

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ НОМ-10 ДЛЯ ЧАСТОТ ВІЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ

© Маліновський А.А., Гуцин Є.Ю., Никонець О.Л., 2013

Критерієм адекватності моделювання еквівалентних параметрів обмоток та їх частин є рівність споживаних від джерела активної і реактивної потужностей фізичного оригінала і його математичної моделі за однакових умов випробування. Обґрунтована доцільність почергового вимірювання параметрів під час проведення дослідів на оригіналі, що суттєво зменшує похибку результатів вимірювання. Вперше синтезована математична модель трансформатора напруги НОМ-10.

Ключові слова: внутрішній резонанс, трансформатор напруги, ізоляція електрообладнання, обмотки трансформатора, математична модель, частотна характеристика, двополюсник.

A criterion of adequate modeling of equal parameters of windings and their parts is the equal quantities of consumed active and reactive power by a physical original and its mathematical model. A necessity of alternate measurements of parameters during a physical experiment has been proved so now it allows declining measurements errors. A model of a voltage transformer “NOM-10” (Single-phase Oil Transformer-10) has been synthesized for the first time.

Key words: internal resonance, voltage transformer, insulation of electrical equipment, transformer winding, mathematical model, frequency characteristic, two-pole.

Постановка проблеми

Явище внутрішнього резонансу зумовлює необхідність докорінної зміни підходів до вибору ізоляції електрообладнання з обмотками високої напруги та методів обґрунтування розрахункових перенапруг на її елементах. Визначальними є не ті перенапруги, що діють на електрообладнання з боку мережі, а ті, що розвиваються на елементах ізоляції, хоча між ними безумовно існує детерміністський зв'язок. Із наведеного випливає необхідність створення математичних моделей електрообладнання, які адекватно відтворювали б процеси в обладнанні [1].

Аналіз сучасних досягнень та публікацій

Перша спроба синтезу моделі трансформатора напруги типу НОМ-10 зроблена в [2]. Автор [2] прийняв допущення, що внутрішній опір НОМ-10 не може змінити значення напруги, прикладеної до його обмотки ВН з боку мережі, тому цим опором можна знехтувати. У результаті модель [2] відображала тільки процеси в головній ізоляції НОМ-10.

Перша спроба синтезу моделі трифазного силового трансформатора, в якій вдалося розділити модель ізоляції на дві складові – поздовжню та головну, виконана в [3]. Із застосуванням моделі [3] вдалось істотно розширити уявлення про характер процесів в трансформаторі та пояснити причини виникнення виткових замикань за внутрішніх перенапруг мережі.

Подальший розвиток теорія моделювання електромагнітних процесів в обмотках ВН трансформаторів за дії перенапруг мережі одержала в [1, 4]. Було розроблено спеціальні методи експериментального визначення параметрів математичної моделі трансформаторів та принципи синтезу самої моделі. Ці моделі вперше дозволили досліджувати електромагнітні процеси в обмотці

ВН трансформатора з прийнятною для практики точністю і обґрунтувати рекомендації з підвищення надійності роботи виткової ізоляції. Зокрема вдалось довести, що відтворення параметрів режиму в конкретній точці обмотки на моделі неможливе без використання для моделювання опорів частин обмоток таких понять, як « $-L_i$ », « $-C_i$ ». Загалом можна констатувати, що сьогодні процес синтезу моделі більше нагадує мистецтво ніж послідовні дії за певним алгоритмом та потребує великих затрат часу і праці.

Задача досліджень

Проаналізувати запропоновану в [1] методику синтезу моделі, сформулювати напрями можливого вдосконалення та синтезувати модель одного з широко застосовуваних в експлуатації трансформатора напруги типу НОМ-10.

Виклад основного матеріалу досліджень

Дослідження проведені для трансформатора напруги типу НОМ-10, у якого додатково зі середини обмотки ВН зроблено вивід на кришку бака. Модель трансформатора повинна містити як складові частини модель магнітної системи, моделі двополіусників, що характеризують ізоляцію та моделі двополіусників, що характеризують половини обмотки ВН, і обмотку НН.

Модель магнітної системи розроблена в [2] і не потребує коригування.

Структурна схема трансформатора типу НОМ-10 у вигляді комбінації двополіусників наведена на рис. 1. Між двополіусниками Z_1 , Z_2 , Z_H існує магнітний зв'язок, який показано на рис. 1 сірими лініями зі стрілками.

