

УДК 621.316.761.2

Ю.О. ВАРЕЦЬКИЙ (д-р техн. наук, проф.), **Р. І. ПАВЛИШИН**, **І. В. ТАРАН**
Національний університет «Львівська політехніка»
j.varetsky@gmail.com

ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕМПФОВАНОГО ФІЛЬТРА В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ

Здійснено аналіз процесів під час увімкнення трансформатора у електропостачальній системі електродугової печі з фільтрами вищих гармонік. Показано особливості їх протікання у випадку застосування демпфованого фільтра. Подано характеристику основних факторів впливу на перехідні характеристики процесу, що дозволяє врахувати їх під час проектування і експлуатації систем фільтрів вищих гармонік у системах електропостачання нелінійних навантажень.

Ключові слова: система електропостачання, перехідний процес, увімкнення трансформатора, перенапруга, електродугова піч, демпфований фільтр, вищі гармоніки.

Проблема. Під час увімкнення трансформатора виникають перехідні струми, котрі прийнято називати струмами ввімкнення трансформатора. Ці перехідні струми можуть досягати значних величин, часто 6...8 кратних значень відносно номінального струму трансформатора, і тривати кілька секунд. Зокрема, в електропостачальних системах з потужними електродуговими печами (ЕДП) струми ввімкнення пічних трансформаторів можуть бути причиною підвищеної пошкоджуваності трансформаторів мережі через надмірні динамічні зусилля прикладені до кріплень їх обмоток. Гармоніки струмів увімкнення трансформаторів часто спричиняють перенапруги у системах електропостачання з конденсаторними батареями чи статичними тиристорними компенсаторами (СТК), якщо на певній з частот виникають різко виражені резонансні умови зі слабкою мірою демпфування. Особливістю таких електропостачальних систем є необхідність встановлення значних потужностей конденсаторних батарей чи фільтрових кіл СТК, що зумовлює близькість згаданих резонансних умов до 2, 4 чи 6 гармонік, які мають суттєву величину в струмі ввімкнення. Внаслідок цього, некоректний розрахунок параметрів системи компенсації може бути причиною виникнення вказаних паралельних резонансів. У цих умовах перевантажуються також окремі фільтри СТК, що може викликати їх вимкнення захистами від перевантаження і подальше погіршення експлуатаційного режиму.

Аналіз попередніх досліджень. Пічні трансформатори в системах електропостачання ЕДП можуть вмикатися/вимикатися кілька десятків разів щодобово. Одним з небажаних впливів на систему електропостачання під час увімкнення трансформатора є виникнення значного спотворення струму, яке прийнято оцінювати спектром його гармонік. Внаслідок згасання перехідного процесу змінюються амплітуди вищих гармонік струму, які співмірні з амплітудою основної гармоніки. Як зазначено вище, це може створювати значні проблеми в компенсованих системах електропостачання, внаслідок значної тривалості перехідного процесу та частоти його повторюваності. Цій проблемі в літературі присвячено багато досліджень [1-5]. В опублікованих роботах проаналізовано характеристики процесу ввімкнення, вплив параметрів системи пасивних фільтрів на перехідні перенапруги та струми ввімкнення, а також наведено рекомендовані підходи до вибору фільтрів з урахуванням цього явища. Порівняно з результатами відомих досліджень, у поданій роботі автори вперше звернули увагу на необхідність врахування конструктивних відхилень параметрів фільтрів на процес увімкнення та проаналізували переваги демпфованого фільтра третього порядку з огляду обмеження перехідних перенапруг та надструмів.

Метою статті є висвітлення результатів дослідження перехідних перенапруг і надструмів, що можуть виникати в колах силових фільтрів під час увімкнення пічного трансформатора. В дослідженнях розглянуто порівняльні характеристики двох типів пасивних фільтрів: послідовного індуктивно-ємнісного фільтра другого порядку і індуктивно-ємнісно-резистивного фільтра третього порядку (фільтра типу "С"). У зв'язку з обмеженими можливостями польових експериментів за поставленою програмою досліджень експерименти здійснено на базі розробленої і попередньо протестованої комп'ютерної моделі системи електропостачання електродугової печі з пристроєм СТК, розробленої на базі цифрового комп'ютерного комплексу [6].

