точок від початку лінії. Нехай у момент часу $t=0$, коли напруга на початку лінії максимальна, у кінці лінії напруги ще немає. Напруга надходить у кінець лінії через деякий час t . Інакше кажучи, якщо напруга на початку лінії змінюється за законом $u=U_m \cos(\omega t)$, то в точці, розташованій на відстані x від початку лінії, вона буде змінюватись за таким же законом, але з запізненням на проміжок часу $\Delta t=x/v$, за який електромагнітна хвиля доходить до цієї точки [3]. Відповідно напруга в ній змінюватиметься за законом

$$u_x = U_m \cos \left(\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right). \quad (1)$$

У програмному комплексі RE були проведені досліди ввімкнення лінії на неробочий хід з боку ПС “Вінниця” для кожного з варіантів виконання моделі. Під час моделювання було отримано осцилограми напруг для початку, середини та кінця лінії. На рис. 4–6 наведені отримані в результаті розрахунку осцилограми напруг у кінці лінії для кожного з варіантів.

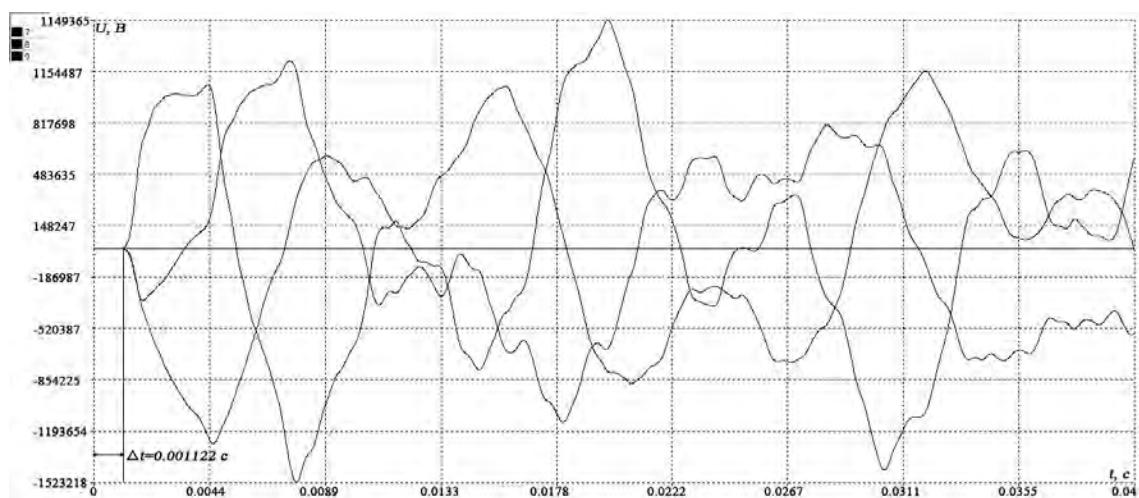


Рис. 4. Напруга в кінці лінії для варіанта виконання моделі з 12-ти комірок

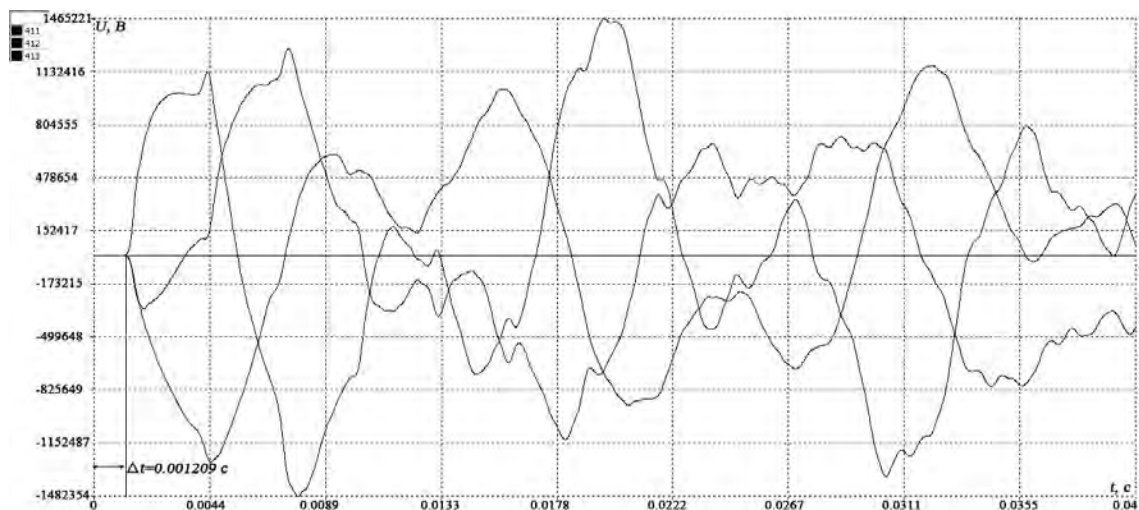


Рис. 5. Напруга в кінці лінії для варіанта виконання моделі з 24-х комірок

У результаті проведених дослідів було встановлено, що час затримки появи напруги в кінці лінії для варіанта виконання моделі з 12, 24 та 48-ми комірок становить: 0,001122; 0,001209; 0,001298 с відповідно.

