

Ю. О. Варецький^{1,2}, М. Гайдзіца², О.О. Коваль¹

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроенергетики та систем управління,
e-mail: yurii.o.varetskyi@lpnu.ua.

²Гірничо-металургійна академія ім. С. Сташиця в Кракові,
кафедра енергетики і палив
e-mail: michal.gajdzica@wp.pl

ПРОБЛЕМА ПЕРЕНАПРУГ НА СИЛОВИХ ФІЛЬТРАХ У ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

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

© Варецький Ю. О., Гайдзіца М., Коваль О.О., 2022

У промислових електричних мережах широко використовують силові фільтри гармонік, які дають можливість покращити якість напруги на шинах системи електропостачання і підвищити коефіцієнт потужності навантаження. Задача вибору схеми та параметрів фільтро-компенсувальної схеми пов'язана з необхідністю врахування вимог компенсації гармонік струму і реактивної потужності навантаження, особливостей схеми електропостачання та її режимів, а також характеристик перехідних процесів, які можуть виникати під час експлуатаційних перемикань. Процедури вибору параметрів силових фільтрів та рекомендації щодо застосування у типових промислових електричних мережах розглянуті у чинних міжнародних стандартах та багатьох публікаціях у періодичних спеціалізованих виданнях. Однією з проблем під час вибору параметрів силових фільтрів є проблема налаштування окремих фільтрів у складній фільтро-компенсувальній схемі, яка пов'язана з технологічними відхиленнями параметрів використовуваних реакторів і конденсаторів. Крім робочих характеристик електричної мережі у стаціонарному режимі під час проектування фільтрів потрібно брати до уваги також можливі перехідні перенапруги та надструми, які є характерними для вибраної системи електропостачання. Як показує аналіз доступної інформації, в інженерній практиці не існує загальноприйнятих рекомендацій щодо врахування відхиленнями параметрів фільтрів, які вимушують змінювати порядок їх налаштування, на рівень максимальних перенапруг на реакторах і конденсаторах фільтрів.

У пропонованій статті розглянуто метод визначення максимальних перенапруг на реакторах і конденсаторах фільтрів на підставі моделювання характерних для вибраної промислової електричної мережі експлуатаційних перемикань. Дослідження перехідних процесів у системі електропостачання виконано на моделі, опрацьованій з використанням пакета MATLAB Simulink. В процесі досліджень здійснено аналіз впливу міри налаштування фільтрів у складній фільтро-компенсувальній схемі на рівень максимальних перенапруг, які спричинені технологічними перемиканнями, та наведено порівняльні характеристики перехідних перенапруг у можливих конфігураціях фільтрів. Показано, що використання у фільтро-компенсувальній схемі демпфованого фільтра типу “С” дозволяє значно зменшити рівень перехідних перенапруг на реакторах і конденсаторах фільтрів, а також практично усунути вплив розлаштування фільтрів на рівень перенапруг. Запропонований у роботі підхід до визначення максимальних перенапруг на обладнанні фільтрів може бути використаний у задачах проектування фільтро-компенсувальних схем для систем електропостачання різного призначення.

Ключові слова: промислова електрична мережа, силові фільтри гармонік, фільтро-компенсувальна схема, розлаштування фільтра, фільтр типу “С”.

Вступ

Проблема зростання несинусоїдності напруг і струмів в промислових електричних мережах пов'язана зі зростанням впровадження в експлуатацію нелінійних навантажень, таких як дугові печі, дугові зварювальні апарати, регульовані приводи, прокатні стани, тяговий електротранспорт. В теперішній час застосування пасивних фільтрів гармонік є найбільш апробованим і найчастіше використовуваним методом, який використовують в інженерній практиці для зменшення несинусоїдності напруг і струмів у таких мережах. Це підтверджують чинні стандарти та чисельні публікації [1-15]. У процесі проектування фільтрів потрібно враховувати багато факторів для забезпечення їх подальшої надійної та безаварійної експлуатації. У багатьох системах електропостачання їх обладнання, а також окремі фільтри, часто перемикають згідно з вимогами технологічного процесу підприємства. Як наслідок, у колах фільтрів викликають перехідні перенапруги на окремих компонентах фільтрів, які перевищують напругу на шинах їх приєднання.