Характеристика системи електропостачання. На рис.1 показано принципову схему досліджуваної системи електропостачання. З метою тестування адекватності розробленої для досліджень комп'ютерної моделі було проаналізовано ряд натурних осцилограм ввімкнення пічного трансформатора у цій системі. Зокрема, на рис. 2 наведено одну з таких осцилограм. Відомо, що амплітуда струму ввімкнення трансформатора заданої конструкції визначається відповідним значенням індукції. У свою чергу індукція, яка визначає амплітуду струму ввімкнення, є функцією залишкової індукції осердя та моменту ввімкнення обмотки (обмоток) трансформатора. Тому для визначення граничних (розрахункових) значень перехідних струмів і напруг було вибрано найбільш несприятливі умови виникнення перехідного процесу [1].

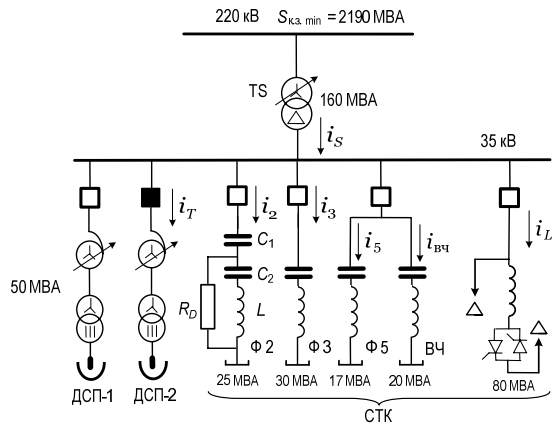


Рисунок 1 – Принципова схема досліджуваної системи електропостачання ЕДП

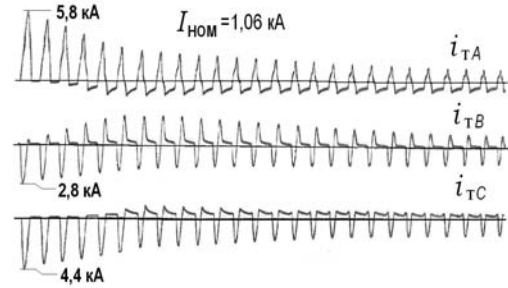


Рисунок 2 – Струми увімкнення пічного трансформатора

У виконаних порівняльних дослідженнях фільтр другої гармоніки заданої потужності (рис. 1) моделювався тією ж структурною схемою, яка відображала або фільтр типу "С" (скінчене значення резистансу R_D), або звичайний пасивний фільтр другої гармоніки (нескінчене значення резистансу R_D). Добротність фільтра типу "С" під час експериментів змінювали в межах 0,02...0,4.

Як відомо, на ефективність роботи фільтра впливає низка факторів. В процесі роботи частота енергосистеми не залишається постійною, а змінюється в певних експлуатаційних межах, що можна врахувати значенням $\pm 1\%$ від номінального значення. Іншим важливим фактором, який має вплив на роботу фільтра є неточність його налаштування, що залежить від температури і конструктивних відхилень параметрів конденсаторів і реакторів. Будь-які відхилення вказаних параметрів призводять до змін резонансної частоти фільтра. Можливі значення відносних резонансних частот фільтра можемо оцінити за виразом:

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

де Δf_* - відхилення частоти системи, в.о.; ΔL_* , ΔC_* - відхилення індуктивності та ємкості, в.о.; n_d - проектне значення відносної резонансної частоти фільтра ($n_d = 2, 3, 5$).

Приймаючи незначним вплив частоти на відхилення резонансної частоти фільтра $\Delta f_* \approx 0$ і використовуючи типові значення $\Delta L_* = \pm 0,05$ і $\Delta C_* = -0,10 \dots +0,05$, можливі відхилення відносної резонансної частоти n_r від проектного значення для досліджуваних фільтрових кіл можуть бути визначені з (1):

$$0,93n_d \leq n_r \leq 1,05n_d. \quad (2)$$

Для фільтра 2-ї гармоніки ці відхилення будуть відповідати змінам відносної частоти (порядку) налаштування фільтра в межах 1,86...2,1. Основною перевагою демпфованого фільтра типу "С" є низький рівень втрат на частоті основної гармоніки з забезпеченням потрібної міри демпфування на частоті налаштованої гармоніки. Це досягається налаштуванням кола фільтра $L-C_2$ на частоту основної гармоніки, а кола $L-(C_1+C_2)$ - на частоту відповідної гармоніки фільтра (в розглянутому прикладі на частоту 2-ї гармоніки).

