

*НОМ-10 за дії вільних складових внутрішніх перенапруг мережі // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2012. – № 736. – С. 88–93. б. Маліновський А. А., д.т.н, Сабат М. Б, інженер, Бучковський І. Р., інженер, Никонєць О. Л., студент, Гуцин Є. Ю., студент. Методи визначення параметрів елементів математичної моделі електроустановки з обмотками високої напруги за дослідними частотними характеристиками // Новини енергетики. – 2011. – № 5. С. 34–39.*

УДК 621.314.212 : 621.314.222.6

А.А. Маліновський, О.Л. Никонєць, Н.Г. Мальцева, М.Й. Олійник  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра ЕПМС, кафедра ЕС

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ТИПОВИХ ІМПУЛЬСНИХ ВИПРОБУВАНЬ

© Маліновський А.А., Никонєць О.Л., Мальцева Н.Г., Олійник М.Й., 2013

За дії імпульсних перенапруг на обмотки трансформатора у них на одній з частот вільних коливань розвивається резонанс напруг. Амплітуди вільних коливань співвимірні з амплітудою випробувального імпульсу, а тривалість існування коливань не менше ніж на порядок перевищує тривалість існування імпульсу. Ці перенапруги є причиною міжвиткових замикань. Оснащення всіх мереж напругою до 110 кВ включно обмежувачами перенапруг (ОПН) – основний захід з підвищення їх надійності. Виникає необхідність проведення досліджень для виявлення діапазонів резонансних частот і небезпечних ділянок обмоток для найпоширеніших типорозмірів трансформаторів.

*Ключові слова:* силовий трансформатор, резонансні перенапруги, імпульсні перенапруги.

Resonance voltage of one of the natural resonant frequency progresses in power transformer windings when they are under the influence of pulse overvoltage. The amplitude of free oscillating voltage and the amplitude of the pulse voltage are commensurable, but the existence time of oscillation lasts tenfold longer than the existence time of pulse voltage does. The overvoltage may cause coil faults. Overvoltage limiter installation is the main issue of reliability improvement in 110 kV or less power supply system. It's necessary to do a research to establish the range of resonant frequencies and dangerous zones of the most used types of transformer windings.

*Key words:* power transformer, resonance overvoltage, peak overvoltage.

### Постановка проблеми

Аналіз ушкоджень силових трансформаторів розподільних мереж 10 кВ [1] показав, що їх причиною у 20,8 % випадків є грозові перенапруги і у 34,4 % випадків – комутаційні перенапруги. Зокрема у 55% випадків пошкодженою виявляється поздовжня (виткова) ізоляція. Отже, можна стверджувати, що грозові перенапруги є другим за значенням чинником ушкодження трансформаторів.

Цей висновок вступає у протиріччя з твердженням авторів більшості наукових публікацій про те, що внутрішня ізоляція мереж класу до 35 кВ має стосовно внутрішніх перенапруг понаднормативні запаси. Причини виникнення виткових замикань обмоток за дії внутрішніх перенапруг викладені у [2]. Існує велика кількість досліджень з визначення розрахункових параметрів імпульсних впливів, з розроблення необхідних захисних заходів й обґрунтування необхідних рівнів

ізоляції обмоток. Однак надійність роботи електрообладнання недостатня! З вищенаведеного випливає, що існують невідомі, невраховані чинники, які впливають на надійність обладнання. Виявлення їх – мета цього дослідження.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Проведені дослідження [2] виявили, що імпульсні впливи на трансформатор під час його експлуатації провокують виникнення небезпечних внутрішніх перенапруг, наслідком яких стають виткові замикання, попри наявність захисту від імпульсних впливів; для підвищення надійності експлуатації трансформаторів необхідно повсюдно оснащувати їх обмежувачами перенапруг; методику стандартних типових випробувань трансформаторів необхідно вдосконалити; ГОСТ 1516.3-96 та ГОСТ 1516.2-67 необхідно переглянути у частині, що стосується електрообладнання напругою до 110 кВ включно. Зазначені висновки отримані на підставі аналізу результатів дослідження з використанням математичної моделі [3], у якій наведені окремо поздовжня (виткова) ізоляція обмоток трансформатора і окремо головна ізоляція. Ця модель не була пристосована для дослідження електромагнітних процесів безпосередньо у обмотках трансформатора за дії імпульсних перенапруг. Останнім часом математична модель вдосконалена [4], а її використання дає змогу отримати додаткову інформацію про параметри режиму електромагнітних процесів у довільній точці обмотки ВН трансформатора.

