

Вибір вагових коефіцієнтів залежить від умов оплати за реактивну енергію, графіка навантаження, активного опору елементів електропередачі.

Вимірювальні перетворювачі можна реалізувати в трифазному варіанті. Це дозволить використовувати їх при несиметричних несинусоїдних режимах.

### **Висновки**

Розглянуто квазірівноважені вимірювальні перетворювачі для регуляторів конденсаторних установок, що застосовуються в мережах з високим вмістом вищих гармонік. Вимірювальні перетворювачі забезпечують отримання інформації, необхідної для керування відповідно до критерію мінімуму втрат активної енергії або критерієм, що наближений до економічно вигідного за вартістю споживаної реактивної енергії.

Перевагами перетворювачів також є висока точність вимірювань, незалежність результатів вимірювань від нестабільності промислової частоти; врахування відхилень напруги в даному вузлі мережі.

*1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М., 2000. – 331с. 2. Карпов Е.А. К расчету компенсирующих устройств в электрических цепях // Теоретическая электротехника. – Львов, 1972. – Вып. 14. – С. 131–136. 3. Штамбергер Г.А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Под ред. К.Б. Карандеева. – Новосибирск, 1972. – 164 с.*

УДК 621.316.761.2

**Ю.О. Варецький**

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕМС

## **ГАРМОНІКИ СТРУМУ ВВІМКНЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА В ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМАХ**

© Варецький Ю.О., 2002

**У статті проаналізовані гармонічні процеси під час увімкнення трансформаторів у електропостачальних системах. Показано особливості їх протікання у випадку застосування засобів компенсації реактивної потужності. Подано характеристику основних факторів впливу на ці процеси, що дозволяє краще зрозуміти супроводжувальні явища.**

**The paper studies harmonic processes under switching transformers into power supply systems. The process features in case of reactive power compensation are shown. It is presented description of key factors affecting the processes, that allows to better understand the accompanied phenomena.**

### **Аналіз проблеми**

Під час увімкнення трансформатора виникають перехідні струми, котрі прийнято називати струмами увімкнення трансформатора [1–4]. Ці перехідні струми можуть досягати значних величин, часто 6–8 кратних значень відносно номінального струму трансформатора

і тривати кілька секунд. Залежно від частотних характеристик мережі вони можуть спричиняти тривалі перенапруги, іноді навіть у віддалених пунктах мережі [3]. Зокрема, в електропостачальних системах з потужними ДСП струми увімкнення пічних трансформаторів можуть бути причиною підвищеної пошкоджуваності трансформаторів мережі [4] через надмірні динамічні зусилля, прикладені до кріплень їх обмоток. Гармоніки струмів увімкнення трансформаторів часто спричиняють перенапруги у системах електропостачання, які містять конденсаторні батареї чи статичні тиристорні компенсатори (СТК), якщо на певній з частот виникають 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 увімкнення. Внаслідок цього, некоректний розрахунок параметрів системи компенсації може бути причиною виникнення вказаних паралельних резонансів. У цих умовах перевантажуються також окремі фільтри СТК, що може спричинити їх вимкнення захистами від перевантаження і подальше погіршення експлуатаційного режиму.

Під час опрацювання схем СТК для вказаних електричних мереж і аналізу характеристик перехідних процесів актуальною є проблема моделювання трансформаторів у перехідних процесах. Цьому питанню присвячено значну увагу в літературі [1–7]. Треба вказати, що автори згаданих публікацій пропонують моделі різної міри складності залежно від потреб дослідження. Зокрема, в [1] розглянуто вплив способу та точності врахування параметрів трансформатора під час моделювання на амплітуди та характер струмів увімкнення. На основі порівняльного аналізу автори показують, що неозначеність у визначенні параметрів моделі трансформатора, які зумовлені тільки конструкцією обмоток, може призводити до помилок у розрахунку амплітуди струму увімкнення на рівні 50 % для трансформаторів малої потужності і 150...250 % для трансформаторів великої потужності. З огляду на моделювання процесів увімкнення трансформатора це означає, що особливо ретельно треба підходити до визначення характеристики намагнічування трансформатора в області насичення. Власне ця область характеристики визначає амплітуду струму увімкнення за умови заданого рівня напруги та заданої конструкції магнітопроводу трансформатора. У наближених розрахунках, використовуючи апроксимацію характеристики намагнічування за рис. 1, область насичення характеризують величиною  $L_m$ . За цією величиною можна здійснити наближену оцінку першого максимуму струму увімкнення трансформатора.