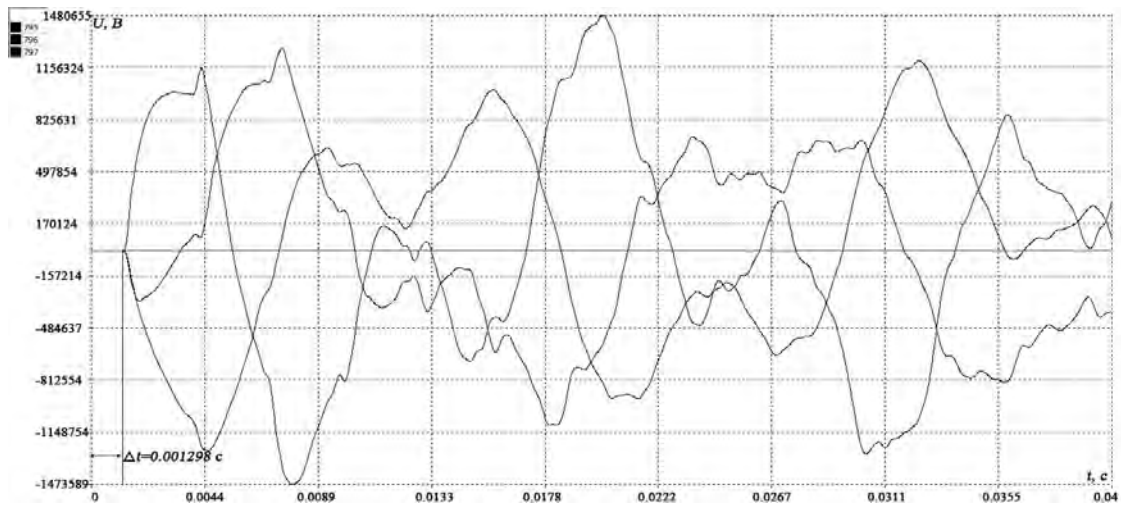


Рис. 6. Напряга в кінці лінії для варіанта виконання моделі з 48-ми комірок

Для перевірки окремих моделей проведені аналітичні розрахунки швидкості розповсюдження хвилі в довгій лінії. На основі погонних параметрів лінії було розраховано коефіцієнт розповсюдження γ :

$$g = a + jb = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \quad (2)$$

Виділенням з отриманого значення коефіцієнта фази b розраховано фазову швидкість [4]:

$$v_\phi = \frac{\omega}{b}. \quad (3)$$

На основі отриманого значення фазової швидкості v_ϕ розраховано час (0,0013203 с), який необхідно напрузі, щоб досягти кінця лінії. Варто зазначити, що швидкість поширення електромагнітної хвилі напруги в лінії є дещо менша, ніж швидкість світла. Це пов'язано насамперед з тим, що в лінії наявні втрати.

На основі моделювання та аналітичних розрахунків побудовані графіки залежності часу затримки напруги від довжини лінії $t=f(l)$ (рис. 7). Варто відзначити, що зі збільшенням числа комірок у моделі ЛЕП НВН 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська”, крива, отримана за допомогою моделювання, наближається до розрахованої аналітично, як це показано на рис. 7. Зважаючи на вищенаведене, схема заміщення моделі з 48-ма комірками забезпечує необхідну точність розрахунку і її можна вважати найоптимальнішою.