На практиці досить часто використовують фільтро-компенсувальні системи, які комплектують окремими пасивними LC-фільтрами, а в деяких варіантах у таких схемах використовують також демпфований фільтр типу “С”. У промислових мережах середньої напруги індивідуальні фільтри у фільтро-компенсувальних системах, як правило, підключаються до мережі через індивідуальні або спільні вимикачі. В практичних схемах силових фільтрів ємності конденсаторів та індуктивності реакторів завжди мають певні технологічні відхилення від бажаних для заданої резонансної частоти величин, що призводить до певних змін резонансних властивостей імпедансно-частотних характеристик цілої системи електропостачання. Це має вплив на характеристики усталених і перехідних режимів фільтрів. Неправильна оцінка цих факторів може бути причиною пошкодження реакторів чи конденсаторів фільтра через перевантаження та перенапруги, що виникають під час усталених або перехідних режимів роботи.

На прикладі фільтро-компенсувальної системи статичного тиристорного компенсатора в роботі виконано аналіз впливу змін частоти налаштування фільтрів, викликаних технологічними відхиленнями параметрів використовуваних конденсаторів і реакторів, на характер перехідних перенапруг на окремих елементах фільтрів. Також досліджено особливості перехідних процесів у схемі фільтро-компенсувальної системи з демпфованим фільтром типу “С”. Дослідження здійснено на комп'ютерній моделі системи електропостачання опрацьованій на платформі середовища MATLAB.

Актуальність дослідження

Аналіз пошкодження фільтрів у промислових електричних мережах часто вказує на неправильне врахування в процесі розроблення його конструкції особливостей перехідних процесів під час можливих комутаційних подій, які є характерними для цих мереж з огляду технологію виробництва. У фільтро-компенсувальних системах частоти налаштування окремих фільтрів вибирають з умови необхідності мінімізації заданих частот гармонік в мережі, яка живить певне нелінійне навантаження. Оскільки реактивний опір фільтра, налаштованого на вищі гармоніки, на робочій частоті завжди має ємнісний характер, то цю особливість завжди використовують з метою компенсації реактивної потужності навантаження. Оскільки часто технологічні режими промислового підприємства потребують зміни рівня компенсації реактивної потужності, то окремі фільтри фільтро-компенсувальної системи можуть періодично вимикати та вмикати в процесі експлуатації. В деяких промислових електричних мережах відбуваються періодичні вмикання/вимикання силових трансформаторів, які підключені до спільних з фільтрами гармонік шин. Найбільшою інтенсивністю таких перемикань характеризуються системи електропостачання електродугових комплексів та електричні мережі живлення промислових тягових локомотивів.

Аналіз цих комутацій показує, що вони збуджують виникнення значних перехідних перенапруг на фільтрових конденсаторах та реакторах.

Оцінка впливу неточності налаштування фільтра внаслідок технологічних відхилень параметрів їх конденсаторів і реакторів на конструкцію фільтра за умов стаціонарного режиму роботи може бути врахована під час проектування за допомогою відносно простих методів, які окреслено в чинних стандартах. Проте для визначення можливих перенапруг і надструмів в елементах фільтра під час перехідних процесів необхідно здійснити аналіз конкретної системи електропостачання з заданою фільтро-компенсувальною схемою. Тому завжди є актуальною проблема визначення критичних факторів під час дослідження характеристик перехідних процесів у колах фільтрових реакторів. В поданій роботі ця проблема розглянута на прикладі реальної системи електропостачання.

Формулювання мети та завдань статті

Метою роботи є дослідження впливу технологічних відхилень параметрів конденсаторів і реакторів на рівень перехідних перенапруг у колах фільтрів гармонік під час типових перемикачів в системі електропостачання. Завданням статті є виклад методології дослідження перехідних процесів у колах фільтрових реакторів та формулювання рекомендацій щодо можливих методів обмеження перехідних перенапруг на реакторах і конденсаторах фільтрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В статті [5] запропоновано методику проектування оптимальних схем фільтрових кіл для промислових електричних мереж з врахуванням впливу трансформаторів. Особливості конструкцій пасивних фільтрів для промислових мереж низької та середньої напруги, їх вартісні характеристики висвітлено в роботі [6]. Алгоритми оптимізації параметрів фільтрів для електричних мереж різного призначення та їх аналіз розглянуто в роботах [7-9]. Матеріал статті [10] присвячено методиці розрахунку силових фільтрів для систем електропостачання з нелінійними навантаженнями, тут також розглянуто вплив технологічних відхилень на ефективність роботи фільтра. Викладені в публікації [11] результати досліджень висвітлюють проблеми застосування фільтрів для мереж з силовими перетворювачами. В роботі [12] висвітлено особливості врахування перехідних процесів в колах силових фільтрів у процесі вибору параметрів фільтрів для промислових електричних мереж. Хоча в дослідженнях викладених у [13,14,15] аналізуються причини пошкодження силових фільтрів у системі електропостачання дугових печей, що вказує на необхідність врахування перехідних перенапруг на елементах фільтрів у процесі їх проектування, у згаданих вище роботах не наводяться методи аналізу критичних амплітуд перехідних перенапруг на обладнанні фільтрів, які необхідні для їх коректного проектування. Аналіз доступних публікацій показав відсутність досліджень впливу технологічних відхилень параметрів фільтрових конденсаторів і реакторів на рівень максимальних перехідних перенапруг у колах складних фільтро-компенсувальних схем.