Однією з важливих особливостей під час дослідження процесів увімкнення трансформаторів є врахування залишкової індукції магнітопроводу після вимкнення трансформаторів. Відомо, що вимикання в електричному активно-індуктивному колі відбувається під час переходу струму через нуль. У трифазній мережі з ізольованою нейтраллю вимикач під час переходу струму через нуль спочатку вимикає одну фазу, а через деякий час, який визначається характеристиками кола, одночасно вимикає дві інші фази. Причому до моменту вимкнення у цих фазах струми мають однакові величини. Це призводить до того, що під час вимкнення трансформатора з тристрижневим магнітопроводом залишковий потік у фазі, котра вимикається першою дорівнює практично нулю, а у двох інших має певні величини однакові за амплітудою, але протилежні за знаком. Вимірювання, здійснені авторами роботи [8] для трансформаторів електричних мереж різної потужності

та різних конструкцій показали, що залишкові індукції знаходяться в межах 0,4...0,8 від робочої індукції трансформатора. Своєю чергою, в роботі [9] наведені величини залишкової індукції для різних типів трансформаторів з осердями з різних електротехнічних сталей, отримані за допомогою польових експериментів. Для холодновальцьованих електротехнічних сталей отримано величини залишкових індукцій на рівні 0,8 від робочої, а для гарячевальцьованих – на рівні 0,45. Більшість авторів [1–9] вважає, що під час розрахунку максимальних величин струмів увімкнення у трифазних трансформаторах слід орієнтуватися на залишкові індукції порядку 0,75...0,8 від робочої. Звідси можемо оцінити максимальне розрахункове потокозчеплення первинної обмотки трансформатора під час її увімкнення в момент переходу прикладеної напруги через нуль за співвідношенням

$$\Psi_{\max} \approx \Psi_r + 2,0\Psi_{\text{роб}} = (0,8 + 2,0)\Psi_{\text{ном}} = 2,8\Psi_{\text{роб}}, \quad (1)$$

де  $\Psi_{\text{роб}}$ ,  $\Psi_r$  – номінальне та залишкове потокозчеплення трансформатора.