### **Мета дослідження**

Метою дослідження є виявлення небезпечних параметрів режиму електромагнітних процесів в обмотках трансформатора під час проведення типових імпульсних випробувань.

### **Виклад основного матеріалу**

Детальні дослідження проведені на двох математичних моделях стандартного трифазного трансформатора напругою 20/0,4 кВ, потужністю 20 кВА, з природним оливним охолодженням і схемою з'єднання У/У-0. Перша модель дозволяє додатково досліджувати параметри впливу у точці обмотки ВН, віддаленій від початку обмотки на 47 % її довжини. Друга – у точці, віддаленій від початку обмотки на 92 % її довжини. Це дає змогу оцінювати параметри впливу практично посередині обмотки і поблизу її нейтралі.

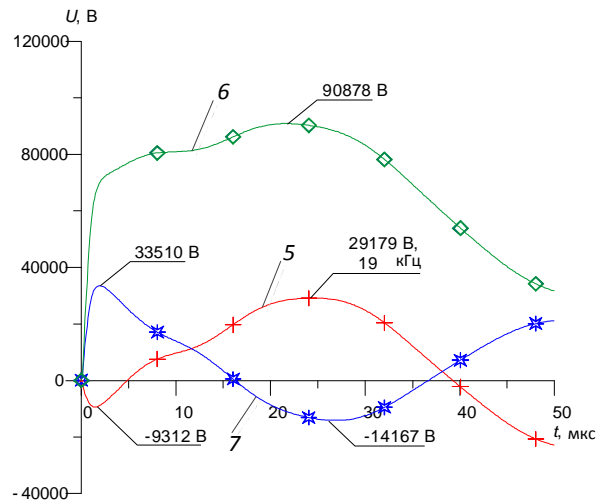
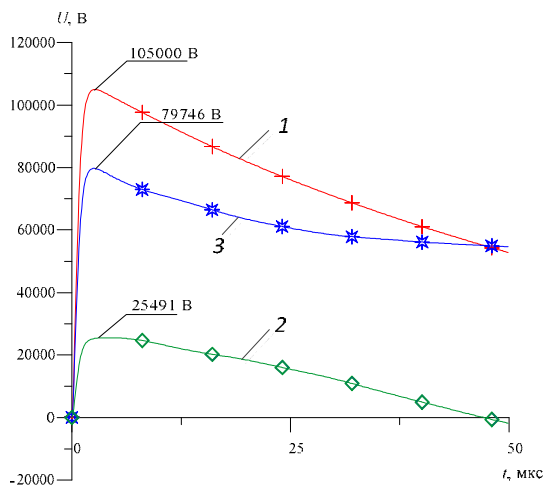
Ізоляція всередині трансформатора відносно землі і між обмотками фаз у трансформаторах досліджуваного класу повинна витримувати прикладену почергово до кожного лінійного виводу напругу повних імпульсів 125 кВ макс і зрізаних імпульсів величиною 150 кВ макс [5]. Якщо з обмотки ВН виведена нейтральна точка, то таким випробуванням підлягає також ізоляція нейтралі. Якщо ж нейтральна точка обмотки ВН не виведена, то внутрішня ізоляція повинна витримувати напругу повних грозових імпульсів амплітудою 105 кВ макс, прикладену до трьох з'єднаних між собою лінійних виводів. Для трансформаторів з номінальною напругою менше 20 кВ напруга випробування не зменшується (до 105 кВ замість 125 кВ).

Ізоляцію обмоток НН з номінальною напругою нижче 3 кВ випробовують тільки однохвилинною змінною напругою [6].