Параметри реактора та конденсаторів, а також значення шунтувального резистора аналізованого фільтра 2-ї гармоніки розраховано за виразами:

$$C_1 = \frac{Q_{\Phi 2}}{\omega U_{\text{НОМ}}^2} = 65 \mu\text{Ф}; \quad C_2 = \frac{Q_{\Phi 2}(n_r^2 - 1)}{\omega U_{\text{НОМ}}^2} = (157 \dots 208) \mu\text{Ф}; \quad (3)$$

$$L = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\omega Q_{\Phi 2}(n_r^2 - 1)} = (64 \dots 49) \text{ мГн}; \quad R_D = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{q_{\Phi} n_r Q_{\Phi 2}} = (65 \dots 1300) \text{ Ом}.$$

У наведених виразах взято наступні значення величин:

- $U_{\text{НОМ}} = 35 \text{ кВ}$ - номінальна напруга на шинах приєднання;
- $Q_{\Phi 2} = 25 \text{ МВА}$ - номінальна потужність фільтра 2-ї гармоніки;
- $n_r = 1,86 \dots 2,1$ - відносна частота налаштування фільтра;
- $q_{\Phi} = 0,02 \dots 0,4$ - добротність фільтра.

Моделювання перехідних процесів під час увімкнення пічного трансформатора. Як зазначено попередньо для дослідження процесів у системі електропостачання було розроблено математичну комп'ютерну модель, що дозволило проаналізувати вплив різних факторів на характер протікання процесу.

На рис.3 наведено осцилограми для фази А, які характеризують перехідний процес у колі недемпфованого фільтра другої гармоніки під час увімкнення трансформатора в аналізованій системі електропостачання за умови максимального залишкового насичення трансформатора.

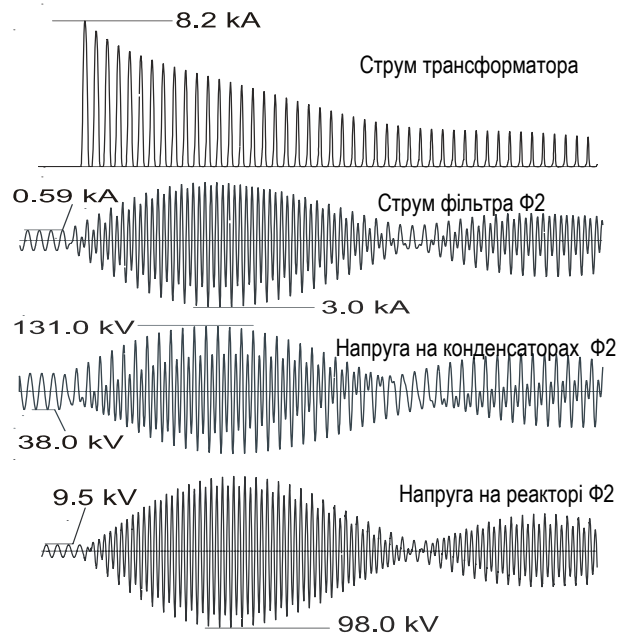


Рисунок 3 – Увімкнення трансформатора у системі з недемпфованим фільтром 2-ї гармоніки ($n_r = 2,0$)

Тут виразно видно, що увімкнення трансформатора збуджує резонансне підсилення другої гармоніки струму в колі фільтра, а це проявляється у значних перенапругах та надструмах в елементах фільтра. Хоча тривалість однократного перехідного процесу є недостатньою для термічного пошкодження конденсаторів чи реакторів фільтра, суттєві динамічні зусилля можуть спричинити пошкодження реакторів після багатократної повторюваності процесів увімкнення, яка є характерною для трансформаторів ЕДП. Багатократна повторюваність надструмів у колі фільтра призводить також до поступового погіршення ізоляції його конденсаторів і реакторів, викликає механічну втому кріплень реакторів, що призводить до їх пошкодження.