Задача моделювання полягає в експериментальному визначенні значень опорів двополіусників рис. 1 у діапазоні частот 0 – 100 кГц та подальшому синтезі кожного з двополіусників за одержаними частотними характеристиками. Можлива похибка моделювання має дві складові – похибку експериментального визначення частотних характеристик двополіусника та похибку синтезу двополіусника за заданою частотною характеристикою.

Враховуючи симетричність конструкції трансформатора НОМ-10, можемо зменшити кількість невідомих двополіусників структурної схеми, прийнявши, що $Z_{BK1} = Z_{BK2}$, $Z_{BH1} = Z_{BH2}$, $Z_{BC1} = Z_{BC2}$, $Z_{HK1} = Z_{HK2}$, $Z_{CH1} = Z_{CH2}$.

Структура двополіусників Z_{BK} , Z_{CK} , Z_{HK} , Z_{BC} , Z_{BB} , Z_{BH} , Z_{CH} за наявних уявлень про фізичні явища в ізоляції, проста і повинна складатись з певної кількості послідовно сполучених елементів, кожний з яких, своєю чергою, складається з паралельно сполучених елементів R_i і C_i . У найпростішому випадку можливим також є їх відтворення за допомогою лише одного ємнісного елемента.

Значно складніше визначитись з можливою структурою опорів Z_1 , Z_2 , Z_H . Відомо, що створювана на основі частотних характеристик модель об'єктивно відображає параметри режиму оригінала тільки стосовно тих виводів, для яких знято частотні характеристики. Самі обмотки та їх окремі частини являють собою складні електромагнітні комплекси з відмінними частотними характеристиками. В обмотках та їх окремих частинах, особливо під дією високочастотних перенапруг, можуть виникати істотні зрівнювальні потоки потужності, які призводять до збільшення втрат потужності та значної зміни розподілу напруг уздовж обмоток. Модель трансформатора повинна узагальнювати процеси так, щоб параметри режиму моделі у вибраній точці за певної частоти були еквівалентні параметрам процесу в реальному трансформаторі.

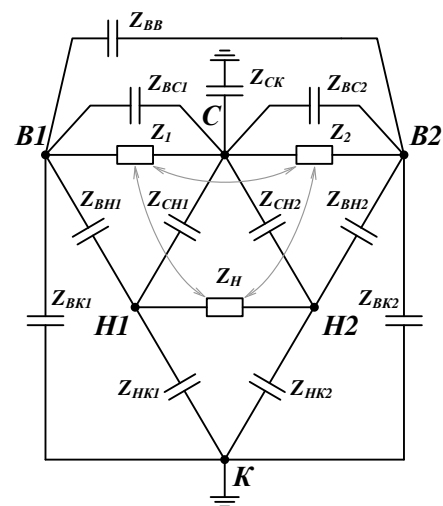


Рис. 1. Структурна схема трансформатора типу НОМ-10 у вигляді комбінації двополіусників: B1, B2 – виводи обмотки ВН; C – середній вивід обмотки ВН; H1, H2 – виводи обмотки НН

Щоб виконати цю умову, крім звичайних параметрів опорів R_i , L_i , C_i і обґрунтованих в [1, 4] параметрів « $-L_i$ » і « $-C_i$ », можна зробити припущення про необхідність введення параметра « $-R_i$ ». Якщо параметри « $-L_i$ » і « $-C_i$ » відображають властивості обмотки щодо реактивної складової зрівнювального потоку потужності, то параметр « $-R_i$ » – щодо активної складової. Критерієм правильності моделювання еквівалентних параметрів обмоток та їх частин є рівність споживаних від джерела активної і реактивної потужності фізичним оригіналом та його математичною моделлю за однакових умов досліду.

Структурна схема на рис. 1 містить 10 елементів з невідомими комплексними параметрами. Формально для їх визначення потрібно виконати на об'єкті дослідження 10 незалежних експериментів з визначення частотних характеристик різних комбінацій двополосників. За такої постановки задачі необхідно подолати труднощі, пов'язані як з проведенням експериментальної частини досліджень, так і подальшим математичним забезпеченням розв'язання 10 рівнянь з 10 комплексними невідомими для кожної з частот в діапазоні 0 – 100 кГц.

Для забезпечення точного відтворення фізичних процесів у реальному об'єкті його математичною моделлю передусім необхідно забезпечити максимальну точність вимірювань та моделювання окремих складових моделі з найменшими відхиленнями від розрахункових характеристик.

