

В. Г. Кузнецов¹
В. В. Кучанський¹
Ю. І. Тугай¹
В. В. Шевчук¹

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВОГО НАМАГНІЧУВАННЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА НА УМОВИ РОЗВИТКУ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ

¹Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ

Описано застосування пристрою керованої комутації для вмикання однофазного автотрансформатора 750/330/15,75 кВ, потужністю 417 МВА в магістральній електричній мережі України. Основою дослідження стала розробка детальної моделі електромагнітних перехідних процесів автотрансформатора. Модель трансформатора містить точне відтворення гістерезису та залишкового намагнічування, що підтверджено за допомогою реальних осцилограм та даних виробника. У статті розглянуто застосування пристрою керованої комутації для вмикання автотрансформатора потужністю 417 МВА, напругою 750/330/15,75 кВ у магістральних електричних мережах. Розроблено методику оцінювання ступеня ризику резонансних перенапруг з урахуванням фазового кута вмикання та глибини насичення магнітопроводу. У роботі подано комплексне дослідження впливу залишкового намагнічування та кута вмикання вимикача на амплітуду й динаміку аперіодичної складової магнітного потоку під час комутації трансформаторів та автотрансформаторів високої й надвисокої напруги. Аналітично отримано залежність аперіодичної складової від миттєвого значення синусоїдальної складової та залишкового потоку, що дозволило встановити умову повної компенсації аперіодичної складової. На основі чисельних експериментів показано, що правильний вибір кута вмикання здатний практично повністю усунути аперіодичну складову, тоді як некероване вмикання формує кидки намагнічувального струму та перенапруги, амплітуда яких може бути у 200...250 разів більшою порівняно з керованими режимами. Моделювання підтвердило універсальний експоненційний характер затухання для всіх кутів вмикання та виявило домінуючий вплив початкової амплітуди. Результати демонструють критичну важливість оцінювання залишкового потоку та пофазної синхронізації моменту комутації для мінімізації перенавантажень, зниження ймовірності резонансних процесів і підвищення надійності роботи магістральних електричних мереж. Отримані залежності та запропонований алгоритм визначення оптимального кута вмикання формують теоретичну й практичну основу для впровадження пристроїв керованої комутації у мережах високої та надвисокої напруги, забезпечуючи поліпшення електромагнітної сумісності та збільшення ресурсу обладнання.

Ключові слова: автопараметричний резонанс, елегазовий вимикач, резонансні перенапруги, залишкове намагнічування, момент комутації, керований пристрій комутації.

Вступ

Після вимкнення автотрансформатора у його магнітопроводі залишається залишковий магнітний потік Φ_{res} , величина якого залежить від фази напруги в момент розриву кола, ступеня насичення магнітопроводу та симетрії процесу трифазного розмагнічування. Під час повторного вмикання, особливо у фазах, де прикладена миттєва напруга має полярність, що збігається з напрямом залишкового потоку Φ_{res} відбувається збільшення початкового магнітного потоку у відповідній гілці магнітного кола [1]—[3]. У таких умовах підсумковий потік може перевищувати номінальне значення в 1,5—2 рази, що зумовлює низку небажаних електромагнітних ефектів, а саме:

- появу значних пускових струмів намагнічування з вираженою аперіодичною складовою;
- зсув фазового кута струму відносно напруги, що спотворює початковий перехідний процес;
- виникнення високочастотних коливань між індуктивністю обмоток і ємностями елементів мережі, що створює передумови для розвитку резонансних перенапруг.

Увімкнення трансформаторів та автотрансформаторів високої і надвисокої напруги належить до найкритичніших перехідних процесів у магістральних електричних мережах. У момент комутації в осерді апарата вже може існувати певний залишковий потік Φ_{res} , який не узгоджується з миттєвими значеннями синусоїдальної складової $\Phi_{sin}(0)$, що формується напругою живлення. Така невідповідність спричиняє появу аперіодичної складової магнітного потоку $\Delta\Phi_{ap}(t)$, яка здатна вводити магнітопровід у глибоке насичення та формувати значні кидки струмів намагнічення. У деяких випадках це призводить до внутрішніх перенапруг, збудження резонансних процесів та погіршення електромагнітної сумісності у магістральних мережах 330...750 кВ.

Аперіодична складова має експоненційний характер згасання, проте її початкова амплітуда $\Delta\Phi_{ap}(0)$ визначається саме залишковим потоком та моментом комутації. Невдалий вибір кута вмикання φ_0 , особливо за наявності значного Φ_{res} , здатний збільшити амплітуду $\Delta\Phi_{ap}(0)$ у десятки й навіть сотні разів, що істотно знижує надійність роботи електрообладнання та ускладнює роботу релейного захисту. Тому коректне визначення оптимального моменту вмикання є ключовою задачею для забезпечення безпечної комутації трансформаторів надвисокої напруги (НВН).