Розлаштування фільтра, викликане конструктивними відхиленнями параметрів реакторів і конденсаторів, суттєво впливає на амплітуди перехідних струмів і напруг на елементах фільтра. Як показали дослідження, чим більш “недолаштованим” є фільтр, тим нижчими є амплітуди перехідних напруг і струмів фільтра. На рис. 4 показані залежності максимальних значень амплітуд перехідних напруг і струмів в елементах фільтра від відносної частоти налаштування фільтра.

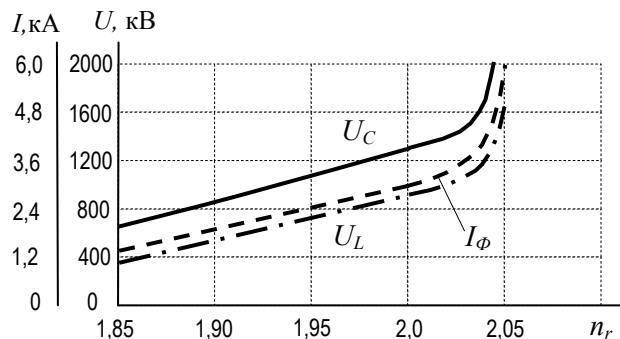


Рисунок 4 – Максимальні значення перехідних струмів та напруг на елементах фільтра

Застосування демпфованого фільтра дозволяє знизити амплітуди перехідних координат на конденсаторах та індуктивностях фільтра. Фільтр типу “С” є дуже привабливою конструкцією демпфованого фільтра, оскільки дозволяє утримувати дуже низький рівень втрат активної потужності в нормальному режимі забезпечуючи разом з цим суттєве демпфування процесів у перехідних режимах. На рис. 5 наведено осцилограми перехідних

координат фільтра типу "С" під час увімкнення пічного трансформатора з такими ж початковими умовами як і на рис. 3. Значення добротності фільтра q_Φ у цьому експерименті дорівнює 0,1 ($R_D = 260$ Ом). На осцилограмах можна бачити суттєве зниження амплітуд перехідних струмів і напруг фільтра 2-ї гармоніки. В перехідному режимі збільшуються втрати активної потужності у демпфувальному резисторі, які в усталеному режимі при точному налаштуванні фільтра практично відсутні. Причому ці втрати в умовах перехідного процесу мають характер аперіодичного імпульсу, тривалість і форма якого визначається характером перехідного процесу під час увімкнення трансформатора. Характер зміни втрат активної потужності у шунтувальному резисторі під час перехідного процесу показано на останній осцилограмі рис. 5. Ці втрати визначено як еквівалентні "Ват-втрати" протягом кожного періоду робочої частоти. Енергія імпульсу для цього режиму увімкнення досягає 0,4 кДж.

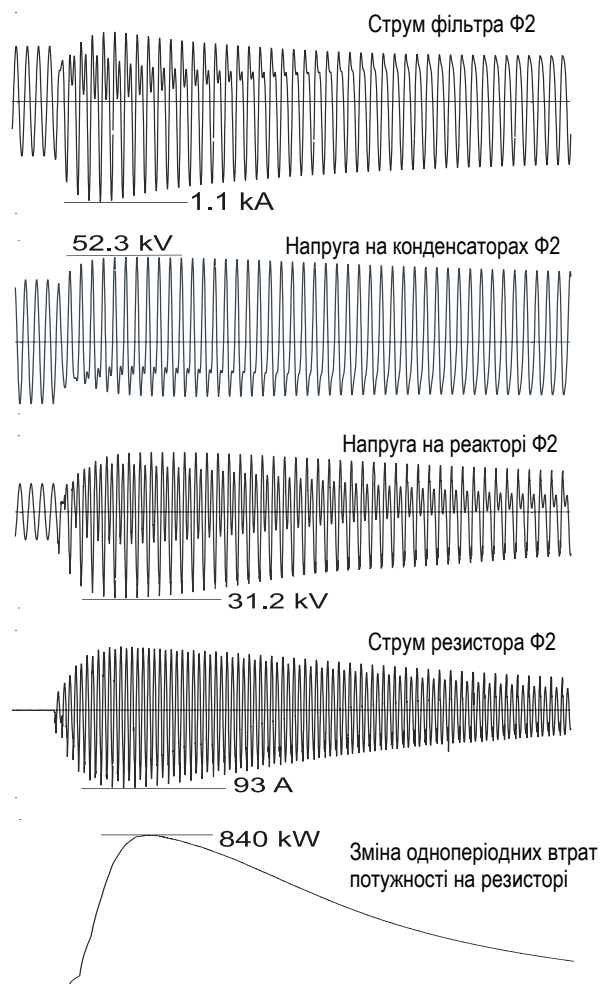


Рисунок 5 – Увімкнення трансформатора у системі з демпфованим фільтром 2-ї гармоніки ($n_r = 2,0$; $R_D = 260$ Ом)

