

Ю. О. Варецький

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроенергетики та систем управління,
e-mail: yurii.o.varetskyi@lpnu.ua.

З. Ханзелька

Гірничо-металургійна академія ім. С. Сташиця, м. Краків,
кафедра енергоелектроніки й автоматики систем перетворення енергії,
e-mail: hanzel@agh.edu.pl

ВИБІР ФІЛЬТРОВИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

<http://doi.org/10.23939/sepes2022.01.001>

© Варецький Ю. О., Ханзелька З., 2022

Більшість сучасних промислових електричних мереж характеризується значним вмістом нелінійних навантажень, які створюють багато проблем в експлуатації. Одним із найефективніших засобів зниження спотворення напруг в електричній мережі є силові фільтри гармонік. Застосування силових фільтрів дає змогу вирішувати два основні завдання – зменшувати гармонічні спотворення вхідного струму системи електропостачання і компенсувати реактивну потужність навантажень. Вибір номінальних параметрів фільтрових кіл здійснюють, як правило, на підставі робочих характеристик електричної мережі у стаціонарному (усталеному) режимі. Проте досвід експлуатації показав, що такий підхід не завжди забезпечує безаварійну експлуатацію фільтрів, і основна причина полягає у неврахуванні перехідних перенапруг і надструмів під час вибору параметрів фільтрових конденсаторних батарей і реакторів. У статті розглянуто проблему вибору номінальних параметрів фільтрового реактора як одного із двох основних елементів фільтра для промислових електричних мереж зі значною інтенсивністю комутаційних подій. Показано, що для таких електричних мереж необхідно враховувати перехідні перенапруги та надструми для коректного вибору параметрів фільтрових реакторів.

Проаналізовано основні параметри фільтрових реакторів та розглянуто особливості їх розрахунку. Наведено характеристики перехідних процесів у схемах фільтрових реакторів, спричинені основними технологічними та аварійними перемиканнями в промислових електричних мережах із нелінійними навантаженнями. Показано, що повторюваність різних типів комутаційних подій неоднакова, і це також потрібно враховувати, визначаючи параметри фільтрових реакторів.

Розвинено метод визначення критичних перехідних надструмів і перенапруг у схемі фільтра під час розрахунку проєктних значень номінальних струмів і перенапруг фільтрових реакторів. Використання цього методу для проєктування силових фільтрів дасть змогу уникнути можливих пошкоджень фільтрових реакторів через перегрівання

обмоток і прискорене старіння ізоляції у ході експлуатації, спричинені інтенсивними перехідними процесами в контурі фільтра.

Ключові слова: промислова електрична мережа; гармоніки струму; нелінійне навантаження; силові фільтри гармонік; фільтровий реактор.

Проблема

Гармонічні спотворення струмів у промислових електричних мережах пов'язані з широким використанням пристроїв силової електроніки, електродугових печей, дугових зварювальних апаратів. Внаслідок протікання по лініях і трансформаторах мереж ці струми спричиняють гармонічні спотворення напруги. Наднормативне значення гармонічної напруги може призводити до пошкодження ізоляції обладнання споживачів чи електричної мережі. Збільшення рівня гармонік струму спричиняє додаткові втрати активної потужності в провідниках електричного обладнання і внаслідок його перегрівання знижує термін експлуатації обладнання чи провокує його пошкодження.

Одним із поширених засобів зменшення гармонічних спотворень в електричних мережах із нелінійними навантаженнями є встановлення силових фільтрів гармонік. Через фільтри протікає значна частина гармонік струму навантаження, у результаті їх вміст у струмі системи зовнішнього електропостачання промислової мережі істотно зменшується. Найпростішим типом шунтових фільтрів гармонік є схеми із послідовним сполученням реакторів з індуктивністю L та конденсаторів з ємністю C , основні конфігурації яких подано на рис. 1, *a–в*. На практиці застосовують також складніші конфігурації силових фільтрів, які можуть містити кілька LC -елементів, у деяких використовують також резистор R .

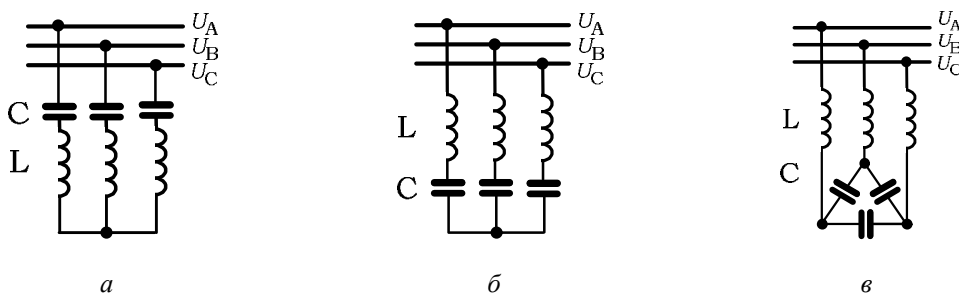


Рис. 1. Основні схеми силових фільтрів

Базовими компонентами конструкції фільтра гармонік є конденсатори, реактори та резистори (якщо такі є), призначені для досягнення прийняттого зниження гармонік у мережі. Основні критерії вибору конструкції та параметрів фільтра передбачають розгляд таких вимог і умов експлуатації:

- § вимоги до ємнісної реактивної потужності;
- § вимоги обмеження гармонік;
- § нормальні режими роботи електричної мережі із фільтрами гармонік;
- § аномальні режими роботи електричної мережі, які можуть призвести до перевантажень обладнання.

Для забезпечення нормальної роботи фільтрів гармонік у промислових електричних мережах потрібно коректно враховувати наведені вимоги. Як показує досвід експлуатації, у багатьох випадках пошкодження елементів фільтрів відбуваються внаслідок неправильно врахованих під час проєктування факторів впливу у конкретних електричних мережах. Матеріал статті висвітлює проблеми врахування впливу перехідних процесів у мережах із силовими фільтрами гармонік на вибір параметрів фільтрового реактора як одного із двох основних елементів фільтра.