Головна складність проведення експериментальної частини досліджень зумовлена малими розмірами досліджуваного об'єкта, за яких опори двополосників, що відображають властивості ізоляції НОМ–10, є сумірними з вхідним опором вольтметрів, доступних нам для виконання експериментів, а також з опором проводів відносно землі, використаних для складання схеми вимірювань. Тому вимірювання напруг відносно корпусу приладами В7–21А одночасно з вимірюванням струму призводить до змін вимірюваних параметрів ізоляції і, відповідно, частот, за яких виникають резонанси. Отже, отримані в результаті експериментальних досліджень залежності кратностей перенапруг від частоти потребують коригування резонансних частот з використанням залежностей, отриманих без приєднання до виводів НОМ-10 вольтметрів [1, 5].

Іншою складністю проведення експериментальної частини дослідження є неможливість прямого вимірювання кута комплексного опору. У результаті кількості незалежних випробувань як мінімум подвоюється, що багатократно ускладнює необхідне математичне забезпечення.

Попередній досвід формування моделей електрообладнання показав, що отримана так система рівнянь містить невідомі з надзвичайно широким діапазоном значень. Так, значення модулів опорів різних двополосників для однакової частоти можуть відрізнятися у 10^7 - 10^8 раз. Крім того, зазвичай дослідні дані дозволяють отримати тільки значення модулів вхідного опору відносно певних виводів обмотки. За таких умов стандартне математичне забезпечення персонального комп'ютера не дозволяє розв'язати систему рівнянь. Актуальною стає задача ділення моделі на ряд підмоделей і, відповідно, проведення дослідів на об'єкті-оригіналі такими методами, щоб конкретні вимірювання охоплювали мінімальну кількість елементів об'єкта, які відтворюються в моделі мінімальною кількістю двополосників.

Ідеальним було б вимірювання в кожному досліді параметрів одного елемента об'єкта, що дозволить з n незалежних рівнянь отримати параметри n двополосників моделі [1, 6].

З врахуванням малих габаритів трансформатора НОМ–10, схеми вимірювань параметрів двополосників, що відображають властивості ізоляції порівняно з рекомендованими [1, 6], були спрощені (рис. 2).

Результати вимірювання опорів за схемами рис. 2 наведені на рис. 3. Розбіжність у значеннях опорів на низьких частотах для однойменних двополосників пояснюється різною точністю використаних приладів за надмалих струмів. За одержаними результатами створені моделі відповідних двополосників у вигляді одного ємнісного елемента. Похибки моделювання при цьому не перевищують 2–5 %.

Досліди з визначення частотних характеристик результуючих опорів половин обмотки ВН $Z_{1\Sigma}$ і $Z_{2\Sigma}$ без врахування впливу обмотки НН проводились за схемою, рекомендованою [1], яка наведена на рис. 4, а. При цьому додатково реєструвалась напруга на обмотці НН, яка може дати інформацію про значення основного магнітного потоку в магнітопроводі НОМ-10 під час проведення досліду. Поява основного магнітного потоку та напруги на обмотці НН у цьому досліді пояснюється деякою відмінністю половин обмотки ВН. Замикання обмотки НН (рис. 4, б) усуває основний магнітний потік за рахунок появи в обмотці НН зрівнювальних струмів. Зрівнювальний струм обмотки НН, трансформуючись в обмотку ВН, повинен також змінити струми в половині обмотки ВН, а також резонансні частоти.