Вибір значення опору демпфувального резистора залежить від бажаної міри демпфування перехідних координат. Чим меншим є це значення, тим нижчими є амплітуди перехідних координат. На рис. 6 показано отримані у процесі дослідження залежності амплітуд перехідних напруг та струмів у колі фільтра 2-ї гармоніки від значення опору демпфувального резистора. Проте зі зниженням значення опору демпфувального резистора збільшуються втрати активної потужності як під час перехідних процесів, так і в усталеному режимі (внаслідок неточності налаштування фільтра). Тому в процесі проектування фільтра потрібно взяти певне компромісне значення цього опору.

Врахування перехідних характеристик у процесі проектування силових фільтрів. Сучасна методологія проектування фільтрів для промислових електропостачальних мереж враховує під час вибору параметрів його конденсаторів і реакторів діючі і амплітудні значення напруг і струмів в можливих усталених і перехідних режимах роботи фільтрів. Зокрема, згідно з методикою, викладеною у [7,8], вибір параметрів конденсаторів і реакторів для фільтрів систем електропостачання електродугових печей здійснюють, беручи до уваги наступні величини:

- розрахункове діюче значення напруги реактора для режиму увімкнення пічного трансформатора -

$$U_{Ltr} = \frac{U_L}{1,5\sqrt{2}}; \quad (4)$$

- розрахункове діюче значення еквівалентного струму короткого замикання реактора для режиму ввімкнення пічного трансформатора -

$$I_{Lsc tr} = 3 \frac{I_\Phi}{\sqrt{2}}; \quad (5)$$

- розрахункове діюче значення напруги конденсаторної батареї для режиму ввімкнення пічного трансформатора -

$$U_{C tr} = \frac{U_C}{2,5\sqrt{2}}; \quad (6)$$

- діюче значення напруги реактора для усталеного режиму (n - кількість розрахункових гармонік фільтра) -

$$U_{L ss} = \sqrt{\sum_n U_{Ln}^2}; \quad (7)$$

- діюче значення струму реактора для усталеного режиму -

$$I_{L ss} = \sqrt{\sum_n I_n^2}; \quad (8)$$

- розрахункове діюче значення струму короткого замикання реактора для усталеного режиму -

$$I_{Lsc ss} = \frac{U_{роб}}{X_L \sqrt{3}}; \quad (9)$$

- діюче значення напруги конденсаторної батареї для усталеного режиму -

$$U_{C ss} \geq \sum_n U_{Cn}. \quad (10)$$

На підставі виразів (4)...(10) обчислюють розрахункові струми та напруги для вибору параметрів конденсаторних батарей і реакторів фільтрів. Потрібно зазначити, що вказані вирази отримано з врахуванням особливостей перехідних режимів – амплітуд перехідних координат і їх повторюваності протягом року. Згідно з процедурою вказаної методики, як розрахункові значення відповідних струмів та напруг приймають ті, які є більшими при порівнянні діючих значень усталеного режиму і розрахункових діючих значень перехідного режиму.

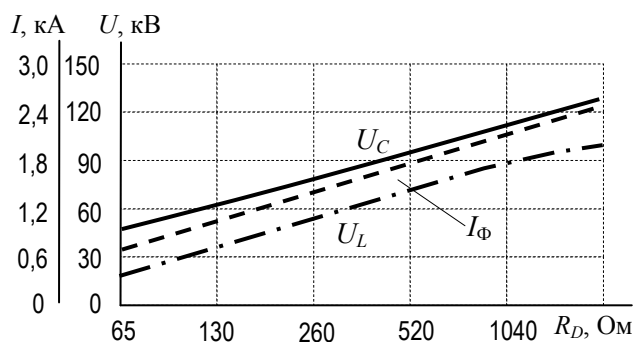


Рисунок 6 – Залежності амплітуд перехідних напруг та струмів у колі фільтра 2-ї гармоніки від значення опору демпфувального резистора

У табл. 1 наведено порівняльні результати обчислення розрахункових діючих значень напруг та струмів, які потрібно взяти для вибору параметрів реакторів фільтра другої гармоніки для розглянутої у дослідженнях системи електропостачання, а у табл. 2 – відповідні значення для вибору параметрів конденсаторної батареї цього ж фільтра.