Актуальність дослідження

Оскільки частота налаштування фільтра завжди вища від робочої частоти мережі, то реактивна потужність фільтра на робочій частоті є ємнісною. Для оптимального зниження втрат активної потужності в електричній мережі одним із важливих критеріїв вибору фільтра є значення його необхідної ємнісної реактивної потужності. Тому з економічних причин, застосовуючи фільтр, використовують також цю його здатність. Вимоги до регулювання реактивної потужності та напруги можуть передбачати поетапне перемикання секцій фільтрів гармонік. Зокрема стандарт [1] вказує, що максимальна зміна ємнісної реактивної потужності повинна обмежуватися таким значенням, щоб зміна напруги на шинах присіднання не перевищувала 2–3 % від номінальної. Отже, загальні вимоги до кроку зміни потужності визначаються вимогами регулювання напруги.

Вибір індуктивності фільтрового реактора здійснюють після вибору його ємності C_F , щоб налаштувати фільтр гармоніки на бажану частоту згідно із рівнянням (1):

$$L_F = \frac{1}{n^2 \cdot \omega^2 \cdot C_F}, \quad (1)$$

де n – порядок налаштування фільтра; ω – промислова частота мережі.

Усталене значення напруги основної гармоніки на фільтровому реакторі залежить від частоти налаштування фільтра і є суттєво нижчим від значення напруги на шинах U , до яких підключено фільтр:

$$U_{L_F} = \frac{U}{n^2 - 1}. \quad (2)$$

Гармонічні струми у колі фільтра збільшують як втрати активної потужності в реакторі, так і поздовжню напругу на обмотці реактора, тому вплив гармонічних струмів на режим роботи фільтрового реактора потребує особливої уваги. В разі послідовного підключення з конденсаторною батареєю у конфігурації шунтового фільтра струм основної частоти фільтрового реактора обмежується опором послідовно з'єднаної батареї. Однак струм гармоніки фільтра може бути такого ж порядку або навіть більшим від струму основної частоти, особливо в конфігурації кількох налаштованих фільтрів. Якщо реактор розташований між шинами підстанції та конденсаторною батареєю, то через нього може протікати струм короткого замикання унаслідок пошкоджень у колі між реактором і конденсаторною батареєю.

На конструктивні елементи фільтрових реакторів також можуть діяти значні динамічні електро-механічні сили під час операцій перемикання фільтрів, увімкнення потужних паралельних трансформаторів і пошкоджень на шинах, до яких вони підключені, а також в умовах непередбачуваного збільшення рівня гармонік унаслідок аварійних перемикань в електричній мережі.

Особливо актуальна проблема врахування впливу перехідних перенапруг на вибір параметрів фільтрового реактора. На жаль, вплив перехідних перенапруг нелегко визначити через випадкову зміну величини гармоніки протягом періоду перехідного процесу. З цієї причини бажано надати конструктору дані досліджень, які відображають граничні гармонічні впливи і перенапруги, очікувані під час цього типу перехідного процесу. Переважно перемикання фільтра однієї гармоніки не призводить до будь-яких неочікуваних перенапруг на реакторах. Однак у промислових електричних мережах, як правило, використовують конфігурацію із кількох фільтрів, які налаштовані на кілька частот. У цьому випадку перехідні перенапруги на компонентах фільтрів під час перемикань і пошкоджень в електричній мережі можуть істотно зростати і повинні досліджуватися для кожного конкретного випадку.

Формулювання мети та завдань статті

Нині немає стандартів для реакторів силових фільтрів гармонік, але більшість виробників частково використовують стандарти IEEE для силових фільтрів і реакторів без феромагнітного осердя [2, 3]. Метою роботи є розвиток методу оцінювання критичних значень перевантажень і

перенапруг у колах фільтрів гармонік у перехідних режимах промислових електричних мереж для їх врахування під час вибору параметрів фільтрових реакторів. Завдання статті – викладення методології розрахунку номінальних параметрів фільтрових реакторів за умовами перехідних перевантажень і перенапруг у колах фільтрів гармонік промислових електричних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми вибору параметрів фільтрових реакторів висвітлено у багатьох публікаціях. У роботі [4] проаналізовано особливості проектування оптимальних конфігурацій фільтрів для електричних мереж із трансформаторами, що живлять нелінійні навантаження. Економічні аспекти розроблення пасивних фільтрів для промислових мереж низької та середньої напруги висвітлено в статті [5]. В дослідженнях, викладених у статтях [6–9], запропоновано кілька алгоритмів оптимізації параметрів фільтрів для електричних мереж різного призначення. У роботі [10] розглянуто особливості розрахунку параметрів фільтрових реакторів і конденсаторів для промислових електричних мереж із безпосереднім підключенням до шин потужних перетворювачів. Наведені в публікації [11] результати досліджень висвітлюють проблему розрахунку фільтрових реакторів для конфігурацій силових фільтрів у електричній мережі металургійного підприємства на базі наявних конденсаторних батарей. У всіх перерахованих роботах практично не висвітлені особливості врахування перехідних струмів і перенапруг під час вибору параметрів фільтрових реакторів і конденсаторів. На необхідність врахування впливу перехідних струмів і перенапруг на параметри елементів силових фільтрів гармонік з метою забезпечення їх надійної роботи звернуто увагу в роботі [12]. В дослідженнях [13] проаналізовано причини пошкодження силових фільтрів внаслідок повторюваних комутаційних режимів у електричній мережі живлення електродугових печей і підкреслено необхідність врахування перевантажень і перенапруг під час проектування фільтрів. У роботах [14–16] висвітлено особливості аналізу перехідних процесів у колах силових фільтрів під час різних комутацій у промислових електричних мережах, а також особливості вибору параметрів фільтрових реакторів і конденсаторів з урахуванням можливих перехідних перенапруг і надструмів.

Аналіз цих публікацій показує, що пропоновані методи розрахунку параметрів реакторів і конденсаторів силових фільтрів часто не враховують особливості схем і режимів роботи конкретних електричних мереж, які можуть істотно впливати на характер і рівні перехідних струмів і перенапруг.