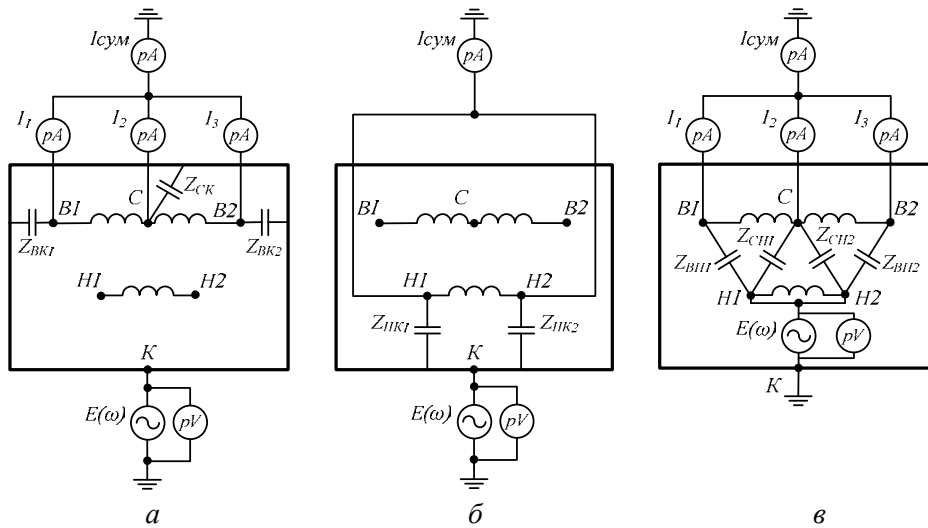


Рис. 2. Схеми визначення частотних характеристик двополосників, що відображають властивості ізоляції трансформатора НОМ-10:
 а – двополосників Z_{BK1} , Z_{BK2} , Z_{CK} ; б – двополосників Z_{HK1} , Z_{HK2} ;
 в – двополосників Z_{BH1} , Z_{BH2} , Z_{CH1} , Z_{CH2}

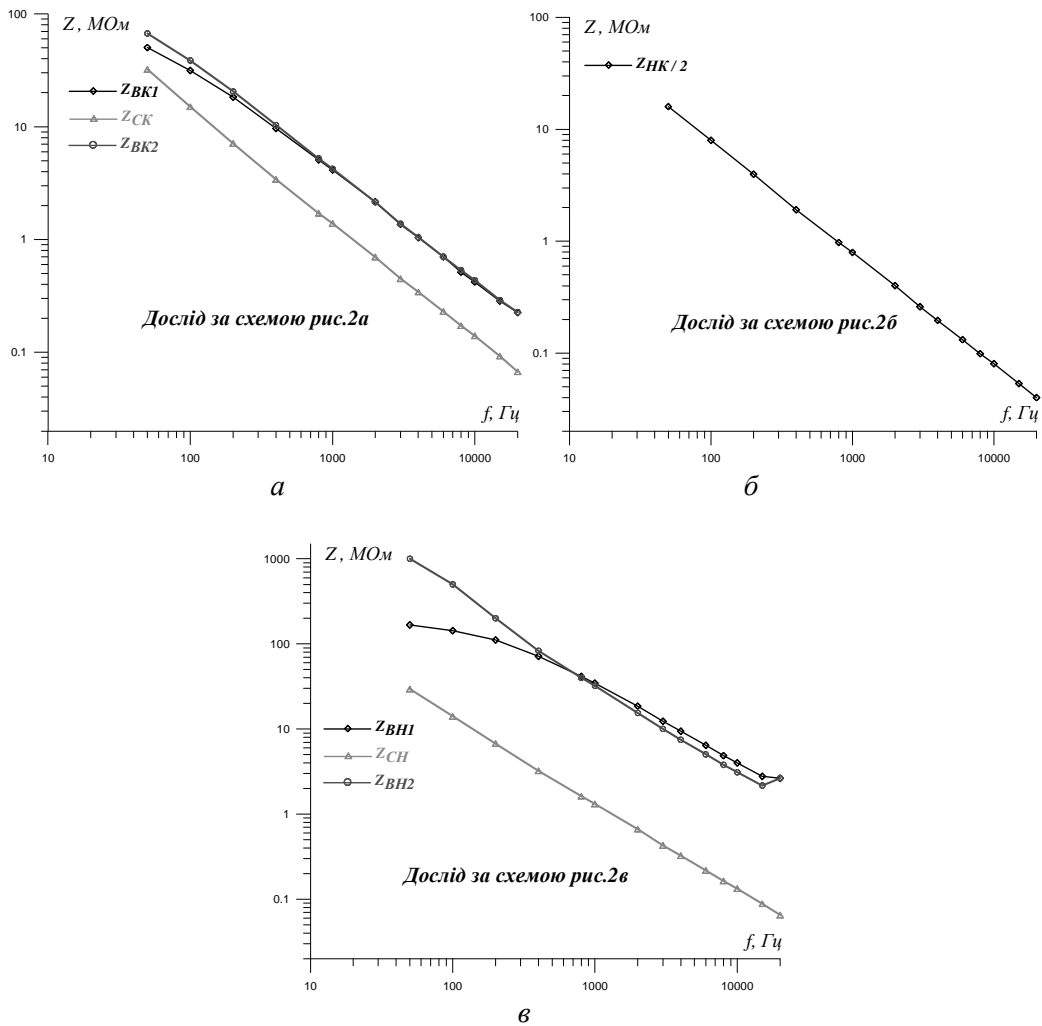


Рис. 3. Частотні характеристики двополосників, що відображають властивості ізоляції трансформатора НОМ-10:
 а – двополосники Z_{BK} , Z_{CK} ; б – двополосники Z_{HK} ; в – двополосники Z_{BH} , Z_{CH}