Аналіз наукових публікацій свідчить про значну увагу до проблеми резонансних і аномальних перенапруг у магістральних мережах. У роботах [1], [3], [4], [7], [9] досліджено механізми розвитку резонансних явищ у повітряних лініях (ПЛ) НВН, включно з автопараметричними ефектами та збудженням гармонічних складових. Вплив залишкового намагнічування на перехідні процеси автотрансформаторів аналізується в [5], [6], де показано, що саме початкові умови визначають характер та інтенсивність внутрішніх перенапруг. Паралельно, у джерелах [10]—[17] запропоновано різні методи оцінювання та зменшення залишкового потоку, тоді як роботи [11], [18], [19] демонструють можливість фазоселективного вмикання для придушення кидків намагнічувального струму.

Попри значний доробок, огляд літератури виявляє низку невирішених питань. У наявних роботах відсутня чітка аналітична залежність, яка пов'язує величину залишкового потоку Φ_{res} з оптимальним моментом вмикання φ_0^* та початковою амплітудою аперіодичної складової $\Delta\Phi_{ap}(0)$. Більшість наявних методів керованої комутації ґрунтуються на емпіричних чи часткових моделях, що не враховують асиметрію по фазах, спектр попередніх комутацій та реальні умови роботи автотрансформаторів магістральних мереж. Також залишається недостатньо дослідженим питання чутливості $\Delta\Phi_{ap}(0)$ до похибок визначення оптимального кута, що суттєво впливає на практичну ефективність керованих алгоритмів комутації.

Отже, формулюється наукова прогалина: у сучасній літературі відсутній універсальний аналітичний критерій оптимального моменту вмикання трансформатора з урахуванням реального залишкового потоку, який би дозволяв гарантовано усунути або мінімізувати аперіодичну складову магнітного потоку.

У цій роботі вперше отримано формальний вираз оптимального кута вмикання

$$\sin \varphi_0^* = \frac{\Phi_{res}}{\Phi_{max}}, \quad (1)$$

побудовано узагальнені карти чутливості $|\Delta\Phi_{ap}(0)|$, а також виконано кількісну оцінку вигаду від оптимальної комутації для магістральних електричних мереж НВН, що становить теоретичну й практичну основу для подальшого розвитку систем керованої комутації.

Метою статті є оцінювання впливу залишкового намагнічування автотрансформатора на умови виникнення та розвиток резонансних перенапруг у магістральних електричних мережах, а також визначення критичних параметрів залишкового магнітного потоку та фазових умов комутації, за яких спостерігається зростання амплітуди напруги понад допустимі межі.

Результати дослідження

Відмінності формування залишкового намагнічування в однофазних і трифазних автотрансформаторах надвисокої напруги

Залишкове намагнічування автотрансформатора є ключовим фактором, що визначає амплітуду пускових струмів намагнічування та рівень комутаційних перенапруг під час повторного вмикання. У однофазному автотрансформаторі магнітна система побудована на одному стрижні, тому весь

магнітний потік замикається через нього. Це призводить до можливості накопичення залишкового потокозчеплення ψ_{res} до 70...90 % номінального значення. Унаслідок цього у разі повторного подання напруги можливе досягнення сумарного потокозчеплення, що перевищує номінальне у 1,5—2 рази, а намагнічувальний струм може досягати $10...12U_{ном}$.

У трифазному автотрансформаторі магнітні стрижні утворюють взаємопов'язану систему. Потокозчеплення кожної фази залежить від магнітних станів інших фаз, а сума потоків наближено дорівнює нулю. Тому залишкові потоки у фазах розподіляються нерівномірно, але їх максимальна величина зазвичай не перевищує 30...60 % $\psi_{ном}$. Така міжфазна асиметрія є основою виникнення резонансних і квазірезонансних перенапруг у діапазонах 95...115 Гц і 1...5 кГц. Таким чином, трифазні автотрансформатори менш критичні з погляду струмів намагнічування, але набагато чутливіші до резонансних явищ під час комутацій. Залишкове намагнічування не є аперіодичною складовою, проте воно створює початкові умови для її виникнення.

Якщо залишковий магнітний потік та миттєве значення синусоїдальної напруги в момент вмикання спрямовані в один бік, відбувається глибоке насичення осердя, а аперіодична складова потоку і струму досягає максимальних значень. Якщо ж їхні напрями протилежні, початкова амплітуда аперіодичної складової суттєво зменшується.

Отже, момент комутації та величина залишкового намагнічування є визначальними факторами, що формують рівень кидків струму, умови насичення магнітопроводу та небезпеку виникнення внутрішніх перенапруг. Аналіз часових форм магнітного потоку дає змогу чітко відокремити синусоїдальну та аперіодичну складові, що визначають характер перехідних процесів під час вмикання трансформаторів або автотрансформаторів. На рис. 1 наведено еволюцію цих трьох компонент: синусоїдальної складової $\Phi_{sin}(t)$, аперіодичної складової $\Delta\Phi_{ap}(0)$ та повного потоку $\Phi_{total}(t)$ у часі.