Налаштування силових фільтрів

Налаштування фільтра передбачає вибір відповідної резонансної частоти f_r послідовного LC кола цього фільтра з метою зниження спотворень напруги в системі електропостачання й усунення можливих паралельних резонансів між фільтро-компенсувальною схемою та системою електропостачання. Практика експлуатації фільтро-компенсувальних схем, які складаються з кількох фільтрів і можуть працювати у різних конфігураціях, показала, що налаштування окремих фільтрів схеми необхідно виконувати на частоти, дещо нижчі від частот гармонік струму, які бажано обмежувати. Такий підхід зумовлений двома основними причинами:

- технологічні відхилення параметрів конденсаторів і реакторів, які використовують для заданого фільтра схеми;

- усунення можливості резонансного підсилення окремих гармонік струму в системі електропостачання внаслідок змін параметрів фільтрів в процесі експлуатації, які викликають збільшення частоти налаштування понад номінальну частоту заданої гармоніки.

Ріні виробники гарантують у більшості випадків технологічні відхилення ємності конденсаторів у межах $\pm 5\%$ від її номінального значення. Згідно з вимогами стандарту IEEE Std 18-2002 [4] конденсатори повинні мати технологічні відхилення в межах $0 \dots +10\%$ від номінальної ємності. Технологічні відхилення індуктивності фільтрових реакторів суттєво залежать від наявності у їх конструкції феромагнітного осердя і можуть мати значення в межах $-3 \dots +3\%$ чи $0 \dots -6\%$ від номінального значення. Тому, враховуючи технологічні відхилення параметрів конденсаторів і реакторів в умовах номінального значення робочої частоти мережі, можна очікувати зміни значення відносної частоти налаштування фільтра n_r в наступних межах для бажаного значення n_F :

$$\frac{n_F}{\sqrt{(1 + \Delta L_+)(1 + \Delta C_+)}} \leq n_r \leq \frac{n_F}{\sqrt{(1 + \Delta L_-)(1 + \Delta C_-)}}, \quad (1)$$

де $\Delta L_+, \Delta C_+, \Delta L_-, \Delta C_-$ - декларовані додатні і від'ємні відносні технологічні відхилення індуктивностей і ємностей елементів фільтра.

Згідно загальноприйнятою методологією налаштування фільтрів очевидним є співвідношення:

$$n_F = k \cdot n_G, \quad (2)$$

де $n_F = f_F / f_{\text{ном}}$ - відносна частота налаштування фільтра; $n_G = f_G / f_{\text{ном}}$ - порядок гармоніки налаштування фільтра; $f_{\text{ном}}$ - номінальна частота мережі.

Коефіцієнт налаштування фільтра $k = 0,92 \dots 0,98$ залежить від вибраного типу конденсаторів і реакторів фільтра, а також від порядку гармоніки налаштування фільтра. Його вибирають так, щоб забезпечити вищевказані умови налаштування фільтра.

Так, якщо взяти для прикладу значення технологічних відхилень ємності конденсаторів у межах $\pm 5\%$ від номінального і значення відхилень індуктивності фільтрових реакторів у межах $-3 \dots +3\%$, то за умови точного налаштування фільтра третьої гармоніки ($n_F = n_G$) можна очікувати зміну налаштування цього фільтра у межах:

$$2,89 \leq n_r \leq 3,13. \quad (3)$$

Це означає, що при заданих технологічних відхиленнях параметрів елементів фільтра слід прийняти відносну частоту його налаштування як мінімум на 0,13 відносних одиниць частоти нижчою від номінальної, тобто $n_F = 2,87$. У цьому випадку можливі зміни відносної частоти налаштування можна очікувати у межах:

$$2,76 \leq n_r \leq 3,0, \quad (4)$$

і, відповідно, коефіцієнт налаштування фільтра $k = 0,96$.