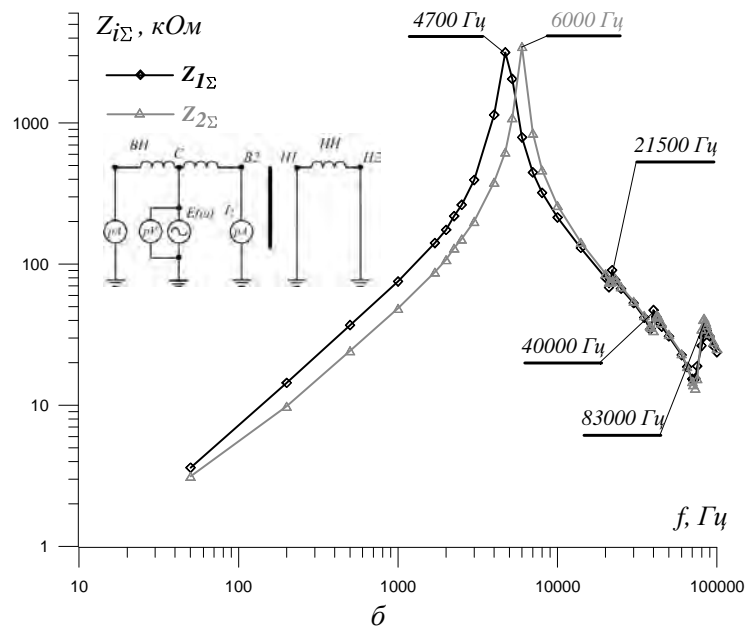
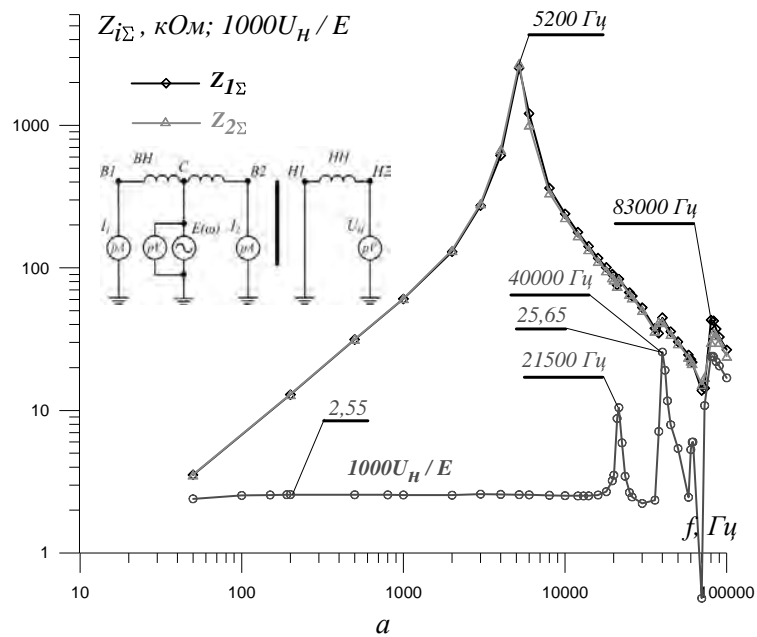


Рис. 4. Принципові схеми та результати досліджень з визначення опору половин обмотки ВН:
 а – визначення модулів результуючих опорів $Z_{1\Sigma}$ і $Z_{2\Sigma}$, обмотка НН розімкнена;
 б– визначення модулів результуючих опорів $Z_{1\Sigma}$ і $Z_{2\Sigma}$, обмотка НН замкнена

Результуючі опори $Z_{1\Sigma}$ і $Z_{2\Sigma}$ виміряні з врахуванням взаємних зв'язків половин обмотки ВН між собою і з обмоткою НН і є вихідними даними для визначення реальних значень Z_1 і Z_2 половин обмотки ВН за методикою, викладеною в [1].

Спроба використання методики визначення значень Z_1 і Z_2 , викладеної в [1], з вимірюванням фази напруги U_H відносно ЕРС джерела живлення E , дала результати, наведені на рис. 5.