Основні параметри фільтрового реактора

Фільтрові реактори для мереж середньої напруги виготовляють як із феромагнітним осердям, так і без нього. Як правило, для силових фільтрів зовнішніх конструкцій – це реактори без феромагнітного осердя. Для фільтрів, розташованих у промислових приміщеннях, для зменшення габаритів використовують сухі реактори з феромагнітним осердям.

Для створення відповідної індуктивності фільтрового реактора з феромагнітним осердям необхідно мати зазори в контурі основного магнітного потоку для контролю характеристик намагнічування. Ці зазори іноді називають немагнітними проміжками, але для фізичної цілісності конструкції та жорсткості зазори заповнюють твердою ізоляцією, магнітна проникність якої близька до її значення для повітря. Загальна ширина проміжку може бути розподілена на кілька невеликих зазорів або становити один зазор.

Номінальне значення поздовжньої напруги на реакторі. Поздовжня напруга на реакторі складається зі спадів напруги від протікання струмів основної частоти і частот усіх гармонік. Миттєве значення спаду напруги залежить від амплітуд складових струму та їх фазового співвідношення. Чим більшим є імпеданс реактора, тим більшими будуть спади напруги на високочастотних компонентах струму. Номінальне значення поздовжньої напруги на реакторі згідно з [2] визначають, поділивши на $\sqrt{2}$ найбільше пікове значення поздовжньої напруги на фільтровому реакторі. Якщо

форма хвилі результуючого спаду напруги невідома, то номінальне значення поздовжньої напруги визначається через максимальні діючі значення усіх N гармонік за формулою:

$$U_{\text{РНОМ}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_{(n)}^2}. \quad (3)$$

Номінальне значення струму. Необхідно знайти максимальні значення струмів основної і вищих гармонік, які можуть протікати у колі фільтра у різних режимах роботи системи електропостачання. Подібно до діючого значення поздовжньої напруги, його визначають як діюче значення струму реактора:

$$I_{\text{РНОМ}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_{(n)}^2}. \quad (4)$$

Допустиме (згідно з [3] – номінальне) значення теплового короткочасного струму. Для реакторів у схемах шунтових фільтрів воно пов'язане з тимчасовим збільшенням гармонічних струмів, спричиненим ненормальними умовами роботи мережі чи розлаштуванням фільтра внаслідок аномальних відхилень частоти, а також комутаційними режимами під час пошкоджень і перемикань в електричній мережі. Залежно від особливостей режимів і схем конкретних систем номінальне значення теплового короткочасного струму повинно бути визначене для кожного реактора фільтра.

Допустиме (згідно з [3] – номінальне) значення ударного струму короткого замикання. Це значення є максимальним піковим струмом, спричиненим будь-яким перехідним процесом або коротким замиканням. Для реакторів у послідовно з'єднаних схемах фільтрів це значення пов'язане із пошкодженнями у контурі фільтра. Також необхідно враховувати перехідні струми під час перемикань фільтрів. Значення максимального пікового струму повинно бути вказане в запиті на проектування для кожного фільтрового реактора та ґрунтуватися на особливостях його індивідуального застосування. Для перехідних процесів, які відбуваються з вищими частотами, повинен бути зазначений час наростання струму до піка.

Ізоляція між фазами та землею. Ізоляція фільтрового реактора між фазами та землею залежить від конструкції фільтра і може відрізнятися від нормальних рівнів ізоляції для мереж заданого класу напруги. Для реакторів у колах силових фільтрів може бути доцільним вибір зниженого рівня ізоляції. Максимальне значення імпульсної напруги та рівні комутаційних імпульсів між фазами та землею повинні бути вказані в завданні на проектування. Діюче значення усіх гармонік напруги реактора між реактором і землею повинно бути наведено як основа для вибору ізолятора в конструкції реактора.

Поздовжня ізоляція обмотки. Поздовжню ізоляцію фільтрового реактора потрібно вибирати так, щоб витримувати спади напруги, спричинені в стаціонарному режимі струмами основної та вищих гармонік, а також перехідними перенапругами. Залежно від конструкції фільтра рівні поздовжньої ізоляції реактора можуть відрізнятися від рівнів ізоляції між фазами та землею. Згідно з рекомендацією стандарту [2], результуючий пік напруги, що виникає на реакторі під час пошкодження, не повинен перевищувати 83 % номінального імпульсного значення поздовжньої напруги реактора.

Втрати активної потужності у конструкції фільтрового реактора. У конструкціях фільтрових реакторів без феромагнітного осердя – це втрати активної потужності в обмотках, а у реакторах з феромагнітним осердям до них додаються ще втрати в осерді та його зазорі. Втрати потужності в обмотці необхідно розраховувати для очікуваної робочої температури. Очікуване значення струму фільтрового реактора треба подавати у вигляді спектра гармонік для того, щоб можна було визначити втрати активної потужності для кожної частоти. Тоді діюче значення струму розраховують як геометричну суму основної та вищих гармонік. Для усталеного режиму роботи рекомендується, щоб

номінальне діюче значення струму реактора становило щонайменше 135 % від струму основної частоти фільтра за номінальної напруги на шинах приєднання фільтра. Втрати потужності в обмотці реактора рекомендовано обчислювати за виразом [2]:

$$\Delta P_{\text{обм}} = \sum_{n=1}^N (R_{(n)} \cdot I_{(n)}^2 + \Delta P_{\text{в}(n)} + \Delta P_{\text{к}(n)}), \quad (5)$$

де $R_{(n)} \cdot I_{(n)}^2$ – втрати від протікання діючого значення n -ї гармоніки струму; $\Delta P_{\text{в}(n)}$ – втрати від n -ї гармоніки вихрового струму в обмотці; $\Delta P_{\text{к}(n)}$ – втрати від n -ї гармоніки вихрового струму в конструктивних елементах реактора.