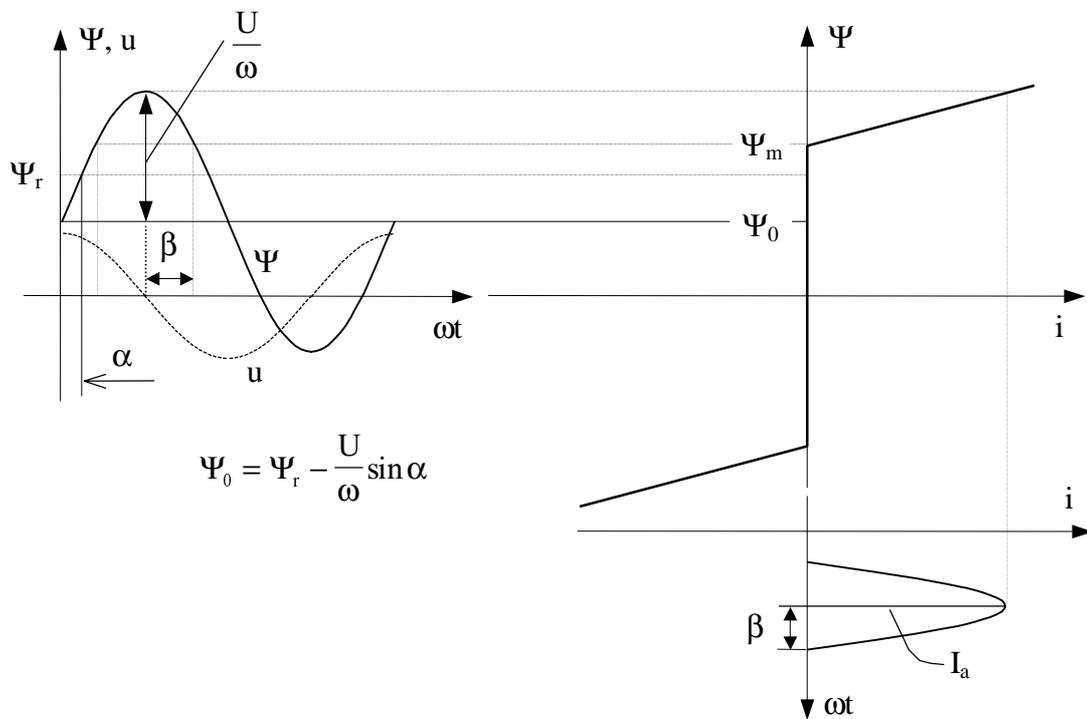


Рис. 1. Основні співвідношення між параметрами режиму під час увімкнення трансформатора

Враховуючи викладене, можемо отримати вирази для оцінки величин амплітуд струмів увімкнення для випадку сполучення первинної обмотки трансформатора ізольованою зіркою

$$I_{a \max} = k \frac{\sqrt{2} U}{2 \omega (L_s + L_m)}, \quad (2)$$

і для випадку заземлення нейтралі первинної обмотки

$$I_{a \max} = k \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3} \omega (L_s + L_m)}, \quad (3)$$

де  $U$  – діюче значення робочої лінійної напруги на шинах підстанції;  $L_s$  – індуктивність короткого замикання на шинах приєднання трансформатора;  $k$  – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від залишкової індукції трансформатора та моменту ввімкнення. Наближено максимальну величину коефіцієнта  $k$  можемо оцінити за виразом

$$k = 2 + \frac{\Psi_r}{\Psi_{\text{НОМ}}} - \frac{\Psi_m}{\Psi_{\text{НОМ}}}, \quad (4)$$

де  $\Psi_m$  – потокозчеплення насичення (див. рис. 1).

В обох випадках не враховано впливу тієї з вторинних обмоток (якщо вона наявна), котра сполучена трикутником. У наближених розрахунках еквівалентна індуктивність насичення трансформатора може бути оцінена величиною, що дорівнює подвійній величині індуктивності, визначеної з досліду короткого замикання.

Іншим важливим моментом роботи [1] є дослідження впливу втрат у трансформаторі на характер згасання процесу. Показано, що втрати на гістерезис не мають суттєвого впливу на характер процесу, оскільки в цей час вони сягають не більше 1 % від втрат в послідовних активних опорах контуру ввімкнення.

Підсумовуючи викладене, потрібно вказати на такі фактори, що мають визначальний вплив на амплітуду та характер струму ввімкнення трансформатора: конструкція та матеріал магнітопроводу трансформатора, що визначає форму характеристики намагнічування; конструкція обмоток трансформатора; схема сполучень обмотки, що вмикається; схема сполучень вторинних обмоток; рівень залишкової індукції осердя; рівень робочої напруги та потужність електропостачальної системи.

### Вищі гармоніки у струмах увімкнення

Розглянемо увімкнення трансформатора вимикачем  $Q$  у схемі рис. 2. Схема фільтрів у цій системі є частиною статичного тиристорного компенсатора, призначеного для

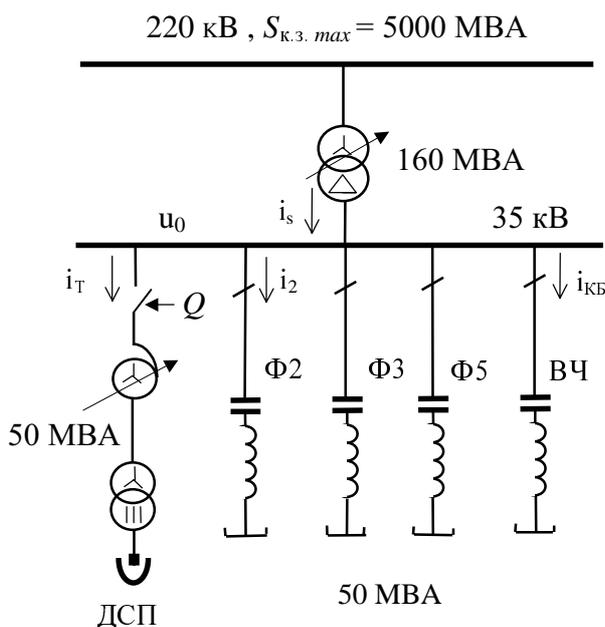


Рис. 2. Схема електропостачальної системи

підвищення ефективності функціонування комплексу в цілому. Згідно з умовами технології дугової сталеплавильної печі (ДСП) увімкнення пічного трансформатора відбувається кілька десятків разів на добу. Причому струми ввімкнення трансформатора містять повний спектр гармонік.