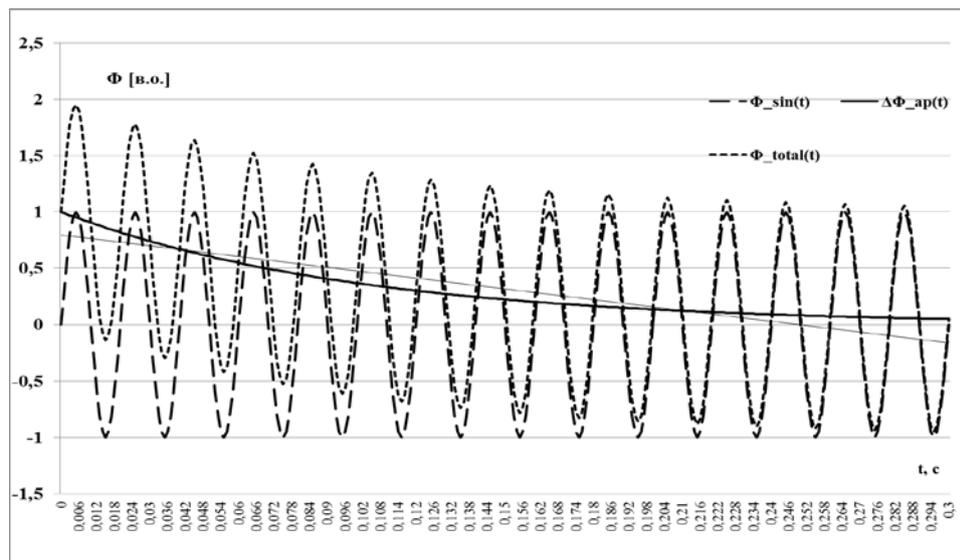


Рис. 1. Часові залежності аперіодичної $\Delta\Phi_{ap}(0)$, синусоїдальної $\Phi_{sin}(t)$ та повної $\Phi_{total}(t)$ складових магнітного потоку

Синусоїдна складова описує усталений режим намагнічування осердя. Аперіодична складова $\Delta\Phi_{ap}(t)$ виникає внаслідок фазової невідповідності між залишковим потоком у момент комутації та синусоїдальним потоком, що задається напругою мережі. Як впливає з рис. 1, ця складова має експоненційно згасальний характер і істотно впливає на форму повного магнітного потоку в початковий перехідний період. У перші кілька періодів частоти зміщення, внесене аперіодичною складовою, може бути значним, що потенційно призводить до насичення магнітопроводу та появи підвищених кидків намагнічувального струму.

Після згасання аперіодичної складової система переходить до усталеного синусоїдального режиму, в якому вплив перехідних ефектів стає незначним. Таким чином, часові залежності, показані на рис. 1, ілюструють фундаментальний механізм формування кидків струму та внутрішніх перенапруг під час комутаційних процесів у магнітоелектричних системах.

На рис. 2 проілюстровано залежність початкової амплітуди аперіодичної складової магнітного

потоків $|\Delta\Phi_{ap}(0)|$ від кута вмикання φ_0 для різних значень залишкового потоку Φ_{res} . Отримані криві демонструють, що величина аперіодичної складової визначається взаємним розташуванням миттєвого значення синусоїдального потоку $\Phi_{sin}(0)$ та залишкового потоку Φ_{res} , а саме

$$\Delta\Phi_{ap}(0) = \Phi_{res} - \Phi_{max} \sin \varphi_0, \quad (2)$$

Як випливає з рис. 2, у разі збігу полярності залишкового потоку та миттєвого значення синусоїди $\varphi_0 \approx 90^\circ$ амплітуда $|\Delta\Phi_{ap}(0)|$ досягає максимального значення. Це відповідає найгіршому випадку з погляду насичення магнітопроводу, виникнення кидків намагнічувального струму та появи внутрішніх перенапруг.

Натомість з фазами вмикання, що компенсують залишковий потік $\varphi_0 \approx -90^\circ$, амплітуда $|\Delta\Phi_{ap}(0)|$ мінімізується, що створює умови для «м'якої» комутації та значного зменшення перехідних перенавантажень.

Отже, залежності рис. 2 однозначно показують, що вибір оптимального кута вмикання для кожного конкретного значення Φ_{res} дає можливість суттєво знизити рівень аперіодичної складової потоку, а отже — ефективно обмежити кидки намагнічувального струму та мінімізувати ймовірність появи аномальних внутрішніх перенапруг.

Проведений аналіз залежності $\Delta\Phi_{ap}(0) = f(\varphi_0, \Phi_{res})$ рис. 2 показав, що амплітуда аперіодичної складової магнітного потоку лінійно зростає із збільшенням модуля залишкового потоку $|\Phi_{res}|$ за відхилення кута вмикання від оптимального значення φ_0^* , яке задовольняє умові $\sin \varphi_0^* = \frac{\Phi_{res}}{\Phi_{max}}$. Це означає, що за фіксованих умов комутації кожне збільшення $|\Phi_{res}|$ призводить до пропорційного збільшення початкової аперіодичної складової $|\Delta\Phi_{ap}(0)|$, а отже — до зростання кидків намагнічувального струму та ризику внутрішніх перенапруг.

