УДК 621.311.1.001.57

В. Г. Кузнецов, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Кучанський, д-р техн. наук, проф.; Ю. І. Тугай, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Шевчук, д-р філос. наук

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ МОМЕНТУ ВИМКНЕННЯ НЕНАВАНТАЖЕНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА НА ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАМАГНІЧУВАННЯ

У статті розглянуто електромагнітний перехідний процес під час вимкнення ненавантаженого автотрансформатора 750/330/15,75 кВ та формування залишкового намагнічування його осердя. Актуальність роботи зумовлена тим, що під час аналізу повторного вмикання силових автотрансформаторів залишковий магнітний потік часто задається як наперед прийнята початкова умова без урахування попереднього процесу вимкнення. Зроблено літературний огляд в якому конкретно показано прогалина в дослідженнях, які пов'язані з оцінюванням впливу моменту вимкнення автотрансформатора на умови розвитку та існування резонансних перенапруг. Для автотрансформаторів надвисокої напруги такий підхід є недостатнім, оскільки значення і знак залишкового потоку залежать від фактичного моменту розмикання вимикача, нелінійної характеристики намагнічування, ємностей обмоток і післякомутаційних коливань. Встановлено залежності між кутом вимкнення ненавантаженого автотрансформатора та залишковим магнітним потоком у його осерді. Розглянуто розрахункову схему, що включає еквівалентну систему 750 кВ, вимикач, нелінійну гілку намагнічування та еквівалентні ємності обмоток високої, середньої і низької напруги. Електромагнітний процес описано через потокозчеплення, струм намагнічування та післякомутаційну вільну складову. Залишковий магнітний потік визначено як кінцеве значення потокозчеплення після затухання перехідного процесу. Показано, що нормований залишковий потік є функцією кута вимкнення. За зміни кута вимкнення в межах півперіоду змінюється не лише величина, а й знак залишкового намагнічування. В околі певних кутів вимкнення залишковий потік зменшується до мінімальних значень, тоді як за інших моментів комутації його модуль може зростати. Підтверджено, що залишковий потік не доцільно задавати довільно під час моделюванні повторного вмикання. Наукова новизна роботи полягає у розгляді залишкового намагнічування як результату попереднього вимкнення, а не як умовно заданого параметра. Отримана залежність може бути використана як початкова характеристика для подальшого аналізу струмів намагнічування, насичення осердя та перенапруг на обмотках 330 і 15,75 кВ під час наступної комутації автотрансформатора.

***Ключові слова**: ненавантажений автотрансформатор, залишкове намагнічування, залишковий магнітний потік, потокозчеплення, момент вимкнення, струм намагнічування, електромагнітний перехідний процес, керована комутація.*

Вступ

У більшості практичних підходів до керованої комутації трансформаторів основна увага приділяється вибору моменту вмикання з метою зменшення кидка струму намагнічування. Водночас для автотрансформаторів 750/330/15,75 кВ важливим є ширший підхід, у якому розглядається повний комутаційний цикл: вимкнення, формування залишкового потоку, повторне вмикання та виникнення перенапруг на обмотках різних класів напруги. Такий підхід дозволяє встановити причинний зв'язок між моментом вимкнення і параметрами наступного перехідного процесу:

$$\beta_{off} \rightarrow \Phi_{зал} \rightarrow \alpha_{on} \rightarrow \Phi_{\max}, i_{\mu,\max}, U_{330,\max}, U_{15.75,\max} \quad (1)$$

де β_{off} – момент вимкнення автотрансформатора, $\Phi_{зал}$ – залишковий магнітний потік в осерді, α_{on} – момент наступного вмикання, $\Phi_{\max}$ – максимальний магнітний потік після вмикання,

$i_{\mu,max}$ – максимальний струм намагнічування, $U_{330,max}, U_{15.75,max}$ – максимальні напруги на обмотках середньої та низької напруги. Значення $\Phi_{зал}$ характеризує результат попереднього вимкнення, тоді як Φ_{max}, $i_{\mu,max}$, $U_{330,max}$ та $U_{15.75,max}$ характеризують небезпечність наступного вмикання.

Питання формування залишкового магнітного потоку під час вимкнення трансформаторів розглянуто в роботах [1 – 9]. У [1] показано можливість цілеспрямованого впливу на залишковий потік шляхом керованого вимкнення силових трансформаторів. У [2 – 4] досліджено післякомутаційний процес, який виникає після відключення ненавантаженого трансформатора і визначає кінцеве значення залишкового намагнічування. У [5, 8, 9] розглянуто методи визначення залишкового потоку за результатами вимірювання або інтегрування напруги під час вимкнення. Роботи [10 – 14] присвячені перехідним напругам, струму зрізу, впливу ємностей та параметрів вимикача під час комутації ненавантаженого автотрансформатора. Узагальнені рекомендації щодо керованої комутації трансформаторів наведено в документах CIGRE [15]. Разом з тим для автотрансформаторів 750/330/15,75 кВ недостатньо дослідженим залишається зв'язок між кутом вимкнення та значення і знаком залишкового магнітного потоку, що й визначає актуальність цієї роботи.

Проблема анормальних і резонансних перенапруг у магістральних електричних мережах надвисокої напруги розглядалася в попередніх роботах авторів [16 – 26]. У роботах [16, 19] досліджено умови виникнення резонансних перенапруг в анормальних режимах ЛЕП НВН та показано істотний вплив параметрів ліній, режиму мережі й початкових електромагнітних умов на розвиток перехідних процесів. У працях [18, 20] запропоновано використання штучних нейронних мереж для визначення характеристик анормальних перенапруг, що дозволяє підвищити ефективність аналізу складних режимів.