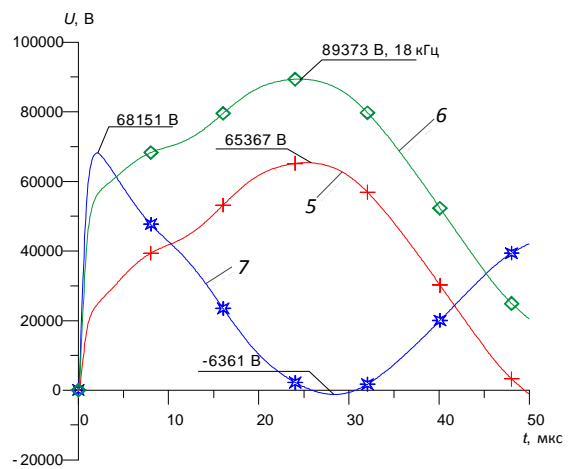
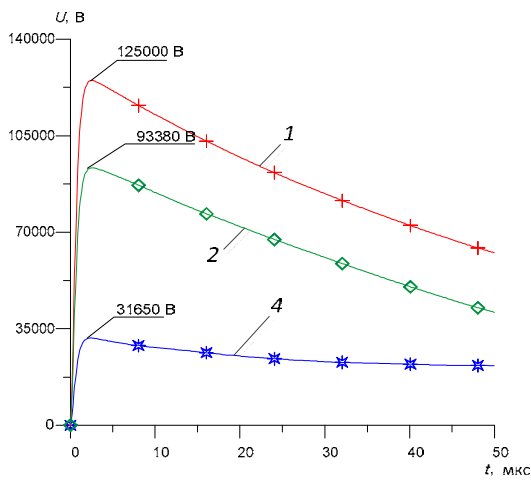
Рівні ізоляції обмоток встановлені з врахуванням захисних характеристик вентилярних розрядників за ГОСТ 16357. Для обладнання класу 20 кВ за ГОСТ 16357 прийнята група – III.

Грозові перенапруги у досліджуваній обмотці трансформатора залежать також від схеми з'єднання інших (які не випробовують) його обмоток [7]. Більші за значенням впливи на випробувальній обмотці виникають, якщо інші обмотки закорочені та заземлені [7]. Така схема з'єднання обмоток, які не випробовують, прийнята під час проведення імпульсних випробувань трансформаторів. Вона відповідає умовам, які можливі під час експлуатації. Приєднання кабельних ліній до виводів обмотки НН трансформатора стосовно впливу на перенапруги у обмотці ВН рівнозначне їх заземленню.

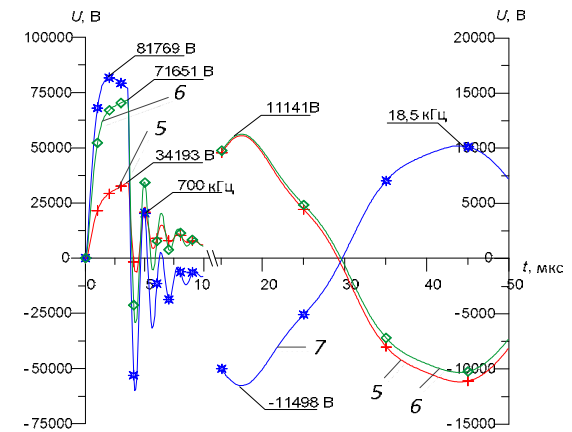
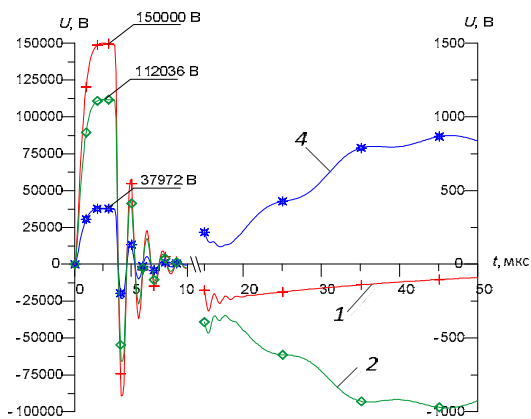
Результати дослідження параметрів впливу на окремі елементи трансформатора під час типових імпульсних випробувань наведені на рис. 1 і 2. Певні відмінності значень однотипних параметрів (наприклад, напруга на цілій обмотці чи напруга нейтрального виводу) на рис. 1 і 2 спричинені похибками моделювання, які притаманні таким моделям.