Водночас результати моделювання підтверджують, що навіть за значних значень Φ_{res} можна практично повністю компенсувати аперіодичну складову шляхом вибору кута вмикання φ_0 відповідно до співвідношення $\sin \varphi_0^* = \frac{\Phi_{res}}{\Phi_{max}}$. Отже, залишковий потік сам по собі не є критичним чинником, але за відсутності керованої комутації він істотно підвищує чутливість системи до фазового положення напруги в момент вмикання. Це обґрунтовує доцільність впровадження пристроїв керованої комутації з вимірюванням або оцінюванням Φ_{res} для мінімізації аперіодичної складової та пов'язаних з нею перенавантажень.

На рис. 3 подано часові залежності аперіодичної складової магнітного потоку $\Delta\Phi_{ap}(t)$ для різних значень кута вмикання φ_0 за умови фіксованого залишкового потоку $\Phi_{res} = 1,0$. Як випливає з рис. 3, для всіх досліджуваних значень φ_0 аперіодична складова має експоненційно згасальний характер, що описується законом

$$\Delta\Phi_{ap}(t) = \Delta\Phi_{ap}(0) e^{-t/\tau}. \quad (3)$$

Водночас визначальним чинником є початкова амплітуда

$$\Delta\Phi_{ap}(0) = \Phi_{res} - \Phi_{max} \sin \varphi_0. \quad (4)$$

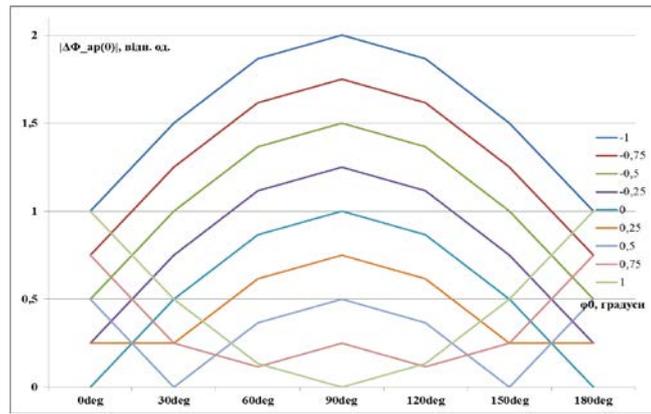


Рис. 2. Залежність початкової амплітуди аперіодичної складової $|\Delta\Phi_{ap}(0)|$ від кута вмикання φ_0 для різних значень залишкового потоку Φ_{res}

Вплив фази комутації на початкову амплітуду аперіодичної складової струму

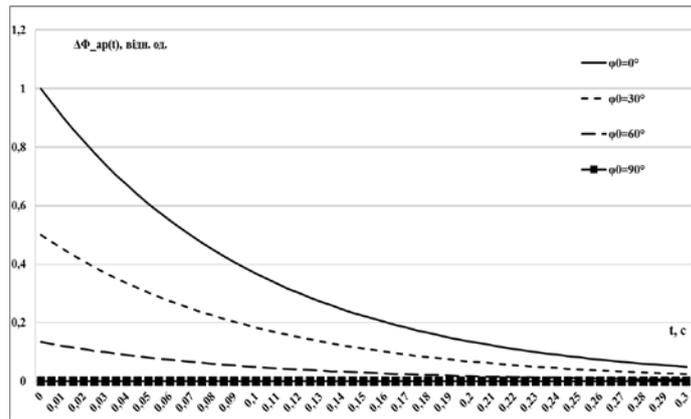


Рис. 3. Часові залежності аперіодичної складової магнітного потоку

Для кутів φ_0 , за яких миттєве значення синусоїдального потоку є співнапрявленим із залишковим потоком, початкова аперіодична складова досягає максимальних значень, що відповідає найнебезпечнішим режимам глибокого насичення магнітопроводу та максимальних кидків намагнічувального струму.

Натомість з наближенням φ_0 до оптимального значення, що задовольняє умові $\sin \varphi_0 \approx \Phi_{res} / \Phi_{max}$, початкова аперіодична складова істотно зменшується, і процес намагнічування відбувається у «м'якому» режимі.

Таким чином, подані залежності наочно демонструють, що характер затухання $\Delta\Phi_{ap}(t)$ у часі є однаковим для всіх φ_0 (визначається параметром τ), проте рівень початкових перенавантажень принципово залежить від кута вмикання, що є ключовим аргументом на користь застосування керованої комутації з урахуванням залишкового намагнічування.