Як видно з рис. 5, значення напруги U_H зі зростанням частоти (починаючи від 20 кГц) почало збільшуватись лавиноподібно, що суперечить даним досліді, наведеним на рис.4, а. На нашу думку, це сталося, тому що індуктивність НОМ-10, приведена до обмотки НН, вступила у взаємодію з ємністю Z_{HK} (рис. 1) під дією сумарної напруги $\dot{E}_\Sigma = \dot{E} + \dot{U}_H$, чого не було в досліді з силовим трансформатором [1]. Як видно з рис. 5, до частоти 13 кГц функція E_Σ збігається з функцією

$E - U_H$, а після частоти 13 кГц практично збігається з функцією $E + U_H$. Тому було зроблено висновок про те, що вектор U_H до частоти 13 кГц знаходиться у протифазі до вектора E , а після частоти 13 кГц – у фазі.

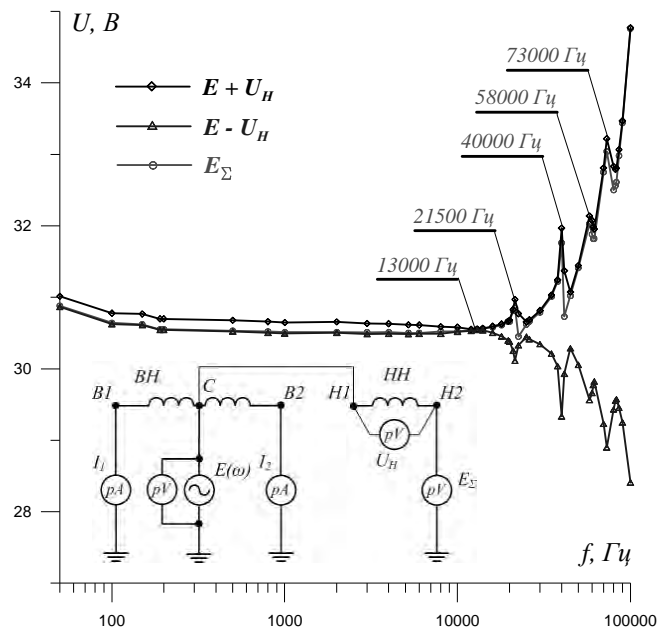


Рис. 5. Принципова схема та результати дослідів з визначення фази напруги обмотки НН U_H стосовно ЕРС джерела живлення

Розрахункова схема і результати розрахунку модулів опорів Z_1 і Z_2 половин обмотки ВН наведені на рис. 6.

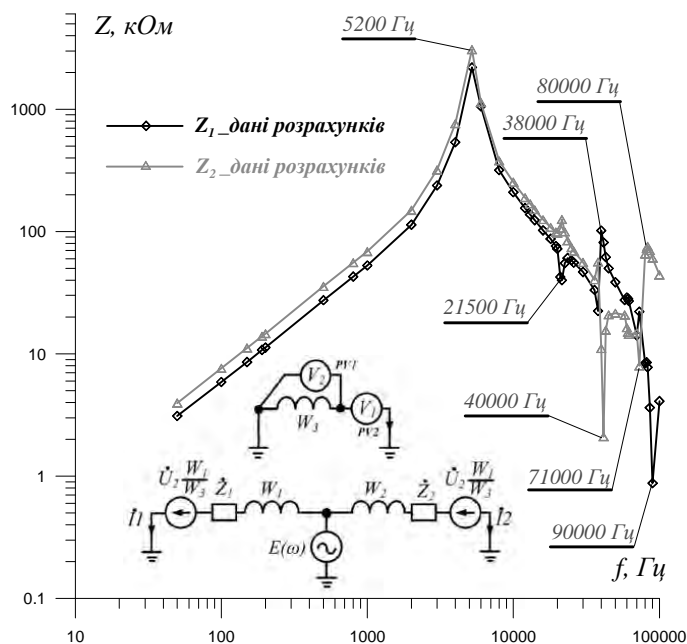


Рис. 6. Розрахункова схема для визначення частотних характеристик опорів Z_1 і Z_2 та результати розрахунків

За розрахунковими характеристиками створено моделі половин обмотки ВН з послідовно з'єднаних ланок, кожна з яких складається з паралельно з'єднаних елементів R_i , C_i , L_i .

