

УДК 621.318.4

COMPENSATED HIGH-VOLTAGE HIGH-FREQUENCY REACTOR

V. Brzhezytskyi, N. Laposha, I. Maslyuchenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Key words:

High-voltage high-frequency shield

Reactor

Mutual inductance

Equivalent circuit

System of equations

Elliptic integrals

Article history:

Received 14.05.2017

Received in revised form

12.06.2017

Accepted 23.06.2017

Corresponding author:

V. Brzhezytskyi

E-mail:

npuht@ukr.net

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-4-16

ABSTRACT

The article proposed a scheme of high-voltage high-frequency reactor with controlled distribution of capacitive currents. The system of equations was created to calculate voltage and current of each full loop reactor. It is shown that the use of separation capacitive and inductive circuits ensures high stability characteristics of the reactor. The conditions necessary to achieve high stability characteristics of the reactor in a wide frequency range have been analyzed. The results can be used to create high-voltage high-frequency inductors for which the inductance value would be highly stable in extended frequency bands as well as to improve the performance of high-frequency shields.

КОМПЕНСОВАНИЙ ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ВИСОКОЧАСТОТНИЙ РЕАКТОР

В.О. Бржезицький, М.Ю. Лапоша, І.М. Маслюченко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

У статті запропоновано високовольтний високочастотний реактор з регульованим розподіленням ємнісних струмів. Отримано систему рівнянь для розрахунку напруги та повного струму кожного витка реактора. Показано, що при досягненні розділення ємнісних та індуктивних кіл забезпечується висока стабільність характеристик реактора. Визначено умови, необхідні для досягнення високої стабільності характеристик реактора в широкому діапазоні частот. Результати можуть бути використані для створення високовольтних високочастотних котушок індуктивності, значення індуктивності яких були б високостабільними в розширених діапазонах частот, а також для покращення характеристик високочастотних загороджувачів.

Ключові слова: *високовольтний високочастотний загороджувач, реактор, взаємна індуктивність, схема заміщення, система рівнянь, еліптичні інтеграли.*

Постановка проблеми. Високочастотний загороджувач (ВЗ) — необхідний елемент будь-якого високочастотного каналу зв'язку по високовольтних лініях для забезпечення передачі сигналів протиаварійної автоматики, релейного захисту, телемеханіки, промодульованих високою частотою (24—1000 кГц), по фазному проводу або грозотросу [1].

Основним конструктивним елементом високочастотного загороджувача є силова котушка індуктивності (реактор), яка призначена для пропускання струму промислової частоти, що протікає по проводу лінії електропередачі, в який включено ВЗ. Реактор містить алюмінієвий (або мідний) провід, навийтий як одно-, дво- або трифазна котушка на ізолюючому каркасі [2].

При роботі загороджувача на високих частотах ємнісні розподілені струми в реакторі частково нейтралізують індуктивну складову струмів, що призводить до нестабільності характеристик високочастотних загороджувачів у широкому діапазоні частот [3].

Для запобігання подібним явищам необхідний компенсований високочастотний реактор, при якому б забезпечувалась незалежна робота ємнісної та індуктивної складових схеми заміщення котушки індуктивності в розширеному діапазоні частот [4].

Аналогічні питання виникають при розробці індуктивних елементів, які використовуються в установках для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіоперешкод [5]. До кола пов'язаних з цим питань належить регулювання розподілення електричного поля в ізоляційній конструкції котушки за допомогою профілювання границь розділу діелектриків, яка є одним із ключових завдань у техніці високих напруг при створенні високовольтних установок і пристроїв [6—9].

У зв'язку з цим постає завдання розробки компенсованого високовольтного високочастотного реактора, ємнісні та індуктивні кола якого були б відділені одне від одного, що забезпечить високу стабільність і покращення характеристик високочастотних реакторів, котушок індуктивності тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Силкові котушки індуктивності (реактори) є невід'ємними елементами високочастотних загороджувачів, які в теперішній час випускаються рядом вітчизняних і зарубіжних фірм-виробників.

Фірма Siemens [10] пропонує високочастотні загороджувачі, реактори яких виконані у герметичному (закритому) або відкритому вигляді та застосовуються в стандартизованому діапазоні параметрів. У герметичних котушках використовується алюмінієвий провід або кабель, у котушках відкритого типу — алюмінієва шина.