На втрати потужності в осерді та ізоляційному проміжку реактора з феромагнітним осердям істотно впливають частоти та амплітуди гармонік струму. Загальні втрати активної потужності в осерді не повинні перевищувати 40 % від втрат потужності в обмотці, а втрати активної потужності в ізоляційному проміжку не повинні бути більшими, ніж 20 % втрат потужності в обмотці.

Технологічні відхилення параметрів конденсаторів і реакторів. Технологічні відхилення реакторів і конденсаторів помітно впливають на ефективність роботи та умови експлуатації силових фільтрів гармонік. Причому поєднання цих відхилень є істотнішим, ніж індивідуальні відхилення. Конденсатори, виготовлені відповідно до вимог стандарту IEEE Std 18-2002 [16], повинні мати технологічні відхилення у межах 0–(+10) % від номінальної ємності за 25 °С. Допускається також в окремих випадках використовувати конденсатори з технологічними відхиленнями в межах 0–(+15) %. Для фільтрових реакторів типові технологічні відхилення в межах –3–(+3) % чи 0–(–6) % від номінальної індуктивності.

Моделювання процесів у колах силових фільтрів

Особливості схем і режимів промислових електричних мереж із силовими фільтрами істотно впливають на перебіг перехідних процесів. Тому під час розроблення проєктів фільтрокомпенсаторних схем широко застосовують різноманітні комп'ютерні моделі в часовій області. Щоб створити оптимальну структуру фільтра гармонік, важливо розробити точну математичну модель і врахувати можливі планові та аварійні комутаційні події, що можуть виникати в електричній мережі.

Згідно зі стандартом [2] під час формування моделі рекомендовано використовувати такі дані:

- амплітудно-фазові характеристики гармонік струму нелінійних навантажень у характерних режимах електричної мережі;
- поздовжні та поперечні параметри повітряних та кабельних ліній;
- параметри та конфігурації обмоток трансформаторів;
- параметри і розташування усіх батарей конденсаторів у мережі;
- можливі технологічні відхилення параметрів фільтрових конденсаторів і реакторів;
- надперехідний реактивний опір усіх обертових машин електричної мережі.

Перехідні перенапруги та надструми у колі фільтрових реакторів

Як показує досвід експлуатації, граничні перенапруги на фільтрових реакторах виникають під час таких комутаційних подій:

- увімкнення та вимкнення фільтрів;
- увімкнення силових трансформаторів;
- увімкнення та вимкнення паралельних конденсаторних батарей;
- дугові однофазні замикання на землю в електричній мережі;
- повторні пробиття міжконтактних проміжків вимикачів фільтрів.

Розглянемо перехідні напруги на фільтровому реакторі другої гармоніки у складі системи фільтрів статичного тиристорного компенсатора на прикладі показаної на рис. 2 електричної мережі живлення електродугової печі. Наведені далі осцилограми, отримані в результаті виконаних за участю автора досліджень, дають змогу оцінити максимальні перенапруги, які виникають на фільтрових реакторах аналізованої схеми під час перерахованих комутаційних подій. Умови моделювання

комутаційних та аварійних процесів, під час яких виникають максимальні перенапруги на елементах фільтрів, описано в попередніх публікаціях автора [14, 15, 17, 18, 19].

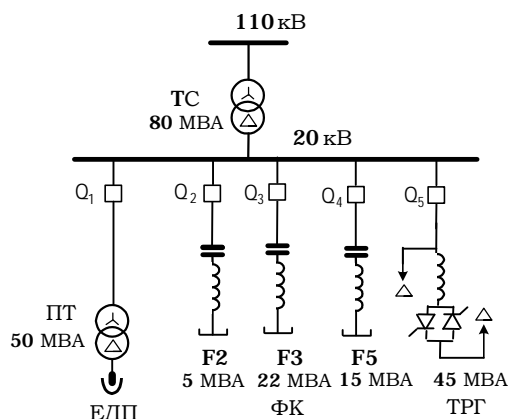


Рис. 2. Принципова схема електричної мережі живлення електродугової печі

Увімкнення фільтра. На рис. 3 подано модельні осцилограми перехідної напруги на поздовжній ізоляції фільтрового реактора другої гармоніки під час увімкнення фільтра другої гармоніки (рис. 3, а) та за одночасного увімкнення усіх фільтрів схеми (рис. 3, б). Порядок налаштування фільтра для таких технологічних відхилень становить $n = 1,86$. З наведених осцилограм видно, що під час увімкнення усіх фільтрів схеми на фільтровому реакторі другої гармоніки спостерігаються значно більші амплітуди перенапруг, ніж під час увімкнення окремо фільтра другої гармоніки.

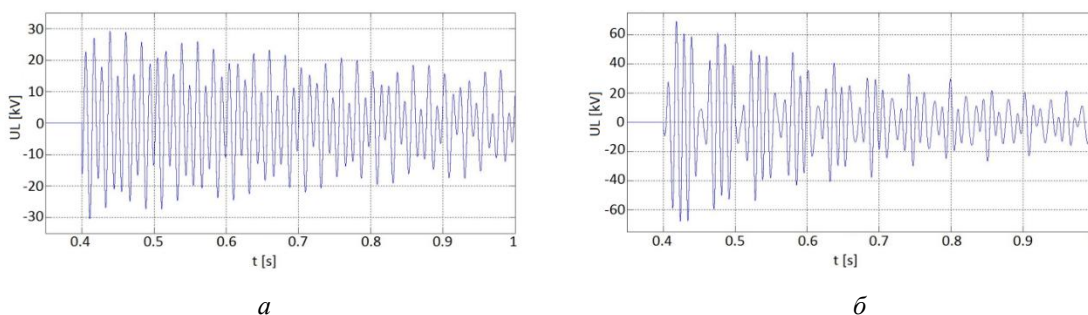


Рис. 3. Перенапруги на фільтровому реакторі під час увімкнення фільтра, $n = 1,86$

Увімкнення пічного трансформатора. На рис. 4 наведено модельні осцилограми перехідної напруги на поздовжній ізоляції фільтрового реактора другої гармоніки під час увімкнення пічного трансформатора. Порядок налаштування фільтра для вказаних технологічних відхилень становить $n = 1,86$.