Якщо використовувати конденсатори і реактори з тими ж технологічними відхиленнями для фільтра одинадцятої гармоніки, то мінімальну відносну частоту його налаштування слід взяти на рівні $n_F = 10,55$. Можливі зміни відносної частоти налаштування можна очікувати у межах:

$$10,16 \leq n_r \leq 11,0. \quad (5)$$

Звідси видно, що для фільтрів вищих порядків за таких самих значень технологічних відхилень параметрів обладнання будуть проявлятися більші межі змін відносної частоти налаштування. Проте можна переконатися, що для фільтрів будь якого порядку за таких самих значень технологічних відхилень параметрів обладнання коефіцієнт налаштування фільтра буде залишатися величиною сталою. Для наведеного тут прикладу для фільтра одинадцятої, як і для фільтра 3 гармоніки коефіцієнт налаштування також дорівнює $k = 0,96$.

Вказані зміни частоти налаштування фільтрів в усталених станах роботи мають вплив на ефективність компенсації гармонік струму системи електропостачання. Зі зниженням частоти налаштування фільтра відносно заданої частоти гармоніки знижується значення цієї гармоніки у колі фільтра. Проте, такий підхід до налаштування фільтрів усуває можливість паралельних резонансів, особливо у тих випадках, коли фільтро-компенсувальна система містить кілька фільтрів, а спектр

гармонік струму навантаження у системі електропостачання характеризується часто повним спектром гармонік. Характерними з цього погляду є системи електропостачання електродугових печей. Як показав досвід експлуатації, зміни частоти налаштування фільтрів мають вплив і на характер перехідних процесів у колах фільтрів, які, як правило, спричиняються нормальними комутаційними подіями в системі електропостачання, такими як перемикання технологічного обладнання та перемикання окремих фільтрів.

На прикладі фрагмента реальної системи електропостачання електродугових печей, який містить фільтро-компенсувальну систему, як частину статичного компенсатора, призначеного для швидкодійної компенсації реактивної потужності, далі розглянуто проблему перехідних процесів у колах фільтрів.

Коротка характеристика системи електропостачання

Досліджувана система електропостачання, взята в модельних дослідженнях, складається з електродугової печі змінного струму, котра живиться від пічного трансформатора ПТ з номінальною потужністю 50 МВА та статичного компенсатора реактивної потужності складеного з тиристорно реакторної групи (ТРГ) і фільтро-компенсувальної системи (ФК). У ході дослідження було проаналізовано дві можливі конфігурації фільтро-компенсувальних систем, які складаються з фільтрів другої (F2), третьої (F3) та п'ятої (F5) гармонік:

1 – F2, F3 та F5 є простими LC фільтрами;

2 – F2 є фільтром типу “С”, а F3 та F5 є простими LC фільтрами.

Причому у першій та другій конфігураціях фільтри відповідних гармонік мають ті ж номінальні потужності: другої – 5 МВА, третьої 22МВА та п'ятої 15 МВА. На рис.1 показано спрощені схеми досліджуваних конфігурацій фільтро-компенсувальних систем.

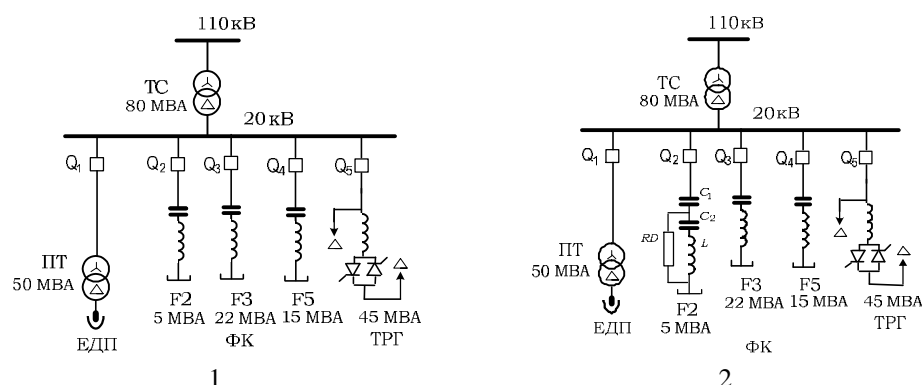


Рис. 1. Досліджувані конфігурації фільтро-компенсувальних систем

У таблиці 1 наведено значення параметрів фільтро-компенсувальної системи за умови ідеального та дійсного налаштування фільтрів, а у таблиці 2 – наведено параметри фільтра типу “С” для обох випадків налаштування.