Для моделювання перехідних процесів розроблено нелінійну модель автотрансформатора в середовищі *MATLAB/Simulink* з урахуванням магнітної характеристики $L(\Phi)$ та залишкового потоку Φ_{res} . Вплив залишкового намагнічування оцінювався за такими параметрами: кут вмикання α ; величина Φ_{res} / Φ_{max} ; еквівалентна ємність мережі C_{eq} .

Розрахунок залишкового потоку після вимкнення

$$\Phi_{res} = \Phi_{max} e^{-t_{off} / \tau_m} \cos(\omega t_{off} + \varphi), \quad (5)$$

де τ_m — стала часу розмагнічування.

Побудова характеристики $L(\Phi)$ — експериментальна або за даними паспортної кривої намагнічування. Чисельне інтегрування рівнянь комутації у *MATLAB/Simulink* або *PSCAD* з урахуванням нелінійності та залишкових умов.

Критерієм резонансної небезпеки вибрано коефіцієнт резонансної чутливості

$$K_{res} = \frac{U_{max}(\Phi_{res})}{U_{nom}}, \quad (6)$$

де $K_{res} > 1,3$ вказує на ймовірність небезпечних перенапруг.

Моделювання автотрансформатора типу АОТДЦТН-417 МВА (750/330 кВ) показало:

- якщо $\Phi_{res} = 0,4$, $\Phi_{ном}$ і $\alpha_0 = 0^\circ$, то амплітуда напруги на стороні 330 кВ зростає до $1,6U_{ном}$,
- якщо фаза вмикання, зміщена на $\alpha_0 = 90^\circ$, то перенапряга не перевищує $1,1U_{ном}$,
- частота власних коливань системи зміщується у зону 10...120 Гц, що збігається з гармоніками комутаційної напруги, підвищуючи ймовірність резонансного збудження.

Моделювання електромагнітних процесів в автотрансформаторі типу АОТДЦТН-417 МВА (750/330 кВ) виконано з урахуванням нелінійної характеристики намагнічування сталі, залишкового магнітного потоку Φ_{res} ємнісних параметрів мережі та фазового кута вмикання α_0 . Отримані результати свідчать про суттєвий вплив залишкового намагнічування на розвиток резонансних коливань і перенапруг [4]—[6].

1. Вплив значення залишкового потоку. У разі залишкового потоку $\Phi_{res} = 0,4$, $\Phi_{ном}$ і фази вмикання $\alpha_0 = 0^\circ$ (тобто коли полярність прикладеної напруги збігається з напрямом залишкового потоку), підсумковий магнітний потік у сталі в початковий момент перевищує номінальне значення майже у 1,8 рази. Це призводить до зростання пускового струму намагнічування та появи

перенапруги на стороні 330 кВ до рівня $1,6U_{\text{ном}}$. Характер кривої напруги має виражену аперіодичну складову з подальшими коливаннями, спричиненими взаємодією індуктивності обмоток і міжфазної ємності лінії.

2. Вплив фазового кута вмикання. Зміщення моменту вмикання до $\alpha_0 = 90^\circ$ (тобто коли прикладена напруга має полярність, протилежну залишковому потоку) істотно зменшує різницю між миттєвими потоками в магнітопровод. У цьому випадку амплітуда комутаційної перенапруги не перевищує $1,1U_{\text{ном}}$, а струм намагнічування обмежується величиною $0,4...0,5I_{\text{ном}}$. Це свідчить про ефективність вибору оптимального моменту комутації як засобу зниження перенапруг.

3. Частотні характеристики процесу. Аналіз спектрального складу напруги показав, що за великих залишкових потоків і малих фазових кутів вмикання власна частота коливань системи зміщується у діапазон 100...120 Гц. Ця зона збігається з гармоніками комутаційної напруги, що створює умови для резонансного збудження коливань у колі «обмотка – ємність мережі». Внаслідок цього спостерігається накопичення енергії в ємнісних елементах і збільшення амплітуди напруги до небезпечних рівнів.

4. Вплив о активного опору та демпфування. Урахування активних втрат у магнітопроводі та опору обмоток знижує амплітуду коливань, однак навіть при коефіцієнті демпфування 0,15...0,2 рівень напруги залишається вище $1,3U_{\text{ном}}$, якщо $\Phi_{\text{res}} > 0,3\Phi_{\text{ном}}$. Це свідчить, що власне демпфування системи не забезпечує гасіння резонансних коливань без застосування спеціальних керованих засобів комутації.

5. Практичний ефект керованого вмикання. Імітація роботи пристрою керованого вмикання (ПКК) з точністю синхронізації ± 1 мс показала, що в разі вибору оптимального моменту комутації амплітуда перенапруг знижується до $1,05...1,1U_{\text{ном}}$, навіть якщо залишковий потік $0,5\Phi_{\text{ном}}$. Це підтверджує ефективність технології керованого вмикання як основного методу мінімізації впливу залишкового намагнічування.