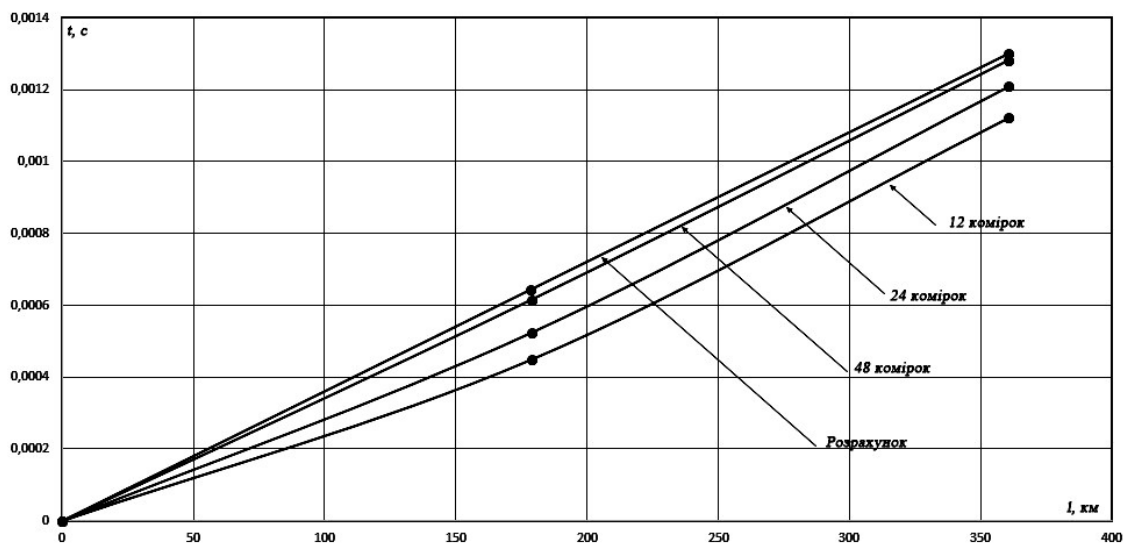


Рис. 7. Залежність часу появи напруги від довжини ЛЕП

На основі розробленої моделі лінії було досліджено такі комутаційні процеси:

- планове ввімкнення незарядженої ПЛ-750 кВ за відсутності КЗ з подальшим відімкненням вимикача від помилкової дії релейного захисту;
- планове ввімкнення ПЛ –750 кВ за наявності на ній різних видів КЗ;
- повторне ввімкнення лінії в циклі ОАПВ.

Кратності перенапруг, що виникають в ЛЕП НВН під час одностороннього ввімкнення, залежать від величини напруги в момент ввімкнення між контактами вимикача та від кута ввімкнення u . Максимальне значення напруги буде під час увімкнення в момент максимуму напруги, тобто для $u = 0$. Кратність перенапруг в такому випадку становитиме порядку $2U_{\phi}$ [2]. У результаті проведених досліджень одностороннього ввімкнення ЛЕП з боку ПС “Вінниця” кратність перенапруг становила $2,041 U_{\phi}$, а з боку “Західноукраїнська” – $1,889 U_{\phi}$. Зважаючи на вищенаведене, можна судити про доволі високу точність розробленої моделі ЛЕП.

У результаті подальших досліджень було виявлено такі небезпечні комутації, перенапруги під час яких перевищують допустимі значення:

- одностороннє відімкнення ЛЕП внаслідок помилкової дії релейного захисту з боку ПС “Вінниця”, де кратність перенапруг становить $2,783 U_{\phi}$;
- одностороннє відімкнення ЛЕП внаслідок помилкової дії релейного захисту з боку ПС “Західноукраїнська”, де кратність перенапруг становить $2,791 U_{\phi}$;
- одностороннє ввімкнення незарядженої лінії з боку ПС “Вінниця” на однофазне коротке замикання на землю, де кратність перенапруг становить $2,605 U_{\phi}$.

Особливу увагу слід приділити комутаційним процесам, що відбуваються в циклі ОАПВ. Як вже зазначалось вище, ліквідація однофазного короткого замикання на землю супроводжується цілою серією комутацій. На прикладі моделі ЛЕП 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська” змодельовано режим успішного ОАПВ (рис. 8).