В [11] здійснено порівняння методів зменшення розсіювання для уникнення побічного нагрівання в соленоїдальній котушці. Для цього за допомогою методу кінцевих різниць були проведені числові розрахунки розподілення магнітного та магнітно-індукованого полів з метою оцінки їх впливу на пасивні провідники. Проведене моделювання [11] показує, що деякі елементи соленоїдальної котушки можуть мати суттєво більшу температуру порівняно з іншими (отже, відрізнятися робочою температурою).

У [12] запропоновано методи розрахунку плоских і соленоїдальних котушок мінімальних розмірів (від 1 до 5 мм) для використання у твердотільних зондах апаратури ядерного магнітного резонансу при частотах 300 та 600 МГц.

У [13] досліджено вплив втрат енергії в діелектричному каркасі та порівняно їх з втратами від вихрових струмів. Також спрогнозовано власну ємність котушки з урахуванням її геометричних розмірів і отримано експериментальні підтвердження проведеним розрахункам.

Однак у зазначених працях не приділено достатньої уваги теоретичним розрахункам характеристик силової котушки індуктивності високочастотних загороджувачів, хоча базові основи для таких розрахунків викладені в [4; 6]. Вищевикладене підтверджує, що дослідження компенсованого високочастотного реактора є актуальним.

Метою статті є обґрунтування та дослідження моделі компенсованого високочастотного реактора.

Викладення основних результатів дослідження. Реактор типу РЗ-600-0,25 [14], що використовується у процесі дослідження, являє собою соленоїд, обмотка якого виконана проводом марки А-300, число витків 22. Розрахункова модель даного реактора представлена на рис. 1.

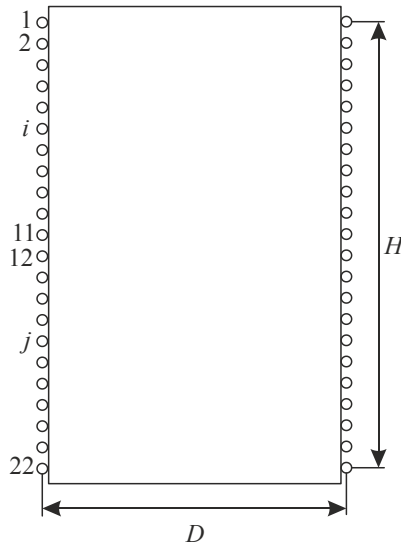


Рис. 1. Розрахункова модель реактора: H — висота реактора; D — його діаметр; цифрами 1... i ... j ...22 показані позначення витків

Для визначення параметрів реактора використовуємо загальноприйнятну схему заміщення, яка наведена на рис. 2 [15].

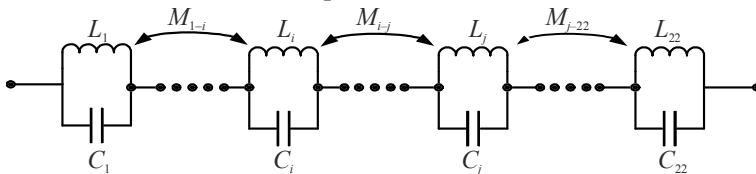


Рис. 2. Схема заміщення реактора, [15]

На рис. 2 прийняті позначення: $L_{1...L_{22}}$, — індуктивність витків реактора; M_{i-j} — взаємна індуктивність між i та j витками; $C_{1...C_{22}}$ — ємність витків за схемою заміщення [15].

За схемою рис. 2 складаємо систему рівнянь для напруг витків реактора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 j \omega L + \dot{I}_2 j \omega M_{1-2} + \dots + \dot{I}_{21} j \omega M_{1-21} + \dot{I}_{22} j \omega M_{1-22}, \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_1 j \omega M_{2-1} + \dot{I}_2 j \omega L + \dots + \dot{I}_{21} j \omega M_{2-21} + \dot{I}_{22} j \omega M_{2-22}, \\ \dots \\ \dot{U}_{21} = \dot{I}_1 j \omega M_{21-1} + \dot{I}_2 j \omega M_{21-2} + \dots + \dot{I}_{21} j \omega L + \dot{I}_{22} j \omega M_{21-22}, \\ \dot{U}_{22} = \dot{I}_1 j \omega M_{22-1} + \dot{I}_2 j \omega M_{22-2} + \dots + \dot{I}_{21} j \omega M_{22-21} + \dot{I}_{22} j \omega L, \\ \dot{U}_{\text{вх}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dots + \dot{U}_{21} + \dot{U}_{22}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\dot{U}_{\text{вх}}$ — вхідна напруга реактора; ω — кутова частота; $I_1...I_{22}$ — струми витків; L — індуктивність кругового витка; M_{i-j} — взаємна індуктивність i, j витків.