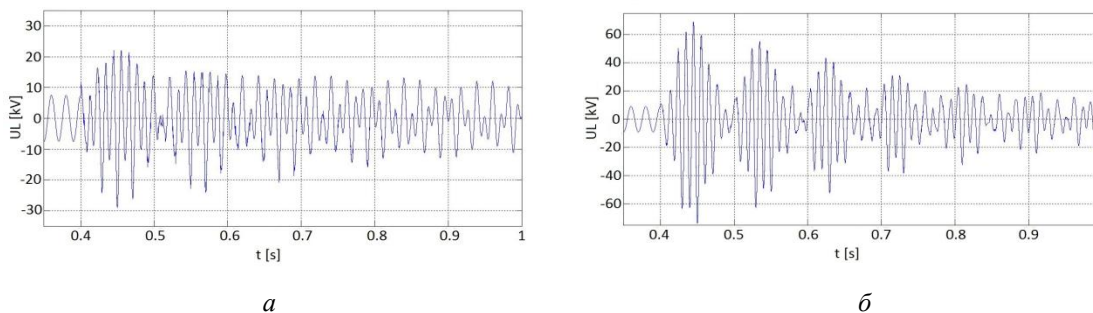


Рис. 4. Перенапруги на фільтровому реакторі під час увімкнення пічного трансформатора, $n = 1,86$

На рис. 4, *а* наведено осцилограми для випадку підключення до шин тільки фільтра другої гармоніки, а на рис. 4, *б* – за під’єднання усіх фільтрів схеми до шин підстанції. Тут бачимо, що, як і у попередньому випадку, на амплітуди перехідних перенапруг істотно впливає схема фільтрокомпенсувального пристрою. Причому в схемах із кількома фільтрами гармонік спостерігаються, як правило, вищі рівні перенапруг.

Вплив налаштування фільтра. Для прикладу на рис. 5 подано осцилограми перехідної напруги на поздовжній ізоляції фільтрового реактора другої гармоніки під час увімкнення пічного трансформатора, якщо налаштування фільтра точне з $n = 2,0$.

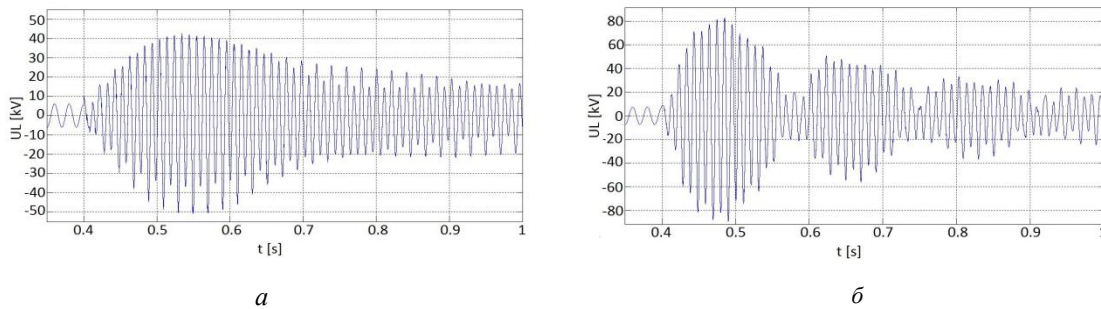


Рис. 5. Перенапруги на фільтровому реакторі під час увімкнення пічного трансформатора, $n = 2,0$

З наведених осцилограм видно, що і під час роботи в схемі тільки фільтра другої гармоніки (рис. 5, *а*), і за роботи всіх фільтрів (рис. 5, *б*) спостерігаються вищі рівні перенапруг, ніж в умовах налаштування фільтра (див. рис. 4).

Вимкнення фільтра. Під час вимкнення фільтра на рівень перенапруг істотно впливає тип вимикача фільтра. Якщо під час вимкнення виникають повторні пробиття міжконтактного проміжку, то рівень перенапруги залежить також від частоти перехідної напруги на шинах підстанції та застосовуваних для цього засобів обмеження перенапруг [17]. Для прикладу на рис. 6 показано осцилограми перехідних перенапруг на реакторі другої гармоніки під час вимкнення фільтра повітряним вимикачем із виникненням повторних запалювань дуги у міжконтактному проміжку.



Рис. 6. Перенапруги на фільтровому реакторі під час вимкнення фільтра

На рис. 6, *а* наведено модельну осцилограму перехідної напруги під час одного повторного запалювання дуги, а на рис. 6, *б* – під час двох повторних запалювань. Потрібно зазначити, що ймовірність повторних запалювань дуги у міжконтактному проміжку вимикача суттєво зростає, коли вимкнення фільтра відбувається зі значним вмістом гармоніки струму, як показано в дослідженнях [17]. На рис. 7 наведено порівняльні модельні осцилограми напруг на міжконтактному проміжку вимикача під час вимкнення фільтра без повторних запалювань дуги між контактами вимикача, які відображають вплив другої гармоніки струму фільтра.



Рис. 7. Перехідні напруги на міжконтактному проміжку вимикача під час вимкнення фільтра:
а – без вмісту другої гармоніки; б – однакові значення першої та другої гармонік

Однофазні замикання на землю в мережі. Під час замикань на землю в електричній мережі системи електропостачання виникають перенапруги, рівень яких, як правило, не перевищує 3,2–3,4 від номінальної фазної напруги. Проте внаслідок певних співвідношень частотної характеристики мережі, яка визначається параметрами системного трансформатора і власною ємністю мережі, та частоти налаштування фільтра на фільтровому реакторі можуть виникати значні перенапруги, як показано в роботі [19]. На рис. 8 наведено модельні осцилограми перехідних напруг на фазах фільтрового реактора другої гармоніки під час дугового замикання на землю, яке супроводжується однократним повторним запалюванням дуги.