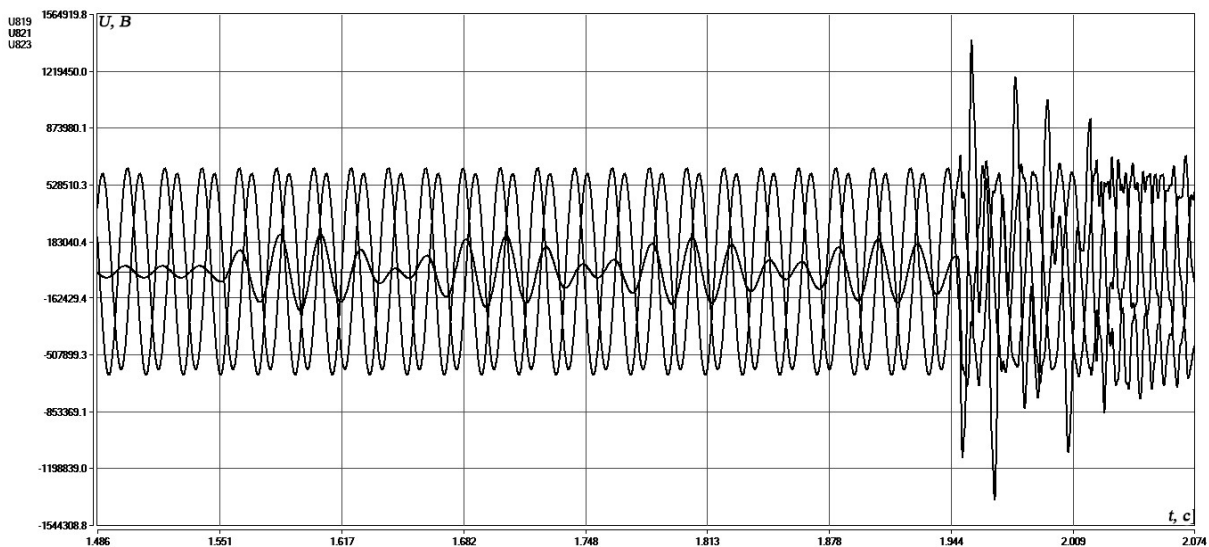


Рис. 8. Перенапруги в циклі ОАПВ

У результаті моделювання виявлено небезпечні значення перенапруг під час повторного одностороннього вмикання пошкодженої фази на рівні $2,192 U_{\phi}$.

Висновки

Під час досліджень було розроблено детальну модель лінії 750 кВ з зосередженими параметрами. Оцінено точність моделі залежно від ступеня зосередженості параметрів лінії.

Для лінії 750 кВ “Вінниця – Західноукраїнська” досліджено небезпечні комутаційні процеси та наведено максимальні кратності перенапруг, що їх супроводжують.

1. Кадомская К. П., *Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учебник.* / К.П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. Рейхердт. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 320 с. 2. Равлик О. М. *Програмный комплекс для дослідження електротехнічних систем* / О. Равлик, Т. Гречин, Г. Лисяк // *Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці: 1-а Міжнародна наук.–техн. конф., 19–22 вересня 1995 р.: тези доп.* – Львів, 1995. – С. 79. 3. Улахович Д. А. *Основы теории линейных электрических цепей: учеб. пособ.* – СПб.: БХВ – Петербург, 2009. – 816 с. 4. Чеботарев В. И. *Волновые процессы в длинных линиях: учеб. пособ. для самостоятельной работы студентов физических специальностей.* – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 117 с.

УДК 621.316.727

Є. І. Федів, О. М. Сівакова

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електропостачання промислових підприємств міст
і сільського господарства

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З СИЛОВИМИ ВИПРЯМЛЯЧАМИ

© Федів Є. І., Сівакова О. М., 2016

Запропоновано спосіб узгодженого керування декількома силовими випрямлячами технологічних установок систем електроспоживання для забезпечення динамічної компенсації реактивної потужності в електромережі живлення.

Ключові слова: *система електроспоживання, реактивна потужність, силовий випрямляч, закриваючий тиристор.*

With the purpose of providing dynamic compensation of reactive power in power network, we offer the method of coordinated control for several power rectifiers of technological mechanisms of power supply systems.

Key words: *power supply system, reactive power, power rectifier, gate off thyristor.*

Постановка проблеми

Для ефективного та надійного електропостачання вузлів навантажень важливо підтримувати постійний баланс реактивної потужності і в усталених, і перехідних режимах роботи розподільної електромережі. Баланс реактивної потужності в усталених режимах забезпечує належну якість електроенергії та економічну ефективність роботи розподільних електромереж. Дефіцит реактивної потужності в перехідних режимах системи електроспоживання, що виникає за заниженого рівня чи провалу напруги живлення, приводить до порушення стійкості роботи електродвигунного навантаження. Для комплексного забезпечення балансу реактивної потужності потрібні плавно регульовані швидкодійні джерела реактивної потужності з можливістю їх форсування під час електромеханічних перехідних процесів.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Практично єдиними джерелами реактивної потужності, які відповідають зазначеним вимогам, в системах електроспоживання можуть бути синхронні двигуни технологічних установок, облад-