a



б



в

Рис. 1. Цифрограми параметрів дії на елементи трансформатора напругою 20/0,4 кВ зі схемою з'єднання Y/Y-0 під час типових імпульсних випробувань моделі з додатково виведеним виводом з обмотки ВН, віддаленим від її початку на 47 % довжини: а – випробування ізоляції нейтралі повним імпульсом; б – випробування обмотки фази А повним імпульсом; в – випробування обмотки фази А зрізаним імпульсом; 1 – напруга імпульсу; 2 – напруга на нейтралі; 3 – напруга на фазі А (АВС – закорочені); 4 – напруга на фазі А (ВС – закорочені); 5 – напруга на 53 % обмотки; 6 – напруга на 47% обмотки; 7 – напруга додаткового виводу відносно корпусу

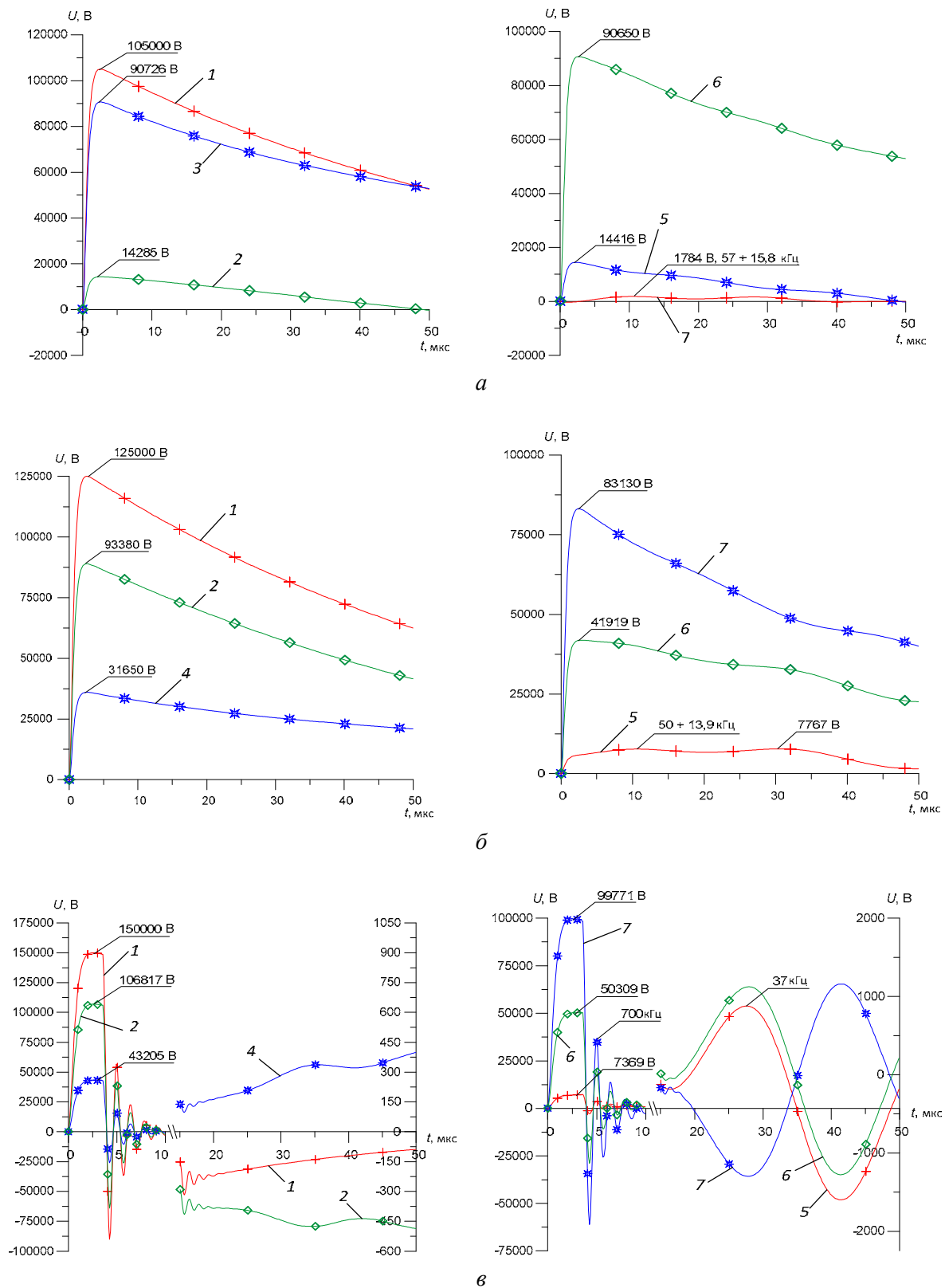


Рис. 2. Цифрограми параметрів дії на елементи трансформатора напругою 20/0,4 кВ зі схемою з'єднання Y/Y-0 під час типових імпульсних випробувань моделі з додатково виведеним виводом з обмотки ВН, віддаленим від її початку на 92 % довжини: а – випробування ізоляції нейтралі повним імпульсом; б – випробування обмотки фази А повним імпульсом; в – випробування обмотки фази А зрізаним імпульсом 1 – напруга імпульсу; 2 – напруга на нейтралі; 3 – напруга на фазі А (АВС – закорочені); 4 – напруга на фазі А (ВС – закорочені); 5 – напруга на 8 % обмотки; 6 – напруга на 92% обмотки; 7 – напруга додаткового вивода відносно корпусу