Таблиця 1

Параметри фільтрів

Фільтр	Відносна частота налаштування	Ємність, С [мкФ]	Індуктивність, L [мГ]	Резистанс, R [Ом]	Номінальний струм, I _{ном} [А]
Ідеальне налаштування					
F2	2,0	29,86	84,94	0,24	144

F3	3,0	155,05	7,27	0,06	632
F5	5,0	114,64	3,54	0,03	433
Дійсне налаштування					
F2	1,86	28,30	103,59	0,27	144
F3	2,79	152,01	8,57	0,07	632
F5	4,65	113,90	4,12	0,04	433

Таблиця 2

Параметри фільтра типу “С” другої гармоніки

Ідеальне налаштування					
Відносна частота налаштування	Ємність, C_1 [мкФ]	Ємність, C_2 [мкФ]	Індуктивність, L [мГ]	Резистанс, R_D [Ом]	Номінальний струм, $I_{ном}$ [А]
2,00	39,79	119,37	84,94	100,00	144
Дійсне налаштування					
1,86	39,79	97,86	103,59	107,53	144

На рисунку 2 показані частотні характеристики досліджуваної електропостачальної системи для різних порівнюваних частот налаштування фільтрів, за якими можна оцінити зміну ефективності компенсації гармонік у стаціонарному стані роботи системи.

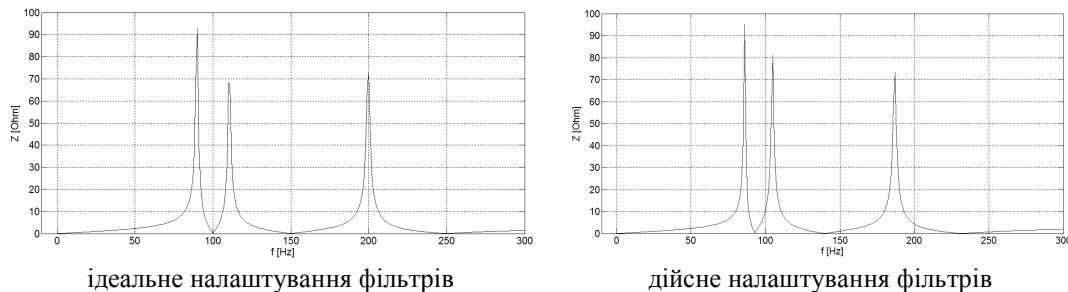


Рис. 2. Частотні характеристики системи електропостачання

Перехідні процеси в системі електропостачання

Дослідження перехідних процесів у системі електропостачання виконано на моделі, опрацьованій з використанням пакета MATLAB Simulink. Метою імітаційних досліджень було визначення впливу зміни частоти налаштування складових фільтро-компенсуючої системи на значення максимальних амплітуд перехідних напруг і струмів у колах фільтрів. Аналіз процесів здійснено для типових технологічних перемикачів у системі електропостачання, під час яких виникають критичні амплітуди перехідних напруг і струмів: увімкнення пічного трансформатора та ввімкнення окремих фільтрів системи. Під час досліджень здійснено цілий спектр експериментів з врахуванням різних конфігурацій фільтрів і різної міри точності їх налаштування. Далі наведено характеристики перехідних процесів у колах фільтрів досліджуваної системи електропостачання, для яких зареєстровано критичні значення перехідних напруг на елементах фільтрів.

Увімкнення пічного трансформатора. На рис. 3 показано модельні осцилограми перехідних напруг на конденсаторах і реакторах фільтра другої гармоніки під час увімкнення пічного

трансформатора електродугової печі. Наведені осцилограми дозволяють оцінити значення максимальних перенапруг на елементах фільтра у схемі з трьома простими фільтрами (див. рис. 1а).