Сумарні струми по витках зведемо у систему рівнянь (2) з урахуванням індуктивних за системою (1) та ємнісних струмів, а також тангенсів кутів діелектричних втрат $C_{1...C_{22}}$ (активним опором витків реактора, за проведеними оцінками, можна знехтувати) [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_1 \cdot C_1 \cdot \omega}{\text{tg} \delta_1 - j} = \dot{I}_2 + \frac{\dot{U}_2 \cdot C_2 \cdot \omega}{\text{tg} \delta_2 - j}, \\ \dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_1 \cdot C_1 \cdot \omega}{\text{tg} \delta_1 - j} = \dot{I}_3 + \frac{\dot{U}_3 \cdot C_3 \cdot \omega}{\text{tg} \delta_3 - j}, \\ \dots \\ \dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_1 \cdot C_1 \cdot \omega}{\text{tg} \delta_1 - j} = \dot{I}_{21} + \frac{\dot{U}_{21} \cdot C_{21} \cdot \omega}{\text{tg} \delta_{21} - j}, \\ \dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_1 \cdot C_1 \cdot \omega}{\text{tg} \delta_1 - j} = \dot{I}_{22} + \frac{\dot{U}_{22} \cdot C_{22} \cdot \omega}{\text{tg} \delta_{22} - j}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Розрахункову індуктивність витка L визначаємо за формулою (3), як для кільця кругового перерізу при досить високій частоті [17]:

$$L = \mu_0 R \left[\left(1 - \frac{r^2}{4R^2} \cdot \ln \left(\frac{8R}{r} \right) + \frac{r^2}{2R^2} \right) \cdot \ln \left(\frac{8R}{r} \right) - 2 - \frac{r^2}{16R^2} \right], \quad (3)$$

де $R = D/2$ — радіус кільця; r — радіус проводу кільця; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) — магнітна стала.

Для визначення взаємної індуктивності між витками M_{i-j} використовуємо формулу для двох однакових кругових контурів, які розташовані в паралельних площинах так, що їх центри знаходяться на одній вісі [17]:

$$M = \mu_0 R f(k), \quad (4)$$

де $R = D/2$, $f(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right)K - \frac{2}{k}E$, K та E — повні еліптичні інтеграли першого та другого роду з модулем $k = \sqrt{\frac{4R^2}{h^2 + 4R^2}}$; h — відстань між центрами контурів, а значення K та E мають загальновідоме вираження (5), (6):

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2}} d\beta; \quad (5)$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2} d\beta. \quad (6)$$

Ємність витків C розраховуємо за формулою (7) для двох кругових кілець [18]:

$$C = \frac{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot R}{\ln\left(\frac{8R}{r}\right) - \frac{R}{\sqrt{R^2 + 0,25d^2}} \cdot K}, \quad (7)$$

де R — радіус кільця; r — радіус його проводу; d — відстань між центрами сусідніх кілець; K — повний еліптичний інтеграл першого роду; $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м) — діелектрична стала.

Система рівнянь (1, 2) містить 23 рівняння типу (1) та 21 рівняння типу (2) відносно невідомих $\dot{U}_1 \dots \dot{U}_{22}$ та $\dot{I}_1 \dots \dot{I}_{22}$ при заданій вхідній напрузі реактора $\dot{U}_{\text{вх}}$. Зі зростанням частоти ω індуктивні опори $X_L = \omega L$ збільшуються, а ємнісні опори $X_C = 1/\omega C$ зменшуються, що призводить до частотної залежності комплексного опору реактора $\dot{Z} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{\dot{I}_{\Sigma}}$, причому переважаючий

індуктивний характер опору реактора при низьких частотах замінюється на ємнісний при високих частотах ~ 1 МГц.