Головною особливістю процесів, параметри режиму яких подані на рис. 1 і 2, є виникнення коливань напруги на частинах обмотки ВН, частота яких залежить від виду випробувального імпульсу (19 кГц – рис. 1, *а*, 18 кГц – рис. 1, *б*, 700 кГц і 18,5 кГц – рис. 1, *в*, 57 кГц і 15,8 кГц – рис. 2, *а*, 50 кГц і 13,9 кГц – рис. 2*б*, 700 кГц і 37 кГц – рис. 2, *в*). Отримані у математичному експерименті резонансні частоти, корелюються з частотами резонансних перенапруг між частин обмотки ВН, які отримані під час проведення фізичного експерименту на оригіналі трансформатора. Для частин обмотки ВН, які відповідають 47 і 5 %, 56 і 44 %, 92 і 8 %, 96 і 4 % довжини обмотки, резонансні частоти відповідно дорівнюють 15–20 кГц, 34–40 кГц, 60–70 кГц. Оскільки на зазначених частотах перенапруги мають резонансний характер, то напруги на частинах обмотки повинні бути у протифазі, що особливо добре простежується на рис. 1. Винятком тут є частота 700 кГц, яка виникла в результаті взаємодії моделей генератора імпульсних перенапруг і випробовуваного трансформатора. Резонансні явища у частинах обмотки трансформатора збуджуються імпульсною хвилею. Амплітуда стандартної імпульсної хвилі протягом 50 мкс зменшується у два рази. Така дія (протягом тривалості існування імпульсу) еквівалентна дії синусоїдної напруги з частотою 3 кГц. Тривалість же фронту стандартного імпульсу становить 1,2 мкс, що еквівалентне синусоїді з частотою 200 кГц. Тому можна говорити про дію на трансформатор напруг певного спектра частот.

Форми імпульсних перенапруг, які виникають під час експлуатації трансформатора, можуть істотно відрізнятися від форми напруги стандартного імпульсу, що необхідно враховувати, оцінюючи ймовірність розвитку резонансних явищ в обмотках трансформаторів.