Узагальнення впливу залишкового намагнічування та фази вмикання на основні параметри перенапруг подано в таблиці. У випадку коли $\Phi_{\text{res}} > 0,3\Phi_{\text{ном}}$ і кути $\alpha_0 < 30^\circ$ відбувається суттєве зростання амплітуди напруги та зсув власної частоти системи в діапазон 100...120 Гц, що збігається з гармоніками комутаційної напруги. Оптимальним для мінімізації резонансних коливань є вмикання при фазі $\alpha_0 \approx 90^\circ$ або застосування керованих комутаційних пристроїв, які забезпечують нульову різницю між миттєвими потоками у момент включення.

Вплив залишкового намагнічування осердя автотрансформатора та фази вмикання на значення характеристик перенапруг

№	Залишковий потік $\Phi_{\text{res}}/\Phi_{\text{ном}}$	Кут вмикання $\alpha_0, ^\circ$	Амплітуда напруги $U_{\text{max}}/U_{\text{ном}}$	Частота власних коливань, Гц	Характер перехідного процесу	Оцінка ризику виникнення резонансних перенапруг
1	0,1	0	1,05	78	Перехід плавний, без коливань	Низький
2	0,3	45	1,25	95	Легке насичення, короточасні коливання	Помірний
3	0,4	0	1,6	105	Глибоке насичення, аперіодичний струм, коливальний процес	Високий (резонанс)
4	0,4	90	1,1	79	Стабілізований режим, без наростання амплітуди	Низький
5	0,5	0	1,7	100	Стойке резонансне збудження, сплески напруги	Критичний (умова повного резонансу)
6	0,5	90	1,05	150	Кероване вмикання, струм обмежений	Безпечний

Результати, подані у таблиці, демонструють системний вплив залишкового потікозчеплення $\Psi_{\text{рез}}$ та фазового кута комутації α на амплітуди післякомутаційних перенапруг, а також на динаміку перехідного процесу в автотрансформаторі 750/330/15,75 кВ. Очевидно з отриманих даних, взаємодія залишкового намагнічування осердя та моменту прикладання напруги формує умови, які

можуть сприяти різкому зростанню як струмів намагнічування, так і внутрішніх перенапруг.

За малих значень залишкового потокозчеплення $|\psi_{\text{рез}}| < 0,1\psi_{\text{ном}}$ автотрансформатор перебуває у близькому до симетричного магнітному стані, і зміна потокозчеплення після вмикання формується переважно прикладеною напругою. В таких умовах перехідний процес є порівняно м'яким: максимальні перенапруги не перевищують $1,10\dots1,20U_{\text{ном}}$, а струм намагнічування утримується в межах 2—3 номінальних амплітуд. Цей режим відповідає найменшій енергії перехідного процесу та практично виключає збудження низькочастотних мод коливань у діапазоні 95...115 Гц.

Проте, зі збільшенням залишкового потоку до 20...40 % від номінального $\psi_{\text{рез}} = 0,2\dots0,4\psi_{\text{ном}}$ характер комутації змінюється принципово. Осердя автотрансформатора наближається до зони донасичення, і навіть невеликий додатковий приріст потокозчеплення, який виникає у момент подачі напруги, може призвести до переходу на нелінійну частину кривої намагнічування. Це викликає:

- різке зниження індуктивності магнітної системи;
- значне зростання амплітуди аперіодичної складової струму;
- можливе збудження підгармонійних коливань;
- появу пікових перенапруг рівнем $1,4\dots1,6U_{\text{ном}}$.

Отже, залишковий потік визначає енергетичний запас у магнітному колі, який впливатиме на розвиток перехідного процесу після комутації. Найкритичнішим є випадок, коли полярність залишкового потокозчеплення протилежна прикладеній напрузі у момент вмикання, а фазовий кут комутації становить приблизно 90° . У цьому режимі виконується умова максимального приросту потокозчеплення

$$\Delta\psi_{\text{max}} = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u(t)dt, \quad (7)$$

яке, сумоване із залишковим потоком, приводить до сумарного потокозчеплення понад 150...200 % номінального. Магнітопровід переходить у стан глибокого насичення, індуктивність падає у 3—5 разів, а швидкість зміни магнітного потоку стає нелінійною. У результаті:

- струм намагнічування може перевищувати номінальний у 6—8 разів,
- амплітуда першого максимуму перенапруги сягає $1,4\dots1,6U_{\text{ном}}$,
- збуджується квазірезонанс в межах 95...115 Гц,
- характер затухання коливань набуває повільного, квазірезонансного типу.

Аналіз таблиці показує, що саме поєднання (а не окремих вплив) двох факторів — великого залишкового потокозчеплення і несприятливого моменту вмикання — зумовлює появу перенапруг небезпечного рівня. Якщо враховувати лише фазу комутації без контролю за $\psi_{\text{рез}}$, система може бути помилково визнана «безпечною» до вмикання, що в реальному режимі призведе до перевищення допустимих меж напруги на 20...40 %.