Запропоноване у [4] рішення дає змогу розділити взаємовплив індуктивних та ємнісних складових струмів у реакторі, що можна пояснити таким

чином: представимо умовно, що струм у витках $\dot{I} = \text{const} = 1e^{-j\frac{\pi}{2}}$ А. Умовна розрахункова частота $f = 10^6$ Гц. Використовуючи систему рівнянь (1), отримаємо розподіл напруги по витках реактора РЗ-600-0,25 [14], який представлений на рис. 3.

З рис. 3 видно, що напруга на витках реактора зростає від початкового значення $U_1 = 51,54$ В до максимального значення $U_{11} = U_{12} = 78,49$ В, а потім зменшується до $U_{22} = 51,54$ В.

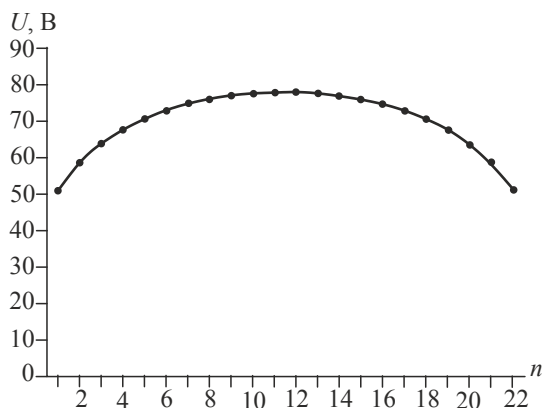


Рис. 3. Графік розподілу напруги по витках реактора залежно від номера витка n

За формулою (7) розраховуємо ємність $C_{11} = C_{12}$. «Необхідну» ємність інших витків розраховуємо за обернено пропорційними співвідношеннями згідно з розподілом напруги по витках рис. 3 (у проведених розрахунках приймаємо $\text{tg}\delta_1 = \dots \text{tg}\delta_i = \dots \text{tg}\delta_{22} = 0$). Одержаний необхідний розподіл ємностей по витках наведений на рис. 4.

Відповідне рис. 4 збільшення порівняно з $C_{11} = C_{12}$ ємностей може бути забезпечене приєднанням до реактора додаткових зосереджених ємностей (конденсаторів), профілюванням ізоляційного остова реактора [4] тощо.

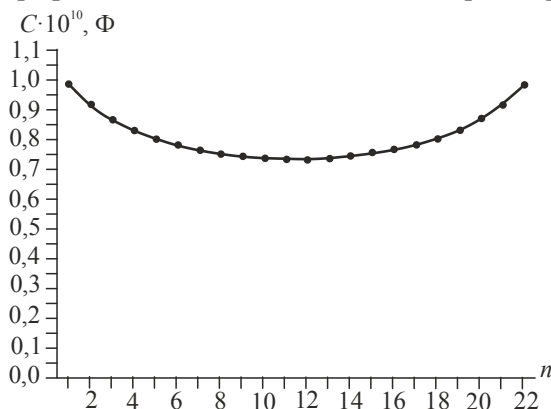


Рис. 4. Графік розподілу ємності по витках реактора залежно від номера витка n

У запропонованому випадку регулювання параметрів розглянутого реактора одержуємо розподілення напруги по витках, яке збігається з розподіленням по ємностях $C_1 \dots C_{22}$. При цьому індуктивні струми у витках є сталими і незалежними від ємнісних струмів реактора. Відносно ж розподілення напруги по витках реактора залишається незмінним при зміні частоти ω . Також незмінним зберігається розподілення «індуктивних» та ємнісних струмів у реакторі. Такий режим реактора в цілому можна визначити як «компенсований».

У подальшому, за допомогою [4] можливе розділення «індуктивних» та ємнісних струмів у реакторі, що дасть змогу реалізувати високостабільні

високовольтні високочастотні індуктивні котушки, а також покращити характеристики високочастотних загороджувачів.

Висновки

1. Розроблена система рівнянь високовольтного високочастотного реактора, що дає змогу визначити його характеристики з урахуванням ємності, індуктивності та взаємної індуктивності складових елементів.

2. Запропоновано принцип регулювання розподілення ємностей високочастотного реактора, який забезпечує розділення індуктивних та ємнісних складових струмів у реакторі, а також відсутність їх взаємовпливу.

3. Одержані результати забезпечать можливість створення високостабільних високовольтних високочастотних індуктивних котушок, а також покращення характеристик високочастотних загороджувачів.