Через відмінність добротностей головної і поздовжньої ізоляції форми імпульсів, що діють на обмотку і головну ізоляцію, також відрізняються від форми прикладеного імпульсу (рис. 1, 2). Тому максимальні напруги, прикладені до частин обмотки ВН, можуть бути як меншими від максимальної напруги на цілій обмотці (рис. 1, *а*; 2, *а*), так і більшими (рис. 1, *в*; 2, *в*). Швидкість згасання коливань напруги на частинах обмотки значно менша від швидкості згасання прикладеного стандартного імпульсу. Тому максимальні напруги на частинах обмотки можуть бути значно більшими, ніж величини напруги на цілій обмотці у момент часу, коли досягає максимуму напруга на частині обмотки. Форма напруги на головній ізоляції між обраною точкою обмотки і корпусом трансформатора значно відрізняється від форми прикладеного до трансформатора повного імпульсу і від форми напруги на нейтралі трансформатора (рис. 1), що необхідно враховувати під час проектування головної ізоляції між певними точками обмотки і корпусом.

Ще виразнішими є не абсолютні значення перенапруг різних частин обмотки у різні моменти часу, а їх значення, зведені до напруги цієї частини обмотки (на якій здійснюється вимірювання). За базову прийнято значення напруги на частині обмотки за рівномірного розподілу вздовж обмотки прикладеного до неї імпульсу. Наприклад, на рис. 1*а* відносне значення напруги на 47 % довжини обмотки у момент досягнення максимуму імпульсу на цілій обмотці становило 1,55, а відносне значення максимальної напруги на 53 % довжини обмотки по відношенню до величини імпульсу на цілій обмотці у момент досягнення максимуму на 53 % обмотки становило 1,87.

Для зменшення внутрішніх перенапруг в обмотках трансформатора за імпульсних впливів розробляється теорія нерезонувальних обмоток [8], що дозволить наблизити початковий розподіл напруги вздовж обмотки до рівномірного. Не відкидаючи користі від конкретних вдосконалень, треба зазначити, що, через резонансний характер перенапруг, остаточний розподіл напруг не є рівномірним і залежить від форми прикладеного імпульсу. Зміниться також ділянка обмотки, у межах якої виникнуть максимальні впливи на виткову ізоляцію. З цього випливає, що принципово неможливо створити нерезонувальну обмотку. Можливі тільки такі вирішення, з реалізацією яких зазначені перенапруги будуть мінімальними. Способом реалізації таких вирішень можна запропонувати проведення досліджень з виявлення діапазонів резонансних частот і небезпечних ділянок для конкретних типорозмірів обмоток. Зменшенню величин внутрішніх перенапруг на елементах обмотки сприятиме максимально можливе обмеження діючого імпульсу, а також (якщо міжвиткові перенапруги перевищуватимуть допустимі значення) зменшення добротності коливних контурів трансформатора.

## Висновки

1. За дії імпульсних перенапруг на обмотки трансформаторів у них розвивається резонанс напруг на одній з частот вільних коливань. Амплітуди вільних коливань у такому режимі співвимірні з амплітудою імпульсу, а тривалість коливань не менше ніж на порядок перевищує тривалість імпульсу. Ці перенапруги можуть бути причиною міжвиткових замикань.

2. Застосування обмежувачів перенапруг (ОПН) у всіх мережах напругою до 110 кВ включно – основний захід з підвищення надійності.

3. Для найпоширеніших типорозмірів обмоток трансформаторів необхідні дослідження з виявлення діапазонів резонансних частот та небезпечних стосовно ушкодження ділянок обмоток.

1. Ахметишин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик // *Электричество*. – 2005. – № 5. 2. Бучковський І. Р., Молнар М. М., Никонец А. Л., Никонец Л. А., Сабат М. Б. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / Под ред. Л.А. Никонца. – Львов: НФВ «Українські технології», 2008. – 167 с. 3. Конторович Л.Н., Молнар М.М., Никонець О.Л. Математична модель трифазного трансформатора для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі // *Новини енергетики*– 2010. – № 3. – С. 40–46. 4. Никонець Л.О., Бучковський І.Р., Сабат М.Б. Математична модель трифазного трансформатора для частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. – 2012. – № 736: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 108–116. 5. ГОСТ 1516.3-96. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. –К.: Госстандарт Украины, 1999. 6. ГОСТ 1516.2-97 (2003). Межгосударственный стандарт. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с. 7. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с. 8. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с.