Рис. 8. Перенапруги на фільтровому реакторі під час замикання на землю:
а – фаза реактора, підключена до шин із замиканням на землю; б – “здорова” фаза

Максимальні значення перенапруг спостерігаються на фазі фільтрового реактора, яка підключена до шин із замиканням на землю. На фільтрових реакторах фаз, які підключені до шин “здорових” фаз підстанції, амплітуди перенапруг будуть удвічі меншими, як видно з наведених осцилограм.

Метод розрахунку номінальних параметрів фільтрового реактора за характеристиками перехідних режимів

Вибираючи номінальні параметри фільтрових реакторів, як правило, виділяють два розрахункові робочі режими електричної мережі – стаціонарний (усталений) та перехідний. Вибір параметрів за умовами усталеного режиму здійснюють на підставі критеріїв, вказаних у попередньому підрозділі, де розглянуто робочі характеристики фільтрових реакторів. Вихідними даними для розрахунків, згідно з чинними стандартами [2, 3], є номінальна напруга мережі, максимальні значення гармонік навантаження, частота налаштування фільтра, вимоги компенсації реактивної потужності, струм короткого замикання реактора. В результаті отримують значення номінальної індуктивності та добротності реактора, його номінальну напругу та номінальний струм. Ці параметри характеризують тепловий режим та рівні ізоляції фільтрового реактора за умовами стаціонарного режиму.

Як показав досвід експлуатації силових фільтрів у мережах зі значною кількістю комутаційних подій, номінальні параметри фільтрових реакторів, визначені за умовами стаціонарних режимів, часто не забезпечують їх надійної та безаварійної роботи. Перехідні, часто повторювані струми в обмотках, крім надмірного нагрівання ізоляції, спричиняють значні механічні зусилля, які поступово

послаблюють кріплення обмоток реактора. Як наслідок, електромеханічна взаємодія обмоток призводить до пошкодження механічної конструкції реактора. Циклічні пікові перенапруги спричиняють деградацію поздовжньої ізоляції обмоток реактора. Тому необхідно враховувати вплив перехідних перенапруг та надструмів у розрахунках.

Критерії вибору ізоляції та конструкції обмоток фільтрового реактора залежать від рівня максимальних перенапруг і перехідних струмів, що виникають у колі фільтра під час технологічних перемикачів в електричній мережі та аварійних режимів. Експериментальними дослідженнями встановлено, що фільтрові реактори необхідно вибирати так, щоб вони були стійкими до циклічних амплітуд надструмів і перенапруг, повторюваність яких залежить від виду перехідного процесу. Промислові електричні мережі різного призначення характеризуються різним рівнем і повторюваністю амплітуд комутаційних перенапруг і надструмів. Для прикладу в табл. 1 узагальнено повторюваність виникнення характерних комутаційних подій у системах живлення дугових печей, які є критичними з огляду на умови експлуатації фільтрових реакторів і які рекомендовано враховувати під час проєктування силових фільтрів [2, 3, 13].

Таблиця 1

Повторюваність комутаційних подій у системах живлення дугових печей

Комутаційні події	Кількість подій протягом року
Увімкнення пічного трансформатора	1000–30 000
Комутації фільтрів	10–1000
Повторні запалювання дуги у камері фільтрового вимикача	1–10

Метод урахування перехідних режимів під час вибору номінальних параметрів фільтрових реакторів полягає у визначенні еквівалентних номінальних діючих значень напруг та струмів фільтрового реактора на підставі критичних максимальних амплітуд цих величин і їх повторюваності. Причому повинні бути проаналізовані усі характерні для конкретної електричної мережі комутаційні події та оцінена їх орієнтовна повторюваність. З порівняння максимальних амплітуд перехідних перенапруг і надструмів під час проаналізованих перехідних процесів вибирають найбільші значення, які використовують для подальшого розрахунку як критичні. Повторюваність процесів враховується відповідними коефіцієнтами нормалізації. Зокрема, для аналізованої промислової електричної мережі з рис. 2 ці коефіцієнти за рекомендаціями [3] приймають згідно з табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти нормалізації для системи живлення електродугової печі

Комутаційні події	Коефіцієнти нормалізації	
	<i>a</i>	<i>b</i>
Увімкнення пічного трансформатора	1,5	3,0
Комутації фільтрів	2,0	2,0
Повторні запалювання дуги у камері вимикача	2,0	1,5

Отже, для забезпечення надійної та безаварійної роботи фільтрових реакторів у складних системах компенсації, крім розрахунку стаціонарних станів, необхідно виконати аналіз можливих перехідних станів. Проаналізувавши можливі перехідні стани в системі електропостачання, приймають розрахункові максимальні пікові значення амплітуд перенапруг і надструмів у колі фільтрового реактора. Еквівалентне номінальне діюче значення напруги $U_{\text{НОМ}}$ для вибору поздовжньої ізоляції фільтрового реактора розраховують за формулою:

$$U_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{пик}}}{a \cdot \sqrt{2}} \quad (6)$$

Еквівалентне номінальне діюче значення струму короткого замикання $I_{кзном}$ визначають як:

$$I_{кзном} = b \cdot \frac{I_{пик}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

У табл. 3 наведено значення номінальних параметрів фільтрового реактора другої гармоніки, визначені з умов усталеного і перехідного режимів для схеми фільтрокомпенсувального пристрою з рис. 2. Розрахункове діюче значення струму основної гармоніки фільтра у цій схемі згідно з вимірюваннями становить 140 А, а розрахункове діюче значення струму другої гармоніки – 102 А. Ці значення взято для розрахунку номінальних параметрів фільтрового реактора за умовами усталеного режиму. Номінальні параметри фільтрового реактора за умовами перехідного режиму розраховані згідно із викладеною вище методикою. Для проєктування фільтра беруть більші значення розрахункових номінальних величин (у табл. 3 виділені), які визначають відповідні вимоги до конструкції, ізоляції та термічних характеристик фільтрового реактора.