Таблиця 1 – Вибір розрахункових величин для реактора фільтра другої гармоніки

Розрахунковий режим	Діюче значення фазної напруги U_L , кВ	Діюче значення струму I_L , кА	Діюче значення струму короткого замикання I_{LSC} , кА
Усталений	7,9	0,42*	1,1
Перехідний, без R_D	46,3	0,42	6,4
Перехідний, $R_D=260$ Ом	18,4	0,42	2,0

*Примітка: Розрахунковий струм другої гармоніки в усталеному режимі $I_2 = 7\%$ від номінального струму пічного трансформатора.

З результатів розрахунку видно, що у випадку використання недемпфованого фільтра необхідно суттєво збільшувати розрахункові значення його параметрів внаслідок важких наслідків перехідних процесів у цій системі електропостачання. Використовуючи демпфований фільтр можна суттєво зменшити значення амплітуд перехідних струмів і напруг у колі фільтра, а, отже, і значення розрахункових діючих величин, які визначають параметри фільтра. У табл. 1 і 2 потовщеним шрифтом показано значення, які потрібно взяти для розрахунку параметрів демпфованого фільтра.

Таблиця 2 – Вибір розрахункових величин для конденсаторної батареї фільтра другої гармоніки

Розрахунковий режим	Діюче значення фазної напруги U_C , кВ	Діюче значення струму I_C , кА	Встановлена потужність S_C , МВА
Усталений	30,0	0,42	37,8
Перехідний, без R_D	37,2	0,42	46,8
Перехідний, $R_D=260$ Ом	14,8	0,42	18,7

Висновки. Досліджено характеристики перехідного процесу в колі демпфованого фільтра типу "С" під час увімкнення пічного трансформатора у системі електропостачання електродугової печі. Показано, що порівняно з пасивним фільтром другого порядку застосування демпфованого фільтра дозволяє суттєво зменшити амплітуди перехідних струмів і напруг на конденсаторах і реакторах фільтра. Враховуючи особливості застосування фільтрів у системах електропостачання електродугових печей, вказані фактори дозволяють зменшити витрати активних матеріалів на конструкцію фільтра, а отже і його вартість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Varetsky Y., Jurahivski A. Transformer energizing in industrial power system with SVC / Proc. of 5-th Int. Conf. "Electrical power quality and utilization". – 1999. – Cracow, Poland. - P.453-458.
- Witte J.F. et al. Damaging long-term overvoltages on industrial capacitor banks due to transformer energizing inrush current // IEEE Trans. on Industry Applications. - 1994. - Vol.30, no.4. - P. 1107-1115.
- Bonner J.A. et al. Selecting ratings for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1995. - Vol.10, no.1. - P. 547-555.
- Dudley R.F. et al. Special design Consideration for filter banks in arc furnace installations // IEEE Trans. on Industry Applications. - 1997. - Vol.33, no.1. - P. 226-233.
- Varetsky Y. Exploitative characteristics of SVC filter circuits / Proc. of 6-th Int. Conf. Electrical power quality and utilization. – 2001. - Cracow Poland. - P. 297-302.
- Ravlyk A., Gretchyn T. Digital complex for modelling of transient processes in electric circuits / Proc. of III Int. Symp. "Metody matematyczne w elektroenergetyce". – 1993. - Zakopane, Poland. - P.17-20.
- ANSI C57.16-1958: Requirements, terminology, and test codes for dry-type air-core series connected reactors. New York, IEEE. - 1993.
- IEEE Std. 18-1992. IEEE Standard for shunt power capacitors. - New York, IEEE. - 1993.