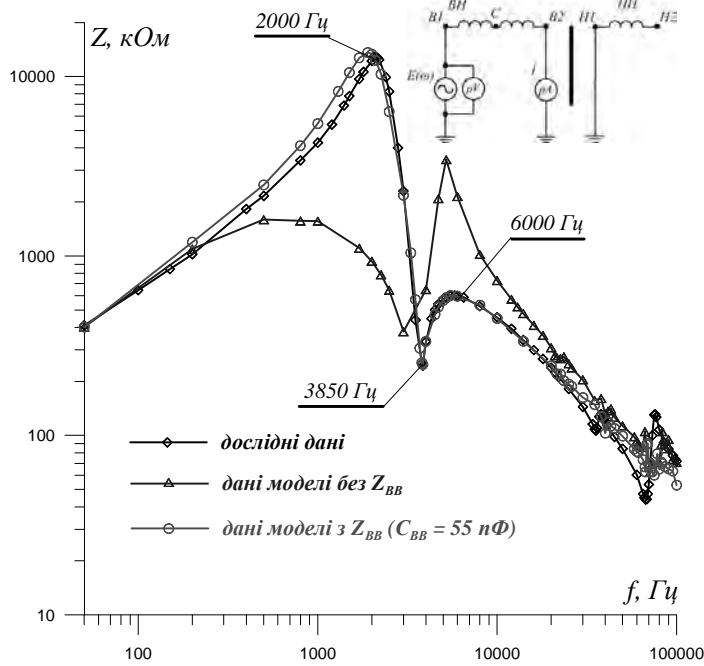


Рис. 7. Результати визначення значення опору двополюсника Z_{BB}

Z_2 , моделі двополюсників, що відображають властивості ізоляції НОМ-10 і параметри двополюсника Z_{BB} можна перейти до визначення параметрів опору Z_H . Тут принципово важливо зауважити, що безпосередніх методів визначення Z_H не існує. Тому доводиться проводити мінімум два незалежні дослідження так, щоб без безпосереднього вимірювання кута зсуву фаз між напругою і струмом на обмотці НН отримати необхідну інформацію. Такими дослідженнями є дослід за схемою рис. 4, б та дослід короткого замикання НОМ-10, значення струмів в яких використані для підбору значень опорів обмотки НН.

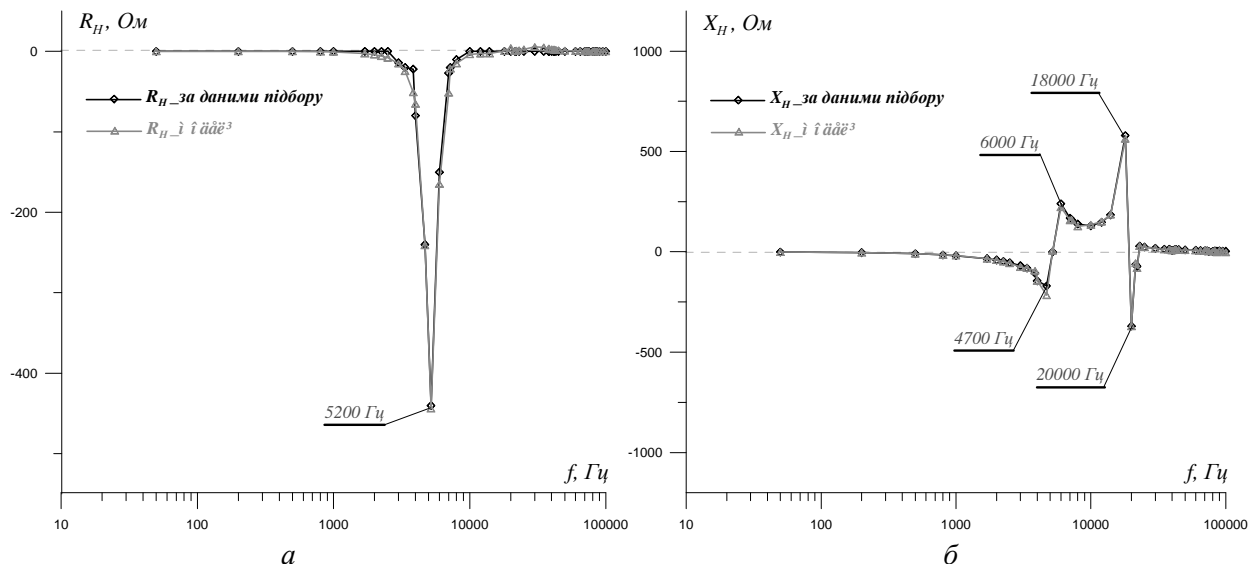


Рис. 8. Результати підбору на моделі значень модуля Z_H за даними результатів дослідження за схемою рис. 4, б та дослідження КЗ НОМ-10: а – активна складова повного опору Z_H ; б – реактивна складова повного опору Z_H

Отже, з усіх параметрів моделі рис. 1 невідомими залишаються тільки Z_{BC} , Z_{BB} та Z_H .

Двополюсники Z_{BC} і Z_{BB} приєднані паралельно до виводів обмотки ВН і їх опори принципово не можуть бути визначені за результатами вимірювань окремо. Значення опорів Z_{BC} за умовами проведення дослідів з визначення параметрів Z_1 і Z_2 (схема рис. 4, а) вже враховані в значеннях цих опорів. Значення опору Z_{BB} визначалось шляхом порівняння характеристики неробочого ходу НОМ-10 з такою самою характеристикою, знятою на моделі без двополюсника Z_{BB} та з його приєднанням (рис. 7).

Маючи модель магнітної системи НОМ-10, моделі опорів Z_1 і

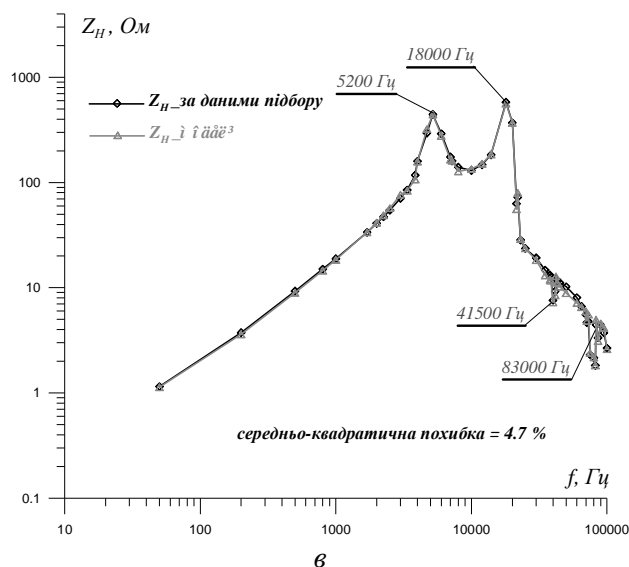


Рис. 8. (Продовження). Результати підбору на моделі значень модуля Z_H за даними результатів дослідів за схемою рис.4б та дослідів КЗ НОМ–10: ν – модуль повного опору Z_H

У результаті підбору на моделі значень опорів обмотки НН для забезпечення потрібних значень струмів одночасно двох згаданих схем дослідів визначено параметри опорів обмотки Z_H для всього діапазону частот. За результатами підбору, наведеними на рис. 8, створена модель обмотки НН, для якої виконується умова відповідності до одночасно двох розрахункових частотних характеристик – $R_H(f)$ та $X_H(f)$. Слід зазначити, що для обох схем дослідів для відтворення результатів фізичного експерименту на моделі необхідним є введення для одного і того ж діапазону частот від’ємних значень R_H .

Висновки:

1. Критерієм адекватності моделювання еквівалентних параметрів обмоток та їх частин є рівність споживаних від джерела активної і реактивної потужностей фізичного оригіналу і його математичної моделі за однакових умов випробування.
2. Вперше синтезована математична модель трансформатора напруги НОМ–10.
3. Запропонована методика підбору значень опорів обмотки НН за модулями опорів двох незалежних дослідів.
4. Адекватне моделювання параметрів режиму у вибраній точці обмотки ВН трансформатора потребує використання для синтезу моделей обмоток та їх частин крім звичайних параметрів опорів R_i , L_i , C_i і обґрунтованих раніше параметрів « $-L_i$ » і « $-C_i$ » додатково параметра « $-R_i$ ».

1. Бучковський І.Р., Молнар М.М., Никонець А.Л., Никонець Л.А., Сабат М.Б. Фізические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / Под ред. Никонца Л.А. – Львов: НВФ "Українські технології", 2012. – 167 с. 2. Бубряк А.Е. Небезпечні внутрішні перенапруги на елементах комбінованої ізоляції (умови виникнення та заходи обмеження на прикладі трансформатора напруги НОМ-10): Дисертація та автореферат. – К., 2007. 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" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – 2012 – № 736. – С. 108–116. 5. Маліновський А.А., Бучковський Р.В., Никонець О.Л., Гуцин Є.Ю. Експериментальні дослідження електромагнітних процесів в обмотках трансформатора напруги

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, Никонець О. Л., студент, Гуцин Є. Ю., студент. Методи визначення параметрів елементів математичної моделі електроустаткування 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. Никонець, 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., Никонець 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