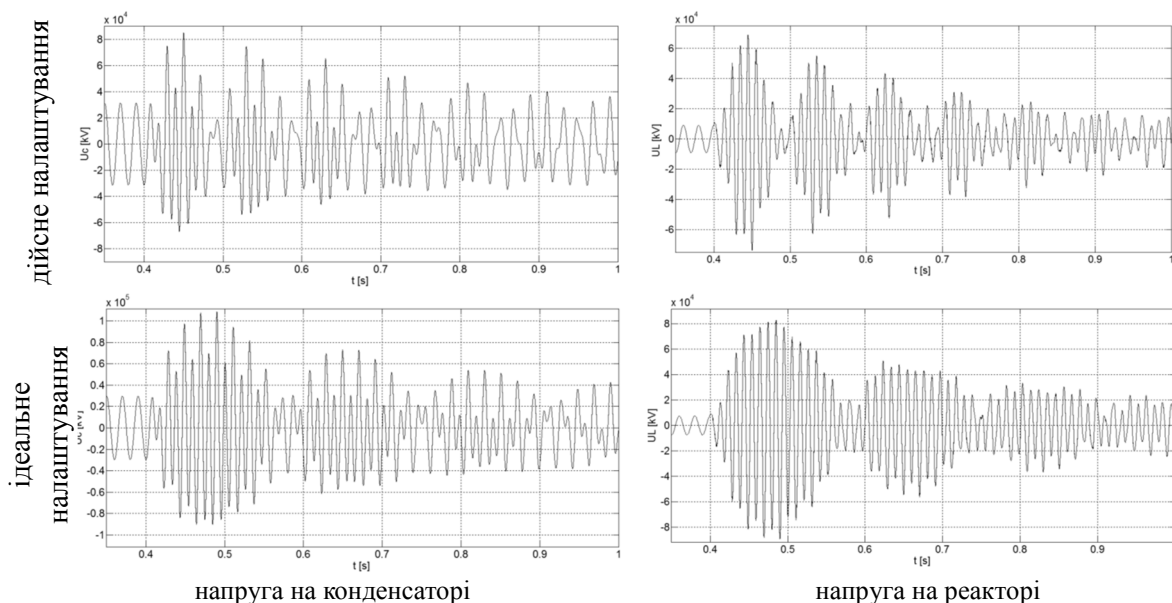


Рис. 3. Перехідні напруги на конденсаторі та реакторі фільтра

З наведених осцилограм видно, що зміна міри налаштування фільтра призводить до зміни характеру перехідного процесу в колі фільтра і до зміни значень максимальних перенапруг, які виникають на його конденсаторах і реакторах. Загальною тенденцією є те, що зниження відносної частоти налаштування фільтра спричиняє зменшення максимальних значень перенапруг на його елементах. Другим важливим результатом встановленим під час аналізу є факт зменшення максимальних значень перехідних перенапруг у фільтро-компесувальній схемі, яка містить неповний, порівняно з нормальною схемою, склад фільтрів. Результати аналізу максимальних кратностей перенапруг на конденсаторах і реакторах фільтрів під час увімкнення пічного трансформатора відносно значень напруг у стаціонарному режимі роботи наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Кратності максимальних перенапруг при увімкненні пічного трансформатора

Фільтр	Конденсатор	Реактор
Дійсне налаштування		
F2	3,71	11,10
F3	1,67	5,01
F-5	1,65	10,87
Ідеальне налаштування		
F2	4,73	13,42
F3	1,79	5,85
F5	1,85	11,01

З результатів дослідження, наведених у таблиці 3, бачимо, що в умовах ідеального налаштування фільтрів спостерігаються більші кратності перенапруг на елементах усіх фільтрів схеми ніж в умовах дійсного налаштування фільтрів, виконаного за вимогами врахування можливих технологічних відхилень використаних конденсаторів і реакторів.

Увімкнення фільтрів. Під час увімкнення окремих фільтрів також спостерігається зміна характеру перехідного процесу у фільтро-компенсувальній схемі. Причому більші амплітуди максимальних перенапруг на конденсаторах і реакторах фільтрів будуть у випадку увімкнення кількох фільтрів одночасно, ніж при увімкненні одного з фільтрів. Тут також більші значення амплітуд максимальних перенапруг характерні для схеми з ідеальним налаштуванням фільтрів. Для цього типу комутацій потрібно відзначити повільніше згасання перехідного процесу і дещо більші значення пікових амплітуд порівняно з увімкненнями пічного трансформатора на окремих елементах фільтрів. У таблиці 4 наведено результати дослідження перехідних перенапруг на конденсаторах і реакторах фільтрів під час увімкнення фільтрів у досліджуваній системі електропостачання.

Таблиця 4

Кратності максимальних перенапруг при увімкненні фільтрів

Фільтр	Конденсатор	Реактор
Дійсне налаштування		
F2	3,91	10,43
F3	2,34	6,86
F-5	2,35	8,48
Ідеальне налаштування		
F2	3,58	9,51
F3	2,42	6,20
F5	2,34	7,59

Вплив на перехідні процеси фільтра типу “С”. Використання у фільтро-компенсувальній схемі цього фільтра суттєво впливає на протікання перехідних процесів у всіх фільтрах схеми. Ввімкнення фільтра типу “С” другої гармоніки, що містить додатковий демпфувальний опір R_D , замість простого LC фільтра другої гармоніки дає можливість значно зменшити рівень максимальних перенапруг на конденсаторах і реакторах, а також прискорити згасання перехідних процесів. У таблиці 5 показано максимальні амплітуди перехідних перенапруг на конденсаторах і реакторах фільтрів під час увімкнення пічного трансформатора у випадку застосування фільтра типу “С” другої гармоніки у фільтро-компенсувальній схемі.

Таблиця 5

Кратності максимальних перенапруг у схемі з фільтром типу “С”

Фільтр	Конденсатор	Реактор
Дійсне налаштування		
F2	2,02	5,36
F3	1,83	3,86
F-5	1,67	1,74
Ідеальне налаштування		
F2	2,02	5,38
F3	1,91	4,03
F5	1,43	1,81

З наведених у таблиці результатів видно, що значно зменшилися максимальні амплітуди перехідних перенапруг на конденсаторах і реакторах усіх фільтрів схеми. Крім того, важливо

зазначити іншу особливість такої фільтро-компенсувальної схеми: використання фільтра типу “С” практично усуває проблему налаштування фільтрів. Тобто, максимальні амплітуди перехідних перенапруг на елементах схеми практично не залежать від значень технологічних відхилень параметрів використаних конденсаторів і реакторів.

Висновки

В роботі розглянуто проблему перенапруг у схемах фільтрів гармонік, які експлуатуються в електричних мережах промислових підприємств. Внаслідок технологічних відхилень параметрів фільтрів та особливостей несинусоїдних режимів у цих мережах порядок налаштування фільтра, призначеного для компенсації вибраної гармоніки струму навантаження, повинен бути нижчим від порядку цієї гармоніки. Здійснено аналіз впливу технологічних відхилень параметрів конденсаторів і реакторів силових фільтрів гармонік на характер перехідних процесів і рівень максимальних перенапруг на елементах фільтрів під час експлуатаційних перемикачів у реальній системі електропостачання.

В результаті модельних досліджень перехідних процесів, спричинених основними експлуатаційними перемикачними у системі електропостачання, яка містить вибрану фільтро-компенсувальну схему з кількома фільтрами, встановлено наступні особливості:

- максимальні амплітуди перенапруг на конденсаторах і реакторах фільтрів і тривалість перехідного процесу в схемі залежать від міри налаштування фільтрів, яка визначається значеннями технологічних відхилень їх параметрів – зі збільшенням точності налаштування фільтрів зростають максимальні амплітуди перенапруг на конденсаторах і реакторах;
- застосування фільтра типу “С” у фільтро-компенсувальній схемі дає можливість суттєво зменшити максимальні амплітуди перенапруг на конденсаторах і реакторах усіх фільтрів схеми;
- технологічні відхилення параметрів фільтрових конденсаторів і реакторів не мають практичного впливу на рівень максимальних амплітуд перехідних перенапруг, якщо фільтро-компенсувальна схема містить фільтр типу “С”.

Опрацьована модель і метод дослідження перехідних процесів у системі електропостачання, яка містить вибрану фільтро-компенсувальну схему, дають можливість визначати критичні значення перенапруг на елементах фільтрів залежно від конкретних параметрів такої системи. Отримані результати в частині очікуваних значень перенапруг є необхідними для проектування конструкції силових фільтрів згідно з методиками викладеними у чинних стандартах.

Перспективи подальших досліджень

В подальших дослідженнях передбачено розробити модель і дослідити вплив технологічних відхилень параметрів фільтра на показники стаціонарних і перехідних режимів комплексних фільтро-компенсувальних схем, які містять крім фільтрів також і конденсаторні батареї. Такі фільтро-компенсувальні схеми часто застосовують у промислових електричних мережах, а їх експлуатація, як показав досвід, часто супроводжується пошкодженнями окремих елементів схеми. Це вказує на актуальність вибраного напрямку дослідження.

Список використаних джерел

1. *IEEE Std 1036TM-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors.*
2. *IEEE Std 1531TM-2020, IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters.*
3. *IEEE Std C57.16TM-2011, IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors.*
4. *IEEE Std 18TM-2002. IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.*
5. *Foqha T., Alsadi S., Omari O. et al. "A new iterative approach for designing passive harmonic filters for variable frequency drives," Appl. Math. Inf. Sci. 17, No. 3, 2023, pp.453-468. <https://doi:10.18576/amis/170307>*

6. Melo I.D., Pereira J.L.R., Variz A.M., et al. "Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement." *Electr. Power Systems Res.*, 2020, 180, 106128. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106128>
7. 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>
8. 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>
9. 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. <https://doi.10.1088/1742-6596/1549/3/032017>
10. Das J. C. "Passive Filters—Potentialities and Limitations *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 4, No. 1, 2004; pp. 232–241. <https://doi.10.1109/TIA.2003.821666>
11. 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. <https://doi.10.1109/JESTPE.2015.2507203>
12. 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. <https://doi.10.15199/48.2020.03.19>
13. Jannesar M.R., Sedighi A., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Guerrero J.M. "Optimal probabilistic planning of passive harmonic filters in distribution networks with high penetration of photovoltaic generation", *Int. J. Electrical Power Energy Syst.*, vol. 110, 2019, pp. 332–348.
14. Medora N.K., Kusko A. "Computer-Aided Design and Analysis of Power-Harmonic Filters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 36, No. 2, 2000, pp. 604–613. [https://doi.10.1109/0093-9994\(00\)02408-7](https://doi.10.1109/0093-9994(00)02408-7)
15. Abdelrahman S., Milanović J.V., "Practical approaches to assessment of harmonics along radial distribution feeders," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 34 (3), 2019, pp.1184–1192. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2901245>

References

1. *IEEE Std 1036TM-1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors.*
2. *IEEE Std 1531TM-2020, IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters.*
3. *IEEE Std C57.16TM-2011, IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors.*
4. *IEEE Std 18TM-2002. IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.*
5. Foqha T., Alsadi S., Omari O. et al. "A new iterative approach for designing passive harmonic filters for variable frequency drives," *Appl. Math. Inf. Sci.* 17, No. 3, 2023, pp.453-468. <https://doi:10.18576/amis/170307>
6. Melo I.D., Pereira J.L.R., Variz A.M., et al. "Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement." *Electr. Power Systems Res.*, 2020, 180, 106128. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106128>
7. 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>.
8. 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, pp. 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.015>.
9. 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. <https://doi.10.1088/1742-6596/1549/3/032017>
10. Das J. C. "Passive Filters—Potentialities and Limitations *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 4, No. 1, 2004; pp. 232–241. <https://doi.10.1109/TIA.2003.821666>
11. 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. <https://doi.10.1109/JESTPE.2015.2507203>
12. 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. <https://doi.10.15199/48.2020.03.19>

13. Jannesar M.R., Sedighi A., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Guerrero J.M. "Optimal probabilistic planning of passive harmonic filters in distribution networks with high penetration of photovoltaic generation", *Int. J. Electrical Power Energy Syst.*, vol. 110, 2019, pp. 332–348.

14. Medora N.K., Kusko A. "Computer-Aided Design and Analysis of Power-Harmonic Filters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 36, No. 2, 2000, pp. 604–613. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2901245>

15. Abdelrahman S., Milanović J.V., "Practical approaches to assessment of harmonics along radial distribution feeders," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 34 (3), 2019, pp.1184–1192. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2901245>

Y. Varetsky^{1,2}, M. Gajdzica², O. Koval

¹Lviv Polytechnic National University,
Department of Power Engineering and Control Systems,
e-mail: yurii.o.varetskyi@lpnu.ua.

²AGH University of Science and Technology,
Department of Energy and Fuels,
e-mail: michal.gajdzica@wp.pl.

CONCERN OF OVERVOLTAGES ON POWER FILTERS IN INDUSTRIAL ELECTRICAL NETWORKS

© Varetsky Y., Gajdzica M., Koval O., 2022

Harmonic power filters are widely used in industrial electrical grids, which make it possible to improve the voltage quality on the power supply system buses and to increase the load power factors. Selecting the scheme and parameters of the filter-compensation unit is related to the requirements for compensation of the harmonic currents and load reactive power, the characteristics of the power supply configuration and its operating conditions, as well as the indices of transients that may occur during the operational switching. Procedures for selecting power filter parameters and recommendations for use in typical industrial electrical networks are presented in current international standards and many publications in periodical specialized issues. One of the concerns when choosing the power filter parameters is the optimal tuning of individual filters in a scheme consisting of multiple single-tuned filters, which is associated with manufacturing tolerances in the parameters of the used reactors and capacitors. In addition to the indices of the electric grid operation stationary conditions, when designing the filters, it is necessary to take into account the possibility of transient overvoltage and overcurrent, which are specific to the selected power supply system. The analysis of the available information shows, that in engineering practice there are no generally accepted recommendations for considering the impact of the filter parameter tolerances, changing the order of filter tuning, on the level of maximum overvoltages on the filter reactors and capacitors.

The proposed article presents a method for determining the maximum overvoltages on reactors and filter capacitors based on the simulation of operational switching in the selected industrial electrical grid. The study of transients in the power supply system was performed on a model developed using the MATLAB Simulink package. In this study, the impact of the filter tuning degree in a complex filter-compensating unit on the level of maximum overvoltages caused by operational switching is analyzed and comparative characteristics of transient overvoltages in possible filter configurations are provided. It is shown that the use of a "C" type damped filter in the filter-compensation scheme allows for a significant reduction in the level of transient overvoltages on the filter reactors and capacitors, as well as practically eliminates the impact of the filter detuning on the overvoltage level. The approach proposed in the work to determine the maximum overvoltages on filter equipment can be used in designing filter-compensating schemes for power supply systems of various purposes.

Keywords: industrial electrical network, harmonic power filters, filter-compensation unit, filter tuning, "C" type filter.