Дані таблиці показують, що перенапруги після вмикання автотрансформатора визначаються поєднанням величини та полярності залишкового потоку й фазового кута комутації. Оптимальні моменти вмикання мінімізують як струми намагнічування, так і перенапруги, тоді як невдалі комбінації $\psi_{\text{рез}}$ та α можуть збільшувати амплітуди перенапруг до $1,6\dots1,8U_{\text{ном}}$ і сприяти розвитку резонансних коливань. Це підтверджує необхідність використання пристроїв керованої комутації з блоком точного визначення $\psi_{\text{рез}}$.

Висновки

Результати моделювання показали, що після вимкнення автотрансформатора у його магнітопроводі залишається залишковий потік $\Phi_{\text{рез}}$, який істотно впливає на амплітуду перехідних процесів у разі повторного вмикання. У випадку коли значення $\Phi_{\text{рез}} > 0,3\Phi_{\text{ном}}$ та фази вмикання $\alpha_0 < 30^\circ$ спостерігається зростання амплітуди напруги до $1,5\dots1,7U_{\text{ном}}$ і поява аперіодичних коливань, що створюють передумови для розвитку резонансних перенапруг (табл.). У випадку великих залишкових потоків насичення магнітопроводу змінює ефективну індуктивність обмоток, що призводить до зміщення власної частоти системи у діапазон 100...120 Гц — зону збігу з гармоніками резонансних перенапруг. Коли фаза вмикання $\alpha_0 \approx 90^\circ$ або за використання ПКК з точністю синхронізації ± 1 мс

амплітуда комутаційних перенапруг не перевищує $1,05 \dots 1,1 U_{\text{ном}}$ навіть, якщо залишковий потік $0,5\Phi$. Це свідчить про високу ефективність технології синхронізованого вмикання у зниженні рівня електромагнітних перенапруг у мережах надвисокої напруги.

Проведені аналітичні та чисельні дослідження підтверджують, що залишковий потік та кут вмикання є ключовими параметрами, які визначають амплітуду та динаміку аперіодичної складової магнітного потоку. Правильний вибір Φ_0^* , визначений з урахуванням Φ_{res} , дозволяє практично повністю усунути перехідні перенавантаження, тоді як некероване вмикання може збільшувати $|\Delta\Phi_{\text{ap}}(0)|$ на два порядки. Це обґрунтовує необхідність широкого застосування пристроїв керованої комутації в мережах високої та надвисокої напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] V. Kuchanskyu, "Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines," *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 4, с. 51-54, 2016.
- [2] I. Hunko, V. Kuchanskyi, A. Nesterko, and O. Rubanenko, *Modes of Electrical Systems and Grids with Renewable Energy Sources*. LAMBERT Academic Publishing, 2019, p. 184, ISBN 978-613-9-88956-3.
- [3] В. Г. Кузнецов, В. В. Кучанський, і Ю. І. Тугай, «Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг,» *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, зб. наук. пр., № 31, с. 5-11, 2012.
- [4] Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський, і Р. В. Пляшко, «Дослідження впливу параметрів ЛЕП НВН на аномальні перенапруги,» *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, № 37, с. 17-21, 2014.
- [5] V. Kuchanskyu, and O. Rubanenko, "Influence assessment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage," *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, no. (83) 3, pp. 233-250, 2020.
- [6] Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський, і Ю. Г. Лиховид, «Вплив початкових умов на перехідні процеси при комутаціях автотрансформаторів,» *Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"*, № 203, с. 59-60, 2019.
- [7] V. Kuchanskyu, O. Rubanenko, and I. Hunko, "Autoparametric self-excitation of even harmonics in extra high voltage transmission lines," in *Proceedings of the 2021 IEEE Power & Energy Society / Industry Applications Society PowerAfrica Conference*, 2021, pp. 1-5.
- [8] В. В. Кучанський, і Д. О. Малахатка, *Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж*, моногр. Вінниця, Україна: ГО «Європейська наукова платформа», 2021, 120 с., <https://doi.org/10.36074/ztzpermrm-monograph>.
- [9] В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, і В. В. Кучанський, *Аномальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень*, моногр. Одеса, Україна: Вид. дім "Тельветика", 2025, 170 с. <https://doi.org/10.35668/978-617-554-449-5>.
- [10] C. Wei, X. Li, M. Yang, Z. Ma, and H. Hou, "Novel remanence determination for power transformers based on magnetizing inductance measurements," *Energies*, no. 12 (24), Art. no. 4616, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12244616>.
- [11] N. Chiesa, and H. K. Høidalen, "Novel approach for reducing transformer inrush currents: laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2609-2616, 2010.
- [12] Y. M. Xing, J. Luo, J. P. Zhou, Z. B. Xiong, and M. Cai, "Estimation of remanence in transformer core," *Power System Technology*, no. 35, pp. 169-172, 2011.
- [13] Q. Wang, Y. Ren, Y. Wang, C. Liu, and S. Wu, "Residual flux measurement of single-phase transformers based on equivalent resistance," *ACES Journal*, no. 38 (7), pp. 539-548, 2023.
- [14] E. Cardelli, A. Faba, and F. Tissi, "Prediction and control of transformer inrush currents," *IEEE Transactions on Magnetics*, no. 51 (3), pp. 1-4, 2015.
- [15] W. Q. Ge, Y. H. Wang, X. G. Chen, S. X. Xiao, X. G. Yang, and D. N. Lv, "Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core," *Transactions of China Electrotechnical Society*, no. 30, pp. 10-16, 2015.
- [16] F. B. Tao, G. Zhang, J. S. Li, C. Wei, Y. C. Lu, and P. Wu, "Remanent magnetism estimation of transformer core based on local hysteresis loop slope," *Transformer*, no. 56, pp. 27-33, 2019.
- [17] Y. Corrodi, K. Kamei, H. Koyama, H. Ito, and T. Goda, "Influence of system transients on the residual flux of an unloaded transformer," in *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, Jul. 24-28, 2011, pp. 1-7.
- [18] Z. Chang, Z. Zhang, W. Tan, and G. Song, "A novel phase-selective switching method for suppressing magnetizing inrush current in Dyn11 distribution transformers," in *Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Power Systems and Smart Grid Technologies (PSSGT)*, 2025, pp. 61-65.
- [19] J. Mitra, X. Xu, and M. Benidris, "Reduction of three-phase transformer inrush currents using controlled switching," *IEEE Transactions on Industry Applications*, no. 56 (1), pp. 890-897, 2020.
- [20] K. Zhu, and P. W. T. Pong, "Curved trapezoidal magnetic flux concentrator design for current measurement of multi-core power cable with magnetic sensing," *IEEE Transactions on Magnetics*, no. 55 (4), pp. 1-9, 2019.