REFERENCES

- Varetsky Y., Jurahivski A.: Transformer energizing in industrial power system with SVC. Proc. of 5-th Int. Conf. "Electrical power quality and utilization", Cracow, 1999, pp.453-458.
- Witte J.F. et al: Damaging long-term overvoltages on industrial capacitor banks due to transformer energizing inrush current. IEEE Trans. on Industry Applications, vol.30, no.4, 1994, pp. 1107-1115.
- Bonner J.A. et al.: Selecting ratings for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters. IEEE Trans. on Power Delivery, vol.10, no.1, 1995, pp. 547-555.
- Dudley R.F. et al.: Special design Consideration for filter banks in arc furnace installations. IEEE Trans. on Industry Applications, vol.33, no.1, 1997, pp. 226-233.

5. Varetsky Y.: Exploitative characteristics of SVC filter circuits, Proc. of 6-th Int. Conf. Electrical power quality and utilization, Cracow, 2001, pp. 297-302.
6. Ravlyk A., Gretchyn T. Digital complex for modelling of transient processes in electric circuits. Proc. of III Int. Symp. "Metody matematyczne w elektroenergetyce", Zakopane, 1993, pp. 17-20.
7. ANSI C57.16-1958: Requirements, terminology, and test codes for dry-type air-core series connected reactors. New York, IEEE, 1958.-York: IEEE. - 1993.
8. IEEE Std. 18-1992. IEEE Standard for shunt power capacitors. - New York, IEEE, 1993.

Надійшла до редакції 20.03.13

Рецензент: Е.Г.Курінний

Ю. Е. ВАРЕЦКИЙ, Р. И. ПАВЛИШИН, И.В.ТАРАН
Национальный университет «Львовская политехника»

Переходные характеристики демпфированного фильтра в системе электроснабжения электродуговой печи. В статье осуществлен анализ процессов при включении трансформатора в системе электроснабжения электродуговой печи с фильтрами высших гармоник. Показано особенности их протекания в случае применения демпфированного фильтра. Приведена характеристика основных факторов, влияющих на переходные характеристики процесса, что позволяет учитывать их при проектировании и эксплуатации систем фильтров высших гармоник в системах электроснабжения нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: система электроснабжения, переходный процесс, включение трансформатора, перенапряжение, электродуговая печь, демпфированный фильтр, высшие гармоники.

Y. VARETSKY, R. PAVLYSHYN, I. TARAN
National University «Lviv Politechnic»

Damping Filter Transient Characteristics within Arc Furnace Supply System. Electric arc furnace (EAF) transformer energization is a regular occurrence on the supply systems bus. Transformers used in the supply system may be switched many times during a day. If the system consists of a few of filters, the harmonics will cause long lasting overvoltages and overcurrents in the filter circuits. If this phenomenon occurs 25 to 50 times a day the filter capacitors and reactors may not be able to withstand these overvoltages for an extended period of time. This could reduce capacitor and reactor life and may lead to eventual failures. The purpose of this paper is to study the transient overvoltages and overcurrents which may appear on the filter circuits under transformer energization in a typical industrial power system. Two types of the passive filter circuits are investigated in the paper: second-order series filter and third-order damped filter so called "C"-type filter. The comparative transient analysis has been carried out. To analyze this phenomenon the Electromagnetic Transients Software has been chosen because of there are known limitations in the field testing with respect to the circuit condition and the number of times that the test can be carried out. A general analysis shows that presence of harmonic content in the transformer inrush current can excite resonance increasing voltages and current in the filter circuit on the resonant harmonic. Deviation of filter reactor and capacitor bank parameters may significant affect the transient magnitudes. It may require higher equipment ratings than that required for steady state operation condition. As it has been shown in the investigation the second harmonic filter for the analyzed power supply system have to be designed with higher equipment ratings than that required for steady state operation condition. This is due to the dynamic overcurrent and overvoltage through filter equipment that occurs during oft-recurring transformer energizations. Using the accepted damping resistor value for the "C"-type filter circuit have to provide filter equipment selecting close to that from steady state performance requirement in the power supply system and significantly reduces filter transient current and voltage magnitudes. The effects dictate less filter reactor and capacitor banks rating and so its costs.

Key words: power supply system, transient, transformer energization, overvoltage, electric arc furnace, damping filter harmonics.