Питання керованої комутації в магістральних електричних мережах розглянуто в роботі [17], де обґрунтовано доцільність застосування елегазових вимикачів із керуванням моментами замикання та розмикання для обмеження комутаційних перенапруг. Цей напрям безпосередньо пов'язаний із цією статтею, оскільки момент вимкнення автотрансформатора розглядається як фактор, що визначає формування залишкового магнітного потоку.

Окрему увагу в попередніх роботах приділено комутаційним процесам автотрансформаторів. У [21] показано, що початкові умови істотно впливають на характер перехідних процесів при комутаціях автотрансформаторів. У [25] досліджено вплив залишкового намагнічування автотрансформатора на умови розвитку резонансних перенапруг. У цих працях залишковий магнітний потік розглядався переважно як початкова умова або як фактор, що впливає на подальший розвиток перенапруг.

У роботах [22 – 24, 26] узагальнено результати досліджень складних електромагнітних процесів у мережах надвисокої напруги, зокрема автопараметричного самозбудження гармонік, анормальних перенапруг, комутацій ЛЕП НВН та автотрансформаторів. Водночас механізм формування залишкового магнітного потоку саме під час вимкнення ненавантаженого автотрансформатора залишався недостатньо розкритим.

Таким чином, попередні роботи [16 – 26] сформували теоретичну основу для аналізу анормальних перенапруг, керованої комутації, впливу початкових умов і залишкового намагнічування автотрансформаторів. Водночас у цих дослідженнях залишковий магнітний потік переважно розглядався або як початкова умова, або як фактор, що впливає на розвиток подальших перенапруг.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу моменту вимкнення ненавантаженого автотрансформатора 750/330/15,75 кВ на значення та знак залишкового магнітного потоку в осерді, а також оцінювання впливу сформованого залишкового намагнічування на електромагнітні перехідні процеси, струми намагнічування і

перенапруги під час наступного вмикання.

Результати дослідження

У роботі розглядається ненавантажений автотрансформатор 750/330/15,75 кВ, який комутується з боку обмотки 750 кВ. Сторони 330 кВ і 15,75 кВ не мають навантаження, однак їх напруги аналізуються як вихідні параметри перехідного процесу. Враховується, що автотрансформатор має нелінійну магнітну характеристику, а кожна фаза після вимкнення може мати власне значення залишкового потоку:

$$\Phi_{зал} = \begin{bmatrix} \Phi_{зал,A} \\ \Phi_{зал,B} \\ \Phi_{зал,C} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Цей вектор характеризує магнітний стан автотрансформатора перед наступним вмиканням. Оскільки фази мають різні миттєві значення напруги та струму намагнічування, а полюси вимикача можуть розмикатися не абсолютно одночасно, залишкові потоки в окремих фазах можуть відрізнятися як за значенням, так і за знаком:

$$\Phi_{зал,A} \neq \Phi_{зал,B} \neq \Phi_{зал,C} \quad (3)$$

Це є важливим для подальшого аналізу, оскільки наступне вмикання автотрансформатора відбувається за ненульових та, як правило, несиметричних початкових умов. Для дослідження процесу формування залишкового намагнічування під час вимкнення ненавантаженого автотрансформатора використано розрахункову схему, наведену на рис. 1. Схема враховує еквівалентну систему живлення 750 кВ, вимикач з пофазними полюсами, нелінійну гілку намагнічування автотрансформатора та еквівалентні ємності його обмоток.

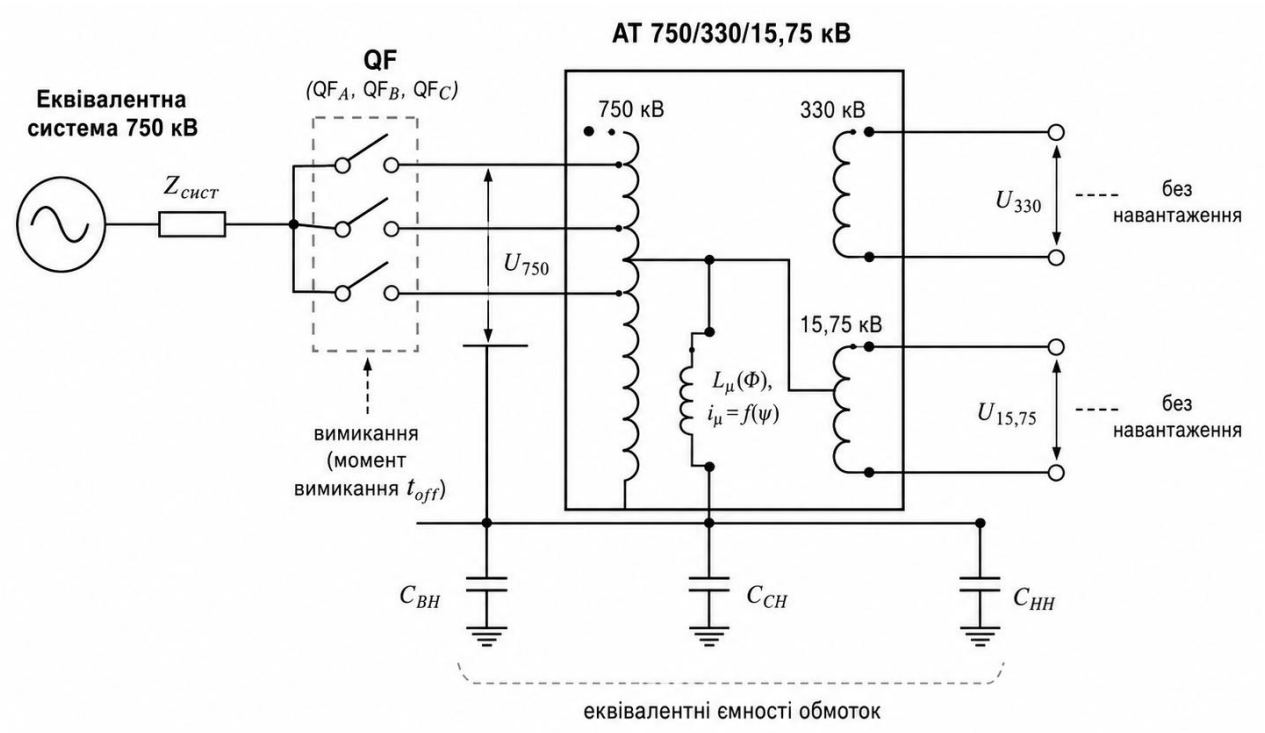


Рис. 1. Розрахункова схема вимкнення ненавантаженого автотрансформатора 750/330/15,75 кВ

На рис. 1 автотрансформатор 750/330/15,75 кВ представлено у вигляді багатообмоткової схеми з нелінійною гілкою намагнічування $L_\mu(\Phi)$, струм у якій визначається характеристикою $i_\mu = f(\psi)$. Вимкнення здійснюється з боку обмотки 750 кВ за допомогою

вимикача QF, полюси якого можуть мати власні моменти розмикання $t_{off,A}, t_{off,B}, t_{off,C}$. Обмотки 330 кВ та 15,75 кВ у розглянутому режимі є ненавантаженими, однак їх ємності та електромагнітний зв'язок з обмоткою 750 кВ впливають на післякомутаційний перехідний процес. Еквівалентні $C_{\text{ВН}}, C_{\text{СН}}, C_{\text{НН}}$ враховують ємності обмоток, вводів, ошиновки та приєднаного обладнання відносно землі. Після розмикання вимикача енергія, накопичена в магнітній системі автотрансформатора та ємностях обмоток, визначає характер вільного післякомутаційного процесу. У результаті цього процесу після його затухання в осерді формується залишковий магнітний потік $\Phi_{зал}$, величина і знак якого залежать від фактичного моменту вимкнення.

Таким чином, задача дослідження складається з двох послідовних етапів. На першому етапі необхідно визначити, як момент вимкнення ненавантаженого автотрансформатора впливає на формування залишкового магнітного потоку в кожній фазі. Для цього момент вимкнення задається відносно фазної напруги або струму намагнічування:

$$\beta_{off} = \omega t_{off} \tag{4}$$

де β_{off} – кут вимкнення. Для різних значень β_{off} визначаються залишкові потоки:

$$\begin{aligned} \Phi_{залA} &= f_A(\beta_{off}) \\ \Phi_{залB} &= f_B(\beta_{off}) \\ \Phi_{залC} &= f_C(\beta_{off}) \end{aligned} \tag{5}$$

Фактичний момент вимкнення при цьому доцільно розглядати не як момент подачі команди на вимикач, а як момент остаточного припинення струму у відповідній фазі:

$$t_{off,k} = t_{cmd,k} + t_{mech,k} + t_{arcf,k} \tag{6}$$

де $t_{cmd,k}$ – момент подачі команди на вимкнення; $t_{mech,k}$ – механічний час спрацювання полюса вимикача; $t_{arcf,k}$ – час існування дуги до остаточного згасання струму.

На другому етапі досліджується повторне вмикання автотрансформатора за наявності сформованого залишкового потоку. Для кожної фази потокозчеплення після вмикання може бути подане як:

$$\psi_k(t) = \psi_{зал,k} + \int_0^t \left[u_k(t) - R_k i_{\mu k}(t) \right] dt, \qquad k = A, B, C \tag{7}$$

де $\psi_{зал,k}$ – залишкове потокозчеплення відповідної фази; $u_k(t)$ – фазна напруга; R_k – активний опір обмотки; $i_{\mu k}(t)$ – струм намагнічування.

Оскільки струм намагнічування визначається нелінійною характеристикою осердя,

$$i_{\mu k}(t) = f(\psi_k) \tag{8}$$

то збільшення потокозчеплення понад робочу ділянку магнітної характеристики призводить до насичення осердя та різкого зростання струму намагнічування. У цьому випадку залишковий потік, сформований під час попереднього вимкнення, безпосередньо впливає на розвиток процесу наступного вмикання.

Максимальний магнітний потік після повторного вмикання є функцією двох параметрів – моменту попереднього вимкнення та моменту наступного вмикання:

$$\Phi_{\max} = F(\beta_{off}, \alpha_{on}) \tag{9}$$

де α_{on} – кут вмикання автотрансформатора.

Відповідно, максимальний струм намагнічування та перенапруги на обмотках 330 і 15,75 кВ також можуть бути подані як функції цих двох кутів:

$$i_{\mu,\max} = F_i(\beta_{off}, \alpha_{on}) \quad (10)$$

$$U_{330,\max} = F_{330}(\beta_{off}, \alpha_{on}) \quad (11)$$

$$U_{15.75,\max} = F_{330}(\beta_{off}, \alpha_{on}) \quad (12)$$

Отже, основна задача роботи полягає у встановленні залежності між моментом вимкнення ненавантаженого автотрансформатора, сформованим залишковим намагнічуванням та параметрами електромагнітного перехідного процесу під час наступного вмиканні.

У формалізованому вигляді задача може бути записана як визначення таких значень β_{off} та α_{on}, за яких забезпечується мінімізація небезпечних проявів перехідного процесу:

$$\mathrm{J} = \omega_1 \frac{\left|\Phi_{зал}\right|}{\Phi_{ном}} + \omega_2 \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{доп}} + \omega_3 \frac{i_{\mu,\max}}{i_{доп}} + \omega_4 \frac{\mathrm{U}_{330,\max}}{\mathrm{U}_{330,доп}} + \omega_5 \frac{\mathrm{U}_{15.75,\max}}{\mathrm{U}_{15.75,доп}} \quad (13)$$

де J – узагальнений критерій небезпеки комутаційного процесу; ω_1, ω_2, ω_3, ω_4, ω_5 – вагові коефіцієнти; $\Phi_{ном}$ – номінальний магнітний потік; $\Phi_{доп}$ – допустиме значення магнітного потоку; $i_{доп}$ – допустиме значення струму намагнічування; $\mathrm{U}_{330,доп}$, $\mathrm{U}_{15.75,доп}$ – допустимі значення перенапруг на відповідних обмотках.

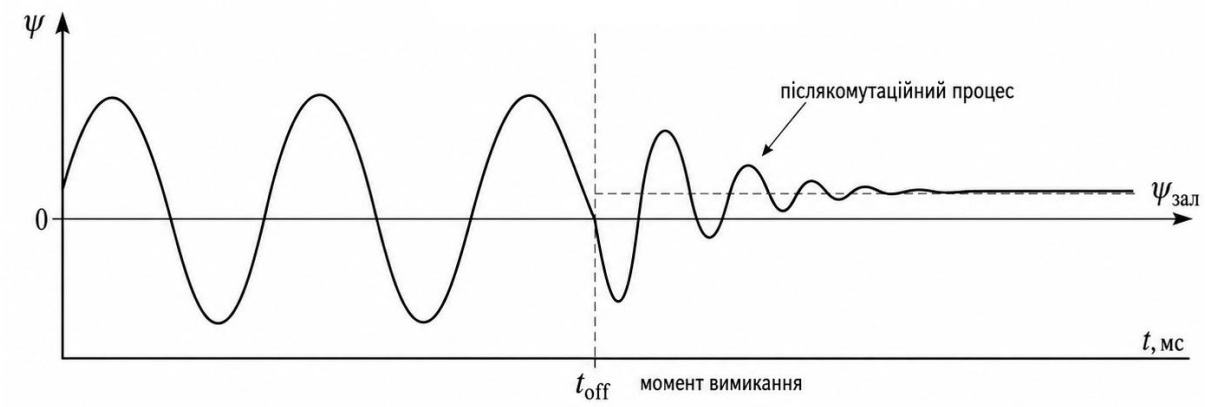
Тоді оптимальні моменти комутації можуть бути визначені з умови:

$$(\beta_{off,opt}, \alpha_{on,opt}) = \arg\min J \quad (14)$$

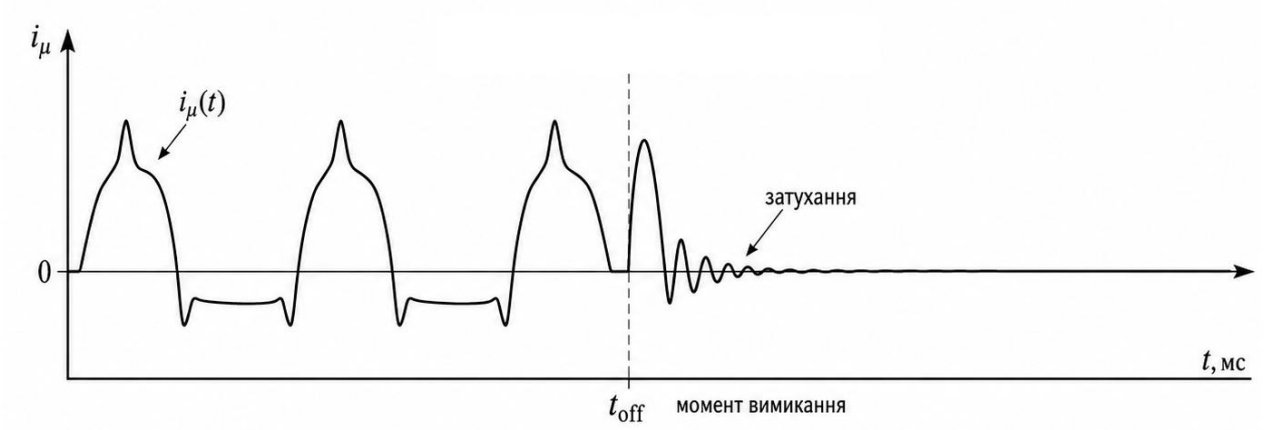
У межах цієї роботи основна увага приділяється не лише зменшенню струму намагнічування при вмиканні, а й аналізу впливу попереднього вимкнення на формування залишкового магнітного потоку. Такий підхід дозволяє перейти від традиційного розгляду залишкового намагнічування як заданої початкової умови до його визначення як результату попереднього комутаційного процесу.

Таким чином, дослідження охоплює два взаємопов’язані процеси: вимкнення автотрансформатора→формування залишкового потоку та залишковий потік→наступне вмикання→струм намагнічування і перенапруги.

Характер зміни потокозчеплення та струму намагнічування під час вимкнення ненавантаженого автотрансформатора показано на рис. 2. До моменту вимкнення потокозчеплення змінюється відповідно до прикладеної синусоїдальної напруги, а струм намагнічування має несинусоїдальну форму, зумовлену нелінійною характеристикою осердя.



а) Потокозчеплення



б) Струм намагнічування

Рис. 2. Потокозчеплення та струм намагнічування під час вимкнення автотрансформатора

На рис. 2 показано, що в момент фактичного вимкнення t_{off} електромагнітний стан автотрансформатора визначається поточним значенням потокозчеплення $\psi(t_{off})$ та струму намагнічування $\mathrm{i}_\mu(t_{off})$. Після розмикання вимикача прикладена напруга з боку мережі 750 кВ зникає, однак у магнітній системі автотрансформатора та в ємностях обмоток залишається накопичена електромагнітна енергія. Це зумовлює виникнення післякомутаційного вільного процесу.

Потокозчеплення після вимкнення не переходить миттєво до нуля, а здійснює затухаючі коливання і після завершення перехідного процесу набуває певного залишкового значення $\psi_{зал}$. Відповідний залишковий магнітний потік $\Phi_{зал}$ визначає магнітний стан осердя перед наступним вмиканням автотрансформатора.

Струм намагнічування після вимкнення швидко зменшується внаслідок розриву кола живлення та затухання вільної складової. Однак кінцеве значення потокозчеплення залишається ненульовим, що пояснюється гістерезисними властивостями магнітного осердя. Таким чином, момент вимкнення t_{off} безпосередньо впливає на величину і знак залишкового намагнічування.

У межах цієї роботи головна увага приділяється не уточненню всіх конструктивних параметрів автотрансформатора, а аналізу впливу моменту комутації на формування залишкового намагнічування та подальший розвиток перехідного процесу при повторному вмиканні. Тому розрахункова схема повинна забезпечити можливість варіювання кута вимкнення β_{off}, кута вмикання α_{on}, величини залишкового потоку та параметрів нелінійної характеристики намагнічування.

Математична модель вимкнення ненавантаженого автотрансформатора та формування залишкового намагнічування

Під час вимкнення ненавантаженого автотрансформатора 750/330/15,75 кВ електромагнітний процес визначається взаємодією струму намагнічування, нелінійної магнітної характеристики осердя, ємностей обмоток та параметрів вимикача. Оскільки струм навантаження відсутній, основним струмом у колі до моменту вимкнення є струм холостого ходу, який у першому наближенні можна розглядати як струм намагнічування з урахуванням ємнісних складових:

$$i_k(t) = i_{\mu k}(t) + i_{Ck}(t), \qquad k = A, B, C \tag{15}$$

де $i_{\mu k}(t)$ – струм намагнічування відповідної фази, $i_{Ck}(t)$ – ємнісний струм обмоток, вводів та приєднаного обладнання.

Для кожної фази автотрансформатора електромагнітний процес до моменту вимкнення

може бути описаний рівнянням:

$$u_k(t) = R_k i_{\mu k}(t) + \frac{d\psi_k(t)}{dt}, \qquad k = A, B, C \tag{16}$$

де $u_k(t)$ – фазна напруга на обмотці, з боку якої здійснюється комутація; R_k – активний опір відповідної фази; $i_{\mu k}(t)$ – струм намагнічування; $\psi_k(t)$ – потокозчеплення фази.

Потокозчеплення визначається інтегралом напруги на обмотці:

$$\psi_k(t) = \psi_k(t_0) + \int_{t_0}^{t} \left[u_k(\tau) - R_k i_{\mu k}(\tau) \right] d\tau \tag{17}$$

У режимі холостого ходу активне падіння напруги на опорі обмотки є малим порівняно з прикладеною напругою, тому для якісного аналізу можна використовувати наближення:

$$\psi_k(t) \approx \psi_k(t_0) + \int_{t_0}^{t} u_k(\tau) d\tau \tag{18}$$

Для синусоїдальної фазної напруги $u_k(t) = U_m \sin(\omega t + \theta_k)$ потокозчеплення в усталеному режимі змінюється приблизно за законом:

$$\psi_k(t) \approx -\frac{U_m}{\omega} \cos(\omega t + \theta_k) \tag{19}$$

Кут вимкнення для кожної фази можна записати у вигляді:

$$\beta_{off,k} = \omega t_{off,k} + \theta_k \tag{20}$$

Тоді потокозчеплення у момент вимкнення визначається як:

$$\psi_k(t_{off,k}) = \psi_k(t_0) + \int_{t_0}^{t_{off,k}} \left[u_k(\tau) - R_k i_{\mu k}(\tau) \right] d\tau \tag{21}$$

У спрощеному вигляді для усталеного режиму холостого ходу:

$$\psi_k(t_{off,k}) \approx -\frac{U_m}{\omega} \cos \beta_{off,k} \tag{22}$$

Цей вираз показує, що зміна моменту вимкнення змінює значення потокозчеплення в момент розриву кола. Тому залишкове намагнічування не є довільним параметром, а формується попереднім процесом вимкнення.

Після розмикання вимикача автотрансформатор відокремлюється від джерела живлення, однак у його магнітній системі та ємностях обмоток залишається електромагнітна енергія. Ця енергія зумовлює післякомутаційний вільний процес, який має затухаючий характер. У лінеаризованому вигляді цей процес можна описати рівнянням другого порядку:

$$\psi_k(t) \approx -\frac{U_m}{\omega} \cos(\omega t + \theta_k) \frac{\mathrm{d}^2 \psi_k}{\mathrm{dt}^2} + 2\delta_k \frac{\psi_k}{dt} + \omega_{0k}^2 \psi_k = 0, \qquad k = A, B, C \tag{23}$$

де δ_k – коефіцієнт затухання; ω_{0k}^2 – власна кутова частота післякомутаційного контуру.

Власна частота визначається еквівалентною індуктивністю та ємністю відповідної фази:

$$\omega_{0k} = \frac{1}{\sqrt{L_{екв,\mathrm{k}} C_{екв,\mathrm{k}}}} \tag{24}$$

де $L_{екв,\mathrm{k}}$ – еквівалентна індуктивність, що залежить від магнітного стану осердя; $C_{екв,\mathrm{k}}$ – еквівалентна ємність обмоток, вводів, ошиновки та приєднаного обладнання.

Розв’язок післякомутаційного рівняння можна подати як затухаючу вільну складову:

$$\psi_k(t) = A_k e^{-\delta_k t} \sin(\omega_{0k} t + \varphi_k) \quad (25)$$

де A_k – амплітуда вільної складової, яка визначається початковими умовами в момент вимкнення; φ_k – початкова фаза вільного процесу.

Однак для автотрансформатора реальний процес не є строго лінійним, оскільки струм намагнічування визначається нелінійною характеристикою осердя:

$$i_{\mu k} = f(\psi_k) \quad (26)$$

Відповідно, еквівалентна індуктивність гілки намагнічування є функцією потокозчеплення:

$$L_{\mu k}(\psi_k) = \frac{d\psi_k}{di_{\mu k}} \quad (27)$$

Під час післякомутаційного процесу ця індуктивність може змінюватися, особливо якщо потокозчеплення знаходиться поблизу області насичення. Тому залишкове потокозчеплення після завершення коливань визначається не лише значенням $\psi_k(t_{off,k})$, а й нелінійною магнітною характеристикою осердя та демпфуванням післякомутаційного процесу.

Залишкове потокозчеплення фази можна визначити як значення потокозчеплення після затухання вільної складової:

$$\psi_{зал.k}(\psi_k) = \lim_{t \to t_{off,k}+T_{заг}} \psi_k(t) \quad (28)$$

де $T_{заг}$ – час, протягом якого післякомутаційні коливання практично затухають.

Відповідний залишковий магнітний потік:

$$\Phi_{зал,k} = \frac{\psi_{зал,k}}{N_k} \quad (29)$$

де N_k – еквівалентна кількість витків відповідної обмотки або приведене число витків для розрахункової схеми.

Таким чином, залишковий магнітний потік є функцією моменту вимкнення:

$$\Phi_{зал,k} = F_k(\beta_{off,k}), \quad k = A, B, C \quad (30)$$

У більш загальному вигляді ця залежність має враховувати також параметри вимикача, нелінійну характеристику осердя та післякомутаційний контур:

$$\Phi_{зал,k} = F_k(\beta_{off,k}, t_{mech,k}, t_{arc,k}, L_{\mu k}(\psi), C_{екв,k}, R_{екв,k}) \quad (31)$$

Фізично процес формування залишкового намагнічування можна подати таким чином. До моменту вимкнення магнітний потік в осерді змінюється відповідно до прикладеної напруги. У момент фактичного припинення струму фаза магнітного потоку має певне значення. Після розмикання кола виникає затухаючий вільний процес, пов'язаний з перерозподілом енергії між магнітною системою автотрансформатора та ємностями обмоток. Після затухання цього процесу в осерді залишається залишковий магнітний потік, який визначається попередньою траєкторією намагнічування та властивостями магнітного матеріалу.

Для подальших розрахунків доцільно ввести нормоване значення залишкового потоку:

$$k_{зал,k} = \frac{\Phi_{зал,k}}{\Phi_{ном}} \quad (32)$$

де $\Phi_{ном}$ – амплітудне значення магнітного потоку в номінальному усталеному режимі. Тоді залежність залишкового намагнічування від моменту вимкнення можна подавати у вигляді:

$$k_{зал,k} = f_k(\beta_{off,k}) \quad (33)$$

Саме ця залежність є основним результатом моделювання процесу вимкнення. Вона

дозволяє визначити, за яких моментів вимкнення формується найбільше за модулем залишкове намагнічування, а за яких – залишковий потік є мінімальним або має сприятливу полярність для наступного вмикання.

У межах запропонованої моделі процес вимкнення ненавантаженого автотрансформатора описується послідовністю:

$$\beta_{off} \rightarrow \psi(t_{off}) \rightarrow \psi_{зал} \rightarrow \Phi_{зал} \quad (34)$$

Отже, момент вимкнення є керованим параметром, який визначає початковий магнітний стан автотрансформатора перед наступною комутацією. Це створює основу для подальшого розділу, у якому буде розглянуто повторне вмикання автотрансформатора з урахуванням сформованого залишкового намагнічування.

Результати моделювання впливу моменту вимкнення ненавантаженого автотрансформатора на формування залишкового намагнічування наведено на рис. 3. Залежність побудовано у вигляді нормованого залишкового магнітного потоку $k_{зал} = \frac{\Phi_{зал,k}}{\Phi_{ном}}$ від кута вимкнення β_{off}.

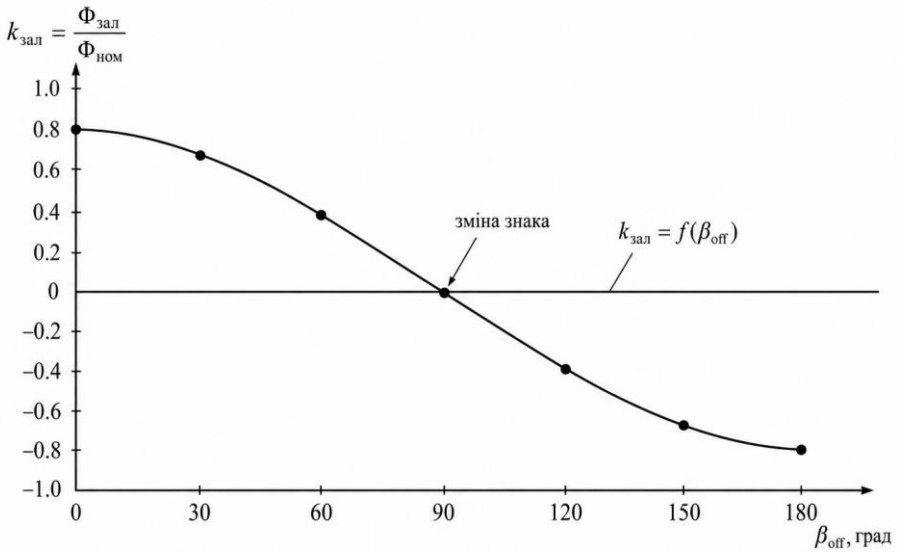


Рис. 3. Залежність залишкового магнітного потоку від кута вимкнення автотрансформатор

Як видно з рис. 3, залишковий магнітний потік істотно залежить від кута вимкнення автотрансформатора β_{off}. За зміни моменту вимкнення в межах півперіоду величина нормованого залишкового потоку $k_{зал}$ змінюється від додатних до від'ємних значень, що свідчить про зміну не лише його амплітуди, а й знака.

У діапазоні малих кутів вимкнення β_{off} залишковий потік має додатне значення і досягає найбільших значень за модулем. Зі збільшенням кута вимкнення значення $k_{зал}$ зменшується, а в околі $\beta_{\text{off}} \approx 90^0$ проходить через нуль. Це відповідає зміні полярності залишкового намагнічування. За подальшого збільшення кута вимкнення залишковий потік набуває від'ємних значень, причому його модуль знову зростає.

Отримана залежність підтверджує, що залишкове намагнічування не можна вважати довільно заданою початковою умовою. Воно формується безпосередньо попереднім процесом вимкнення і визначається моментом розмикання вимикача. Саме тому при аналізі повторного вмикання автотрансформатора доцільно враховувати зв'язок:

$$\beta_{\text{off}} \rightarrow \Phi_{зал} \quad (32)$$

Практично це означає, що вибір моменту вимкнення може бути використаний як засіб впливу на початковий магнітний стан автотрансформатора перед наступною комутацією.

Отримана крива $k_{зал} \to f(\beta_{off})$ є базовою характеристикою для подальшого дослідження процесів повторного вмикання та оцінювання можливих перенапруг і струмів намагнічування.

Висновки

1. У роботі показано, що залишкове намагнічування ненавантаженого автотрансформатора 750/330/15,75 кВ формується внаслідок попереднього електромагнітного перехідного процесу вимкнення, а не може розглядатися як довільно задана початкова умова. Фактичний момент розмикання вимикача визначає миттєве значення потокозчеплення в магнітній системі автотрансформатора. Після припинення живлення в обмотках та еквівалентних ємностях автотрансформатора виникає післякомутаційний вільний процес, у результаті затухання якого в осерді зберігається залишковий магнітний потік. Його величина і знак залежать від кута вимкнення, нелінійної характеристики намагнічування осердя, параметрів обмоток та характеру післякомутаційних коливань. Це підтверджує необхідність урахування попереднього процесу вимкнення під час оцінювання магнітного стану автотрансформатора перед наступною комутацією.

2. Встановлено, що нормований залишковий магнітний потік автотрансформатора є функцією кута вимкнення $k_{зал,\mathrm{k}} = \dfrac{\Phi_{зал,k}}{\Phi_{ном}} = f(\beta_{\mathrm{off}})$. Отримана залежність показує, що при зміні кута вимкнення змінюється не лише абсолютне значення залишкового потоку, але й його полярність. Це має принципове значення для подальшого аналізу повторного вмикання, оскільки залишковий потік може як збільшувати результуючий магнітний потік в осерді, так і частково його компенсувати залежно від моменту наступної комутації. Тому під час моделюванні вмикання автотрансформатора доцільно задавати початковий магнітний стан не умовно, а на основі попередньо визначеної залежності $k_{зал,\mathrm{k}} = f(\beta_{\mathrm{off}})$. Практичне значення цього результату полягає у можливості вибору або оцінювання таких моментів вимкнення, за яких формується мінімальне або сприятливе за знаком залишкове намагнічування, що може бути використано для подальшого розвитку методів керованої комутації автотрансформаторів надвисокої напруги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers / L. Prikler et al. *Electric Power Systems Research*. 2006. Vol. 76, № 8. P. 642–649. DOI: 10.1016/j.epsr.2005.12.022.

2. Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis / N. Chiesa et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25, № 4. P. 2599–2608. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2045518.

3. Determining the Residual Magnetic Flux Value of a Single-Phase Transformer Using a Minor Hysteresis Loop / D. Vulin et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 36, № 4. P. 2066–2074. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3019407.

4. Development of a Transformer Magnetizing Circuit Model for Inrush Current and Residual Flux Calculations / R. Yonezawa et al. *IEEJ Transactions on Power and Energy*. 2014. Vol. 134, №9. P. 749–758. DOI: 10.1541/ieejpes.134.749.

5. Study on the residual flux density measurement method for power transformer cores based on magnetising inductance / C. Huo et al. *IET Electric Power Applications*. 2022. Vol. 16, №2. P. 224–235. DOI: 10.1049/elp2.12148.

6. Residual Magnetic Flux of On-Load Transformer for Controlled Switching / Y. Himata et al. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 15, № 8. P. 1134–1138. DOI: 10.1002/tee.23172.

7. Influence of a Circuit Breaker's Grading Capacitor on Controlled Transformer Switching / Y. Corrodi et al. *IEEJ Transactions on Power and Energy*. 2010. Vol. 130, № 5. P. 484–490. DOI: 10.1541/ieejpes.130.484.

8. Improved Flux-Controlled VFCV Strategy for Eliminating and Measuring the Residual Flux of Three-Phase Transformers / S. Zhang et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 35, №3. P. 1237–1248. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2937900.

9. Field-circuit coupling numerical calculation method of transformer remanence / W. Yuan et al. *IET Electric Power Applications*. 2022. Vol. 16, №8. P. 856–868. DOI: 10.1049/elp2.12192.

10. Investigation the dependence of transitional voltages at switching-off unloaded transformer on its input capacitance / E. A. Saafan et al. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*. 2021. Vol. 13, №1. P. 51–56.

11. Investigation of the circuit-breaker reignition overvoltages caused by no-load transformer switching surges / M. Popov

et al. *European Transactions on Electrical Power*. 2001. Vol. 11, №6. P. 413–422. DOI: 10.1002/etep.4450110609.

12. Some Features of Computer Simulation Transitional Processes at Switching-off Unloaded Transformers / T. M. Lazimov et al. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. Vol. 5, №1. P. 5–8. DOI: 10.17694/bajece.292577.

13. On interaction between circuit-breaker and network at small inductive currents' switching-offs / T. M. Lazimov et al. *Present Problems of Power System Control*. 2011. №1. P. 29–37.

14. Interruption of small, medium-voltage transformer current with a vacuum circuit breaker / A. Xemard et al. *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 187. Art. 106502. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106502.

15. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching—Part I: Theoretical considerations / J. H. Brunke et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001. Vol. 16, №2. P. 276–280. DOI: 10.1109/61.915495.

16. Kuchanskyy V. Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. №4. С. 51–54.

17. Кучанський В. В. Керована комутація елегазовими вимикачами в магістральних електричних мережах. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. № 48. С. 38–43.

18. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик анормальних перенапруг / В. Г. Кузнецов та ін. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. № 31. С. 5–11.

19. Дослідження впливу параметрів ЛЕП НВН на анормальні перенапруги / Ю. І. Тугай та ін. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 37. С. 17–21.

20. Experimental investigation of impact of remnant flux on the ferroresonance initiation / K. Miličević et al. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. Vol. 61. P. 346–354. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.03.036.

21. Вплив початкових умов на перехідні процеси при комутаціях автотрансформаторів / Ю. І. Тугай та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. 2019. № 203. С. 59–60.

22. Accurate transformer inrush current analysis by controlling closing instant and residual flux / B. C. Sung et al. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 223. Art. 109638. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109638.

23. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж : монографія / В. В. Кучанський та ін. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 120 с.

24. Анормальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень : монографія / В. Г. Кузнецов та ін. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. 170 с. DOI: 10.35668/978-617-554-449-5.

25. Оцінювання впливу залишкового намагнічування автотрансформатора на умови розвитку резонансних перенапруг / В. Г. Кузнецов та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2026. № 1 (184). С. 46–54. DOI: 10.31649/1997-9266-2026-184-1-46-54.

26. Аналіз електромагнітних перехідних процесів під час комутацій ліній електропередавання надвисокої напруги та автотрансформаторів / В. В. Кучанський та ін. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. Vol. 347, № 1. P. 182–188. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-347-25.

Стаття надійшла до редакції 02.09.2026.
Стаття пройшла рецензування 28.09.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Кузнецов Володимир Григорович – д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, ORCID: 0000-0002-5399-2942.

Кучанський Владислав Володимирович – д-р техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8648-7942.

Тугай Юрій Іванович – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, ORCID: 0000-0002-0704-1863.

Шевчук Віталій Вадимович – д-р філософії з електричної інженерії, відділу оптимізації систем електропостачання, ORCID: 0000-0003-0535-2630.

Національна академія наук України Інститут електродинаміки.