Особливістю цього спектра є його зміна протягом часу згасання струму ввімкнення. Очевидно, що амплітуди окремих гармонік приймають різну величину з плином часу. Протягом часу згасання струму ввімкнення вони можуть в певні періоди спадати, а в інші – зростати. Тривалість цих періодів визначається загальним часом згасання струму ввімкнення. З застосуванням конденсаторних батарей чи фільтрів у електропостачальних системах окремі

гармоніки струму увімкнення будуть зазнавати підсилення у еквівалентному резонансному контурі, який створюється цими пристроями і мережею. У випадку виникнення тимчасового резонансу на певних частотах під час увімкнення трансформатора відбувається перевантаження конденсаторних батарей чи окремих фільтрів, а також можуть виникати перенапруги на шинах. Для прикладу, на рис. 3 зображені осцилограми, які характеризують увімкнення трансформатора у досліджуваній електропостачальній системі за умови приєднання до шин 35 кВ тільки конденсаторної батареї. На цих осцилограмах можна побачити виникнення резонансу на 6 гармоніці, що проявляється у значній величині її струму в колі конденсаторної батареї та суттєвому спотворенні напруги на шинах 35 кВ. На ці проблеми завжди потрібно зважати під час вибору засобів компенсації, оскільки такі режими можуть призводити до вимкнення конденсаторних батарей чи фільтрів захистами від перевантажень чи спрацювання розрядників. Причому енергія, яка виділяється в структурі розрядників під час спрацювання, може перевищувати їх термічну здатність (особливо це важливо для  $ZnO$ -розрядників). Вказані фактори значною мірою залежать від тривалості існування резонансного режиму та його інтенсивності. Особливістю резонансного режиму у цьому випадку є те, що резонанси можуть виникати не відразу після увімкнення трансформатора, а через деякий час – після певного зниження амплітуди струму увімкнення, яке відповідає максимальному значенню амплітуди резонансної гармоніки. Тому у дослідженнях таких процесів особливу увагу необхідно звертати на подібність моделювання процесу згасання струму увімкнення і адекватного демпфування резонансів у колі на вищих гармоніках.

Розглянемо особливості несинусоїдності струму увімкнення трансформатора. Як уже вказувалося, з часом згасання амплітуди окремих гармонік змінюються, тому практичне зацікавлення становлять їх залежності від амплітуд струмів увімкнення трансформаторів. Амплітуда струму увімкнення трансформатора заданої конструкції визначається величиною індукції.

У свою чергу індукція, яка визначає амплітуду струму увімкнення, є функцією залишкової індукції осердя та моменту увімкнення (кута увімкнення) обмотки (обмоток) трансформатора. Нехтуючи незначною різницею у формі струму, можна стверджувати, що амплітуда струму однозначно визначається амплітудою індукції, причому не має різниці як її досягнуто. Користуючись таким підходом, можемо вважати амплітуду струму увімкнення у кожний період робочої частоти протягом перехідного процесу незалежною від передісторії. Вона однозначно визначається тільки амплітудою індукції у межах даного періоду, а значить для двох різних режимів (з огляду на залишкову індукцію та кут увімкнення) можемо мати однакову величину струму у різні періоди

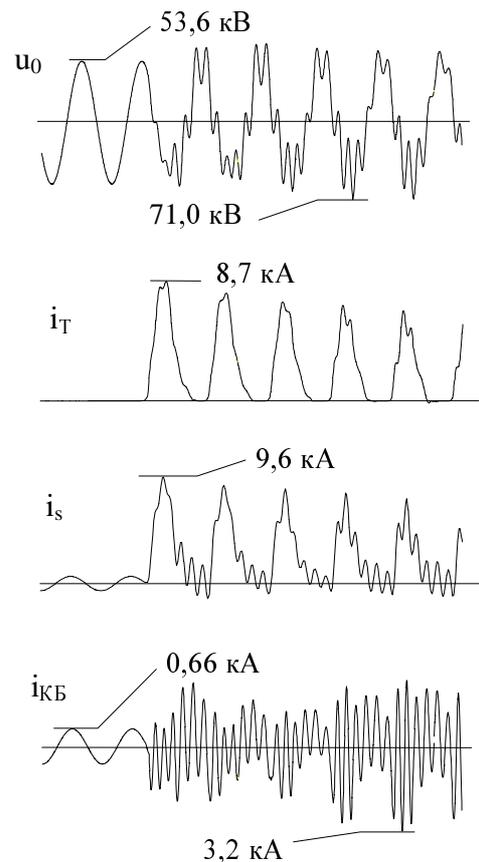


Рис. 3. Ввімкнення трансформатора у системі електропостачання з КБ

згасання перехідного процесу. Задану амплітуду струму ввімкнення, отже, можна отримати внаслідок різних співвідношень залишкової індукції  $B_r$  та кута ввімкнення  $\alpha$ :

$$B = B_r + B_{\text{роб}}(1 - \sin \alpha). \quad (5)$$

На рис. 4 показані залежності гармонік струму ввімкнення трансформатора у досліджуваній системі електропостачання рис. 2 як функції амплітуди струму ввімкнення, за якими можна прослідкувати як змінюються амплітуди окремих гармонік струму зі зміною амплітуди струму ввімкнення. З цих залежностей ясно видно, що у деяких режимах увімкнення максимальні амплітуди струмів окремих вищих гармонік можна спостерігати тільки через деякий час після початку ввімкнення.

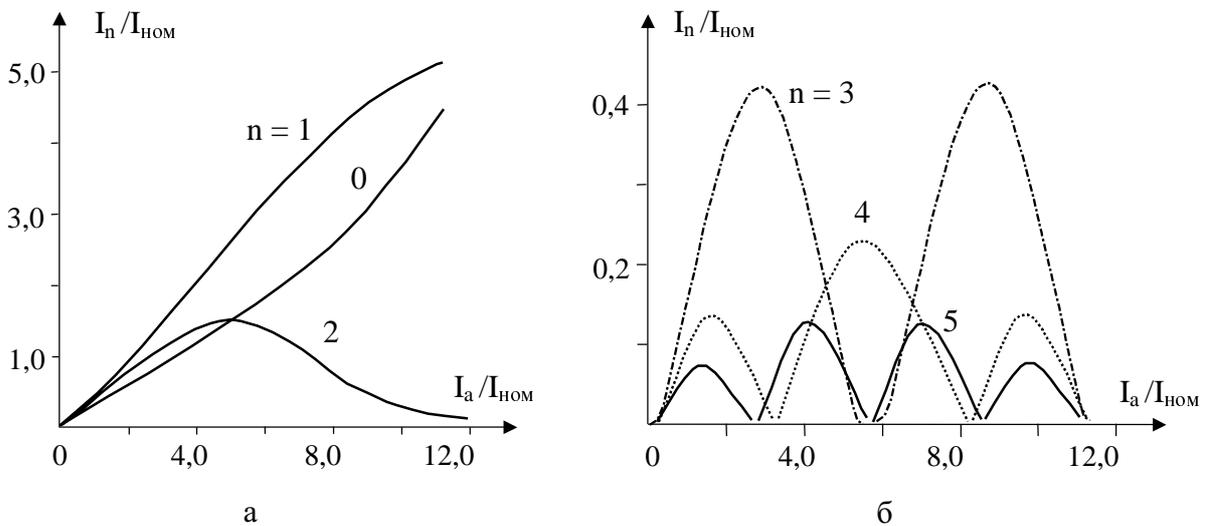


Рис. 4. Залежності амплітуд гармонік ( $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ) та постійної складової ( $n = 0$ ) від амплітуди струму ввімкнення

Важливим при опрацюванні схеми фільтрів, пов'язаним з режимами ввімкнення трансформаторів, є необхідність врахування спектру гