

## ВПЛИВ ПОЧАТКОВИХ УМОВ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ КОМУТАЦІЯХ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ

Тугай Ю. І.<sup>1</sup>, Кучанський В. В.<sup>1</sup>, Лиховид Ю. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки Національної академії наук України,

<sup>2</sup>Національна енергетична компанія "Укренерго"

*Досліджено вплив залишкового намагнічування автотрансформатора на умови виникнення резонансних перенапруг та кидків струмів намагнічування. Запропоновані заходи запобігання негативним явищам.*

**Постановка проблеми.** Резонансні перенапруги на вищих гармонічних складових звичайно виникають через аномальні несинусоїдальні режими роботи електричних мереж [1]. Такі перенапруги відносяться до небезпечних тривалих внутрішніх перенапруг, оскільки часто їх кратність перевищує регламентовані гранично допустимі значення. Типовим прикладом несинусоїдального режиму роботи є режим включення лінії на ненавантажений автотрансформатор (АТ) з залишковим намагнічуванням осердя. Слід зазначити, що цей режим супроводжується не тільки резонансними перенапругами, але і кидками струмів намагнічення. Тому при експлуатації ліній електропередачі повинні застосовуватись ефективні заходи для успішного вирішення двох актуальних теоретичних та практичних задач: запобігання виникнення резонансних перенапруг та зменшенню значень струмів намагнічення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема появи другої гармонічної складової в напрузі лінії електропередачі передачі є однією із найскладніших у сучасній теоретичній електротехніці. Незважаючи на досить велику кількість публікацій на цю тему, причини та умови появи цієї гармоніки все ще не до кінця не виявлені. Опубліковані наукові праці різних авторів, висновки яких в окремих питаннях суперечать один одному [4,5]. На жаль, в жодній з цих відомих робіт до кінця не висвітлена фізична природа явища, тоді як з'ясування цієї сутності є єдиним способом його аналізу та розробки засобів запобігання. Ще гірше вивчені перехідні процеси в електричних колах з нелінійною індуктивністю. Невідомо, які початкові умови призводять до виникнення перенапруг на вищих гармонічних складових, а які ні.

**Мета статті.** Пропонується оцінка впливу залишкового намагнічування осердя АТ для розробки заходів запобігання резонансним перенапругам і зниження значень кидків струмів намагнічування в електричних мережах в несинусоїдальних режимах роботи.

**Основні матеріали дослідження.** Після відключення АТ, деякі магнітні домени зберігають ступінь орієнтації відносно магнітного поля, яке було прикладено до осердя. Це явище відоме як залишкове намагнічування. При відключенні АТ напруга намагнічування дорівнює нулю, струм намагнічення зменшується до нуля, тоді як магнітна індукція змінюється залежно від характеристики намагніченості осердя. Вона визначає наявність залишкової індукції в осерді при відключенні АТ.

Коли через деякий час АТ знову підключається до лінії, магнітна індукція починає змінюватись згідно з синусоїдальним законом, але графік її зміни має зміщення на величину залишкової індукції. Залишкова індукція може становити 80–90% від номінального значення, і, таким чином, робоча точка може виявитись на нелінійній частині характеристики намагніченості рис.1, що, в свою чергу, спричиняє велику амплітуду та спотворення форми кривої струму. Коли залишкове намагнічування осердя АТ має максимальне значення, це вважається найбільш несприятливим випадком при підключенні. При цьому виникають великі кидки струмів намагнічування [1,4,5]. Також при підключенні ненавантаженого АТ періодичні зміни нелінійної індуктивності осердя АТ, як наслідок коливань, що виникли в системі, можуть викликати автопараметричний резонанс.

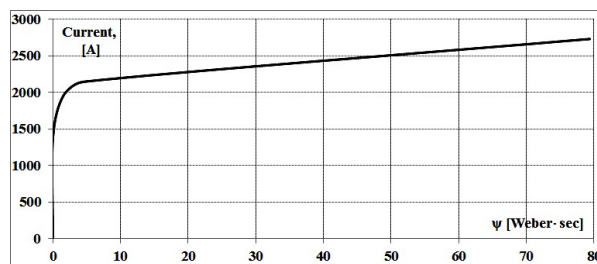


Рисунок 1 – Крива намагнічування осердя АТ

Зміна кидків струму намагнічування у часі характеризується такими ознаками:

- графік зміни струму залишається несиметричним, поки струм не досягне усталеного значення;
- струм може бути розкладений на аперіодичну складову та синусоїдальні струми різних гармонічних, причому аперіодична складова має суттєве значення порівняно з номінальним струмом;
- час згасання струму визначається константами часу АТ і мережі, та може досягати 2-3 секунд: чим більша потужність АТ, тим довше триває загасання;
- початковий пусковий струм може перевищувати в 5-10 разів номінальний струм АТ.

Слід відзначити, що за певних обставин кидки струму намагнічування згасають лише через кілька хвилин після підключення АТ.

Найефективніші і найбільш виправдані серед способів зменшення кидка струму намагнічування АТ при його включенні – це способи зменшення резуль-

туючого магнітного потоку до початку перехідного процесу в колі "первинна обмотка АТ - лінія".

Перший спосіб полягає у розмагнічуванні магнітопроводу від залишкової намагніченості, що виникає внаслідок раптового зняття напруги живлення та переривання струму при його проходженні через ненульове значення. Зменшення залишкової намагніченості здійснюється шляхом проходження постійного струму протилежної полярності через одну з обмоток осердя магнітопроводу АТ.

Процес розмагнічування здійснюється в кілька циклів. У першому циклі струм розмагнічування повинен бути щонайменше вдвічі більше струму без навантаження АТ при номінальній напрузі. У кожному наступному циклі струм розмагнічування повинен бути приблизно на 30% меншим, ніж струм попереднього циклу. В останньому циклі струм розмагнічування не повинен бути більшим за струм без навантаження АТ. Випрямні пристрої можуть використовуватися як джерело постійного струму при застосуванні пристрою розмагнічування АТ.

Другий спосіб запобігання резонансним перенапругам зводиться до попереднього підключення навантаження до обмоток АТ. Шляхом математичного моделювання були проведені дослідження щодо впливу характеру та значень попереднього навантаження АТ на умови виникнення резонансних перенапруг.

Як видно на рис.2, момент підключення АТ збігається з моментом підключення навантаження значенням 200 Мвт. В цьому випадку програма комутації запобігає резонансним перенапругам, але не виключає появу вищих гармонічних складових.

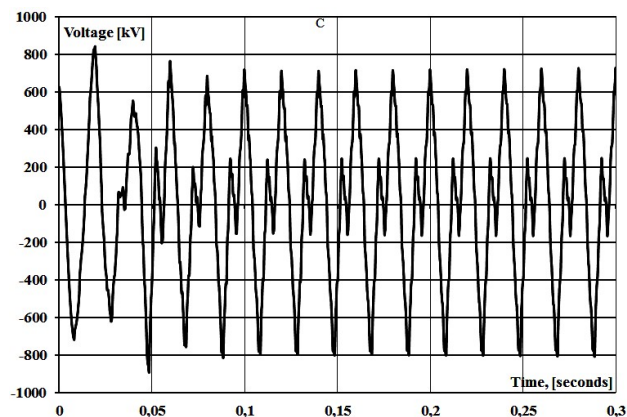


Рисунок 2 – Підключення навантаження до АТ

Якщо навантаження підключається після підключення ненавантаженого АТ з інтервалом 0,15 секунд, перенапруги то спостерігаються перенапруги на вищих гармонічних складових, які мають обмежені значення через дисипативний вплив навантаження.

**Висновки.** Визначено, що залишкова намагніченість АТ є одним із ключових факторів появи резонансних перенапруг на вищих гармонічних складових. Залишкова намагніченість, яка виникає, коли ненавантажений АТ вимикається у несприятливий момент, призводить до автопараметричного резонансного процесу та модуляції вищих гармонічних складових.

Попередня демагнетизація осердя дозволяє подавити резонансні перенапруги на вищих гармонічних

складових завдяки зменшенню залишкового намагнічування. Виконання перед включенням АТ попереднього навантаження його робочих обмоток дозволяє знизити кратність резонансних перенапруг, але не завжди запобігає появі в синусоїді напруг вищих гармонічних складових.

## Список використаних джерел

1. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі / Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І., Кучанський В. В., Лиховид Ю. Г., Мельничук В. А. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. №2 С. 69-74.
2. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О. Г. Дослідження внутрішніх пере-напруг у магістральних електричних мережах надвисокої напруги та розробка заходів по їх запобіганню й обмеженню. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2013. Вип. 35. С. 117-122.
3. Kuchanskyi V.V. The application of controlled switching device for prevention resonance overvoltages in nonsinusoidal modes. *Proc. 37th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology Ukraine*. Київ, 2017. P. 394-399.
4. Brunke J. H, Fröhlich K. J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. *Proc. IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001. Vol.16(2). P. 281-285.
5. Girgis R. S., Nyenhuis E. G. Characteristic of inrush current of present designs of power transformers *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting, Tampa, USA, June, 2007*. P. 143-148.

## Анотація

### ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КОММУТАЦИЯХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Тугай Ю. И., Кучанский В. В.,  
Лиховид Ю. Г.

В статье исследовано влияние остаточного намагничивания автотрансформатора на условия возникновения резонансных перенапряжений и бросков токов намагничивания. В работе предложены меры предотвращения отрицательных явлений при коммутациях автотрансформатора.

## Abstract

### THE INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS ON TRANSIENT PROCESSES AT AUTOTRANSFORMERS COMMUTATIONS

Yu.Tugay , V. Kuchansky, Yu. Likhovid

The effect of residual magnetization in an autotransformer on the conditions for the occurrence of resonant overvoltages and magnetization current surges was investigated in the article. The measures to prevent negative phenomena were proposed.