Рекомендована оргкомітетом міжнародної науково-технічної конференції
«Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)»

Стаття надійшла до редакції 12.12.2025

Кузнецов Володимир Григорович — д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання;

Кучанський Владислав Володимирович — д-р техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Тугай Юрій Іванович — д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання;

Шевчук Віталій Вадимович — д-р філософії, науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання.

Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ

V. G. Kuznetsov¹
V. V. Kuchansky¹
Yu. I. Tugai¹
V. V. Shevchuk¹

Evaluation of Autotransformer Residual Magnetization Impact on the Conditions of Resonant Over Voltages Development

¹National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Electrodynamics, Kyiv

The article describes the use of a controlled switching device for switching on a single-phase autotransformer 750/330/15.75 kV, with a capacity of 417 MVA in the main electrical network of Ukraine. The basis of the study was the development of a detailed model of electromagnetic transients of the autotransformer. The transformer model contains an accurate reproduction of hysteresis and residual magnetization, which was confirmed using real oscillograms and manufacturer's data. The article considers the use of a controlled switching device for switching on an autotransformer with a capacity of 333 MVA, with a voltage of 750/330/15.75 kV in main electrical networks. A methodology for assessing the degree of risk of resonant overvoltages, taking into account the phase angle of switching on and the depth of saturation of the magnetic core, has been developed. The paper presents a comprehensive study of the influence of residual magnetization and the switch-on angle on the amplitude and dynamics of the aperiodic component of the magnetic flux during switching of high and extra-high voltage transformers and autotransformers. The dependence of the aperiodic component on the instantaneous value of the sinusoidal component and the residual flux was analytically obtained, which allowed establishing the condition for complete compensation of the aperiodic component. Based on numerical experiments, it is shown that the correct choice of the switch-on angle is able to almost completely eliminate the aperiodic component, while uncontrolled switching generates magnetizing current and overvoltage spikes, the amplitude of which can be 200...250 times greater compared to controlled modes. The modeling confirmed the universal exponential nature of the damping for all switch-on angles and revealed the dominant influence of the initial amplitude. The results demonstrate the critical importance of residual flux estimation and phase-by-phase synchronization of the switching moment for minimizing overloads, reducing the probability of resonance processes, and increasing the reliability of the main electrical networks. The obtained dependencies and the proposed algorithm for determining the optimal switching angle form a theoretical and practical basis for the implementation of controlled switching devices (CSDs) in high and extra-high voltage networks, ensuring improved electromagnetic compatibility and extending the equipment life.

Keywords: autoparametric resonance, SF₆ circuit breaker, resonant overvoltages, residual magnetization, switching instant, controlled switching device.

Kuznetsov Volodymyr H. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Senior Scientific Researcher of the Department of Power Supply Systems Optimization;

Kuchansky Vladyslav V. — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department of Power-Supply Systems Optimization; e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Tugai Yuriy I. — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Leading Research Fellow of the Department of Power-Supply Systems Optimization;

Shevchuk Vitaliy V. — PhD, Research Fellow of the Department of Power-Supply Systems Optimization