Таблиця 3

Розрахункові номінальні параметри фільтрового реактора

Режим роботи фільтра	Номінальні параметри		
	$I_{P ном}$, кА	$I_{кз ном}$, кА	$U_{P ном}$, кВ
Усталений	0,17	0,48	3,90
Перехідний	0,17	1,38	37,80

Підсумовуючи викладене, можна запропонувати таку послідовність визначення критичних перехідних надструмів і перенапруг у колі фільтра для вибору його номінальних струмів і перенапруг:

- здійснити ретельний аналіз електричної мережі та можливих режимів її роботи;
- оцінити можливість і частоту виникнення коротких замикань в електричній мережі;
- проаналізувати характеристики нелінійних навантажень та запропоновані схеми фільтрових кіл, враховуючи їх можливі розлаштування;
- оцінити особливості та повторюваність технологічних увімкнень/вимкнень силових фільтрів, трансформаторів та інших силових елементів електричної мережі;
- здійснити моделювання можливих комутаційних подій в електричній мережі для визначення критичних пікових значень перенапруг і струмів у перехідних режимах;
- визначити еквівалентні номінальні значення параметрів для фільтрових реакторів за умовами перехідного режиму і порівняти їх зі значеннями номінальних параметрів для стаціонарного режиму електричної мережі.

Висновки

У роботі розглянуто проблему вибору номінальних параметрів для фільтрових реакторів, які експлуатуються у схемах силових фільтрів для електричних мереж промислових підприємств. Показано, що коректний вибір параметрів фільтрових реакторів повинен враховувати особливості перехідних режимів, які можуть виникати у системах електропостачання.

Здійснено аналіз основних параметрів фільтрових реакторів та розглянуто особливості їх розрахунку. Наведено характеристику перехідних процесів у колах фільтрових реакторів, які зумовлені основними технологічними та аварійними комутаційними подіями у промислових електричних мережах із нелінійними навантаженнями. Показано, що повторюваність різних видів комутаційних подій неоднакова, і цю їх характеристику також потрібно враховувати під час вибору параметрів фільтрових реакторів. На прикладі електричної мережі живлення електродугової печі

проаналізовано вплив перехідних надструмів і перенапруг на вибір значень номінальних параметрів для проектування фільтрових реакторів.

Розвинуто метод визначення критичних перехідних надструмів і перенапруг у колі фільтра із метою вибору проєктних значень номінальних струмів і перенапруг фільтрових реакторів. Використання наведеного методу під час проектування силових фільтрів дасть змогу уникнути можливого пошкодження фільтрових реакторів внаслідок перегрівання обмоток та прискореного старіння їх ізоляції під час експлуатації, спричинених інтенсивними перехідними процесами у колі фільтра.

Перспективи подальших досліджень

У подальших дослідженнях передбачено розробити модель аналізу впливу частоти налаштування окремого фільтра в схемах складних фільтрокомпенсувальних схем на рівень перенапруг на елементах фільтрів схеми під час типових технологічних та аварійних комутаційних подій у промислових електричних мережах. Це дасть змогу сформулювати вимоги до проектування фільтрів з огляду на особливості перебігу перехідних процесів у таких фільтрокомпенсувальних схемах.

Список літератури

1. *IEEE Std 1036TM-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors.*
2. *IEEE Std 1531™-2020, IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters.*
3. *IEEE Std C57.16™-2011, IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors.*
4. Abdel Aleem, S. H. E., Balci, M. E., Zoba, A. F., Sakar, S., “Optimal passive filter design for effective utilization of cables and transformers under non-sinusoidal conditions”, *16th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014. DOI: 10.1109/ICHQP.2014.6842881.
5. Kawann, C., Emanuel, A. *Passive shunt harmonic filters for low and medium voltage: A cost comparison study.* *IEEE Trans. Power Syst.*, 1996, 11, pp. 1825–1831. DOI: 10.1109/59.544649.
6. Yang, N.-C.; Liu, S.-W. *Multi-Objective Teaching-Learning-Based Optimization with Pareto Front for Optimal Design of Passive Power Filters.* *Energies*, 2021, 14, 6408. <https://doi.org/10.3390/en14196408/>
7. Azab, M. *Multi-objective design approach of passive filters for single-phase distributed energy grid integration systems using particle swarm optimization.* *Energy Rep.*, 2019, 6, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.015>.
8. Wang, S.; Ding, X.; Wang, J. *Multi-objective optimization design of passive filter based on particle swarm optimization.* In *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series. J. Physics Conf. Ser.* 2020, 1549, 032017. DOI: 10.1088/1742-6596/1549/3/032017
9. Badugu, R.; Acharya, D.; Das, D. K.; Prakash, M. *Class Topper Optimization Algorithm based Optimum Passive Power Filter Design for Power System.* In *Proceedings of the 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 8–10 April 2021; pp. 648–652. DOI: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418249.
10. Beres, R. N., Wang, X., Liserre, M., Blaabjerg, F., and Bak, C. L., “A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage source converters”, *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 4, No. 1, pp. 54–69, Mar. 2016. DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2507203.
11. Dionise, T. J. and Lorch, V., “Harmonic filter analysis and redesign for a modern steel facility with two melt furnaces using dedicated capacitor banks”, in *Proc. Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Tampa, FL, USA, Oct. 2006*, pp. 137–143. DOI: 10.1109/IAS.2006.256496.
12. Kusko, A., Medora, N. K., *Switching of power harmonic filters*, *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.* DOI: 10.1109/IAS.1994.377531.
13. Bonner, J. A., Hurst, W. M., Rocamora, R. G., Dudley, R. F., Sharp, M. R., and Twiss, J. A., “Selecting ratings for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters”. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 10, No. 1, pp. 547–555, Jan. 1995. DOI: 10.1109/61.368355.
14. Varetsky, Y., Gajdzica, M., *The procedure for selecting the ratings of capacitor banks and reactors of the filtering systems // Przegląd Elektrotechniczny*, No. 3, 2020, pp. 77–81. DOI:10.15199/48.2020.03.19.
15. Varetsky, Y., Gajdzica, M., *Transients under energizing multiple power filter circuits // Computer applications in electrical engineering*, 2016, Vol. 14, pp. 89–100. DOI: 10.21008/j.1508-4248.2016.0008.