Література

1. *Рыжавский Г.Я.* Присоединение высокочастотных каналов к линиям высокого напряжения / Г. Я. Рыжавский. — Москва : Энергия, 1978. — 88 с.
2. *Микуцкий Г.В.* Высокочастотная связь по линиям электропередачи: учебник / Г.В. Микуцкий, В. С. Скитальцев. — Москва : Энергия, 1977. — 2-е изд. — 440 с.
3. А. с. 1119182 СССР, МПК H04B3/54. Высокочастотный заградитель / Райва А.П., Московское производственное объединение «Электрозавод» им. В.В. Куйбышева. — № 3475932; заявл. 23.07.82; опубл. 15.10.84, Бюл. № 38. — 4 с.
4. Пат. 106826 Україна, МПК H04B 3/54. Високочастотний загороджувач / Бржезицький В.О., Гаран Я.О., Лапоша М.Ю.; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». — № a201510741, заявл. 30.10.2015, опубл. 10.05.2016, Бюл. № 4. — 4 с.
5. *Бржезицький В.О.* Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад / В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, М.Ю. Лапоша // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». — Харків, 2016. — № 1 (27). — С. 37—41.
6. *Бржезицький В.О.* Регулювання електричного поля високовольтної котушки за допомогою профілювання діелектрика / В.О. Бржезицький, М.Ю. Лапоша, І.М. Маслюченко, О.Р. Проценко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2016. — Т. 22, № 2. — С. 173—180.
7. *Иерусалимов М.Е.* Профилирование изоляционного остова высоковольтных делителей напряжения / М.Е. Иерусалимов, В.А. Бржезицкий, А.Р. Проценко, В.В. Захарченко // Сб. Изоляция высоковольтных электрофизических установок. — Томск, 1988. — С. 97—103.
8. *Бржезицкий В.А.* Выравнивание распределения напряженности электрического поля в элементах средств измерений высоких напряжений / В.А. Бржезицкий, О.С. Ильенко, Е.Г. Кузьмина, А.Р. Проценко и др. // Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф. «Электрофизические и прикладные вопросы высоковольтных измерений». — Запорожье, 1990. — С. 24—25.
9. *Бржезицкий В.А.* Высоковольтный широкополосный делитель напряжения с регулируемым распределением напряженности электрического поля / В.А. Бржезицкий, В.В. Захарченко, М.Е. Иерусалимов, А.Р. Проценко и др. // Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф. «Электрофизические и прикладные вопросы высоковольтных измерений». — Запорожье, 18—20 сент. 1990. — С. 25—26.
10. Высокачотатные заградители [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.energy.siemens.com/ru/pool/ru/Power-Transmission/Downloads/Line_trap_ru.pdf
11. *Park B.* Faraday shields within a solenoidal coil to reduce sample heating: Numerical comparison of designs and experimental verification. / B. Park, T. Neuberger, A.G. Webb, D.C. Bigler, C. M. Collins // Journal of Magnetic Resonance. — 2010. — Vol. 202, № 1. — P. 72—77.

12. *Rainey J.M.* Estimation and measurement of flat or solenoidal coil inductance for radiofrequency NMR coil design / J.K. Rainey, S.J. DeVries, B.D Sykes // *Journal of Magnetic Resonance*. — 2007. — Vol. 187, № 1. — P. 27—37.

13. *Harpen M.D.* Analysis of capacitive coupling and associated loss for a solenoidal magnetic resonance imaging radio-frequency coil / M.D. Harpen // *Journal of Medical Physics*. — 1989. — Vol. 16, № 2. — P. 234.

14. РД 34.48.301 Временные руководящие указания по расчету, проверке и настройке высокочастотных заградителей ВЗ-600-0,25, ВЗ-1000-0,6 и ВЗ-2000-1,2. — Москва : Энергия, 1967. — 81 с.

15. *Геллер Б.* Импульсные процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка: пер. с англ. под ред. А.К. Лоханина, В.М. Погостина. — Москва : Энергия, 1973. — 439 с.

16. *Абрамов В.Б.* Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: навч. Посібник / В.Б. Абрамов, В.О. Бржезицький, О.Р. Проценко. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 218 с.

17. *Калантаров П.* Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. — 3-е изд. — Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. — 488 с.

18. *Иоссель Ю.Я.* Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Качанов, М.Г. Струнский. — Ленинград : Энергия, 1981. — 288 с.