16. IEEE Std 18™-2002. IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
17. Varetsky, Y., Pavlyshyn R., Gajdzica M., Harmonic current impact on transient overvoltages during filter switching-off, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, nr 4, s. 95–98.
18. Varetsky, Y., Simulation of transients for designing multiple power filter circuits // *Computational Problems of Electrical Engineering*, 2017, Vo. 7, No. 2, pp. 117–123
19. Varetsky, Y., Gapanovych, V., Fedonjuk, M. Modeling transient surge on filter reactor during external earth faults, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, No. 80, 2010, pp. 65–66.

References

1. IEEE Std 1036™-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors.
2. IEEE Std 1531™-2020, IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters.
3. IEEE Std C57.16™-2011, IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors.
4. S. H. E. Abdel Aleem, M. E. Balci, A. F. Zobaa, S. Sakar, "Optimal passive filter design for effective utilization of cables and transformers under non-sinusoidal conditions," *16th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014. DOI: 10.1109/ICHQP.2014.6842881.
5. Kawann, C.; Emanuel, A. Passive shunt harmonic filters for low and medium voltage: A cost comparison study. *IEEE Trans. Power Syst.* 1996, 11, 1825–1831. DOI: 10.1109/59.544649.
6. Yang, N.-C.; Liu, S.-W. Multi-Objective Teaching–Learning-Based Optimization with Pareto Front for Optimal Design of Passive Power Filters. *Energies* 2021, 14, 6408. <https://doi.org/10.3390/en14196408/>
7. Azab, M. Multi-objective design approach of passive filters for single-phase distributed energy grid integration systems using particle swarm optimization. *Energy Rep.* 2019, 6, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.015>.
8. Wang, S.; Ding, X.; Wang, J. Multi-objective optimization design of passive filter based on particle swarm optimization. In *Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series. J. Physics Conf. Ser.* 2020, 1549, 032017. DOI: 10.1088/1742-6596/1549/3/032017
9. Badugu, R.; Acharya, D.; Das, D.K.; Prakash, M. Class Topper Optimization Algorithm based Optimum Passive Power Filter Design for Power System. In *Proceedings of the 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 8–10 April 2021; pp. 648–652. DOI: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418249.
10. R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, and C. L. Bak, "A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage source converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 4, No. 1, pp. 54–69, Mar. 2016. DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2507203.
11. T. J. Dionise and V. Lorch, "Harmonic filter analysis and redesign for a modern steel facility with two melt furnaces using dedicated capacitor banks," in *Proc. Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Tampa, FL, USA, Oct. 2006*, pp. 137–143. DOI: 10.1109/IAS.2006.256496.
12. A. Kusko; N.K. Medora, Switching of power harmonic filters, *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. DOI: 10.1109/IAS.1994.377531
13. J. A. Bonner, W. M. Hurst, R. G. Rocamora, R. F. Dudley, M. R. Sharp, and J. A. Twiss, "Selecting ratings for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 10, No. 1, pp. 547–555, Jan. 1995. DOI: 10.1109/61.368355.
14. Varetsky Y., Gajdzica M. The procedure for selecting the ratings of capacitor banks and reactors of the filtering systems // *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 3, 2020. P. 77–81. DOI:10.15199/48.2020.03.19.
15. Varetsky Y., Gajdzica M. Transients under energizing multiple power filter circuits // *Computer applications in electrical engineering*. 2016, Vol. 14, P. 89–100. DOI: 10.21008/j.1508-4248.2016.0008.
16. IEEE Std 18™-2002. IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
17. Varetsky Y., Pavlyshyn R., Gajdzica M. Harmonic current impact on transient overvoltages during filter switching-off, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, nr 4, s. 95–98.
18. Varetsky Y. Simulation of transients for designing multiple power filter circuits // *Computational Problems of Electrical Engineering* 2017, Vol. 7, No. 2, pp. 117–123
19. Varetsky Y., Gapanovych V., Fedonjuk M. Modeling transient surge on filter reactor during external earth faults, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 2010. No. 80, pp. 65–66.

Y. Varetsky

Lviv Polytechnic National University,
Department of Power Engineering and Control Systems,
e-mail: yurii.o.varetskyi@lpnu.ua.

Z. Hanzelka

AGH University of Science and Technology,
Department of Power Electronics and Automation of Energy Processing Systems,
e-mail: hanzel@agh.edu.pl.

© Varetsky Y., Hanzelka Z., 2022

SIZING FILTER REACTORS FOR INDUSTRIAL ELECTRICAL GRIDS

Most modern industrial electrical grids are characterized by a significant content of nonlinear loads, creating many operation problems. Power harmonic filters are one of the most effective ways of reducing voltage distortion in electrical grids. The use of power filters solves two main concerns - to reduce the input current harmonic distortion of the power supply system and compensate for the reactive power of loads. As a rule, the sizing nominal parameters of filter circuits is carried out by the power supply system characteristics in stationary (steady) operating condition. However, field experience has shown that this approach does not always ensure a trouble-free operation of filters, and the main reason is no consideration of transient overvoltages and overcurrents in the sizing of the parameters of filter capacitors and reactors. The article is devoted to the problem of sizing the nominal parameters of filter reactors, as one of the two main components of the filter, for industrial electrical grids with a significant intensity of switching events. It is shown that for such electrical grids it is necessary to include transient overvoltages and overcurrents to the correct sizing parameters of filter reactors.

The main parameters of filter reactors are analysed, and their calculation's peculiarities are considered. The characteristics of transients in filter reactor circuits, which are caused by the main technological and emergency switching events in industrial power supply systems with nonlinear loads, are given. It is shown that different types of switching events have different repetitiveness that should also be considered when sizing the parameters of filter reactors.

The method for determining the critical transient overcurrents and overvoltages in the filter circuit in calculating the design values of rated currents and overvoltages of the filter reactors is developed. The use of this method in the design of power filters will avoid possible damage to filter reactors due to overheating of the windings and accelerated insulation ageing during operation, caused by intense transients in the filter circuit.

Keywords: industrial electric grid, current harmonics, nonlinear load, harmonic power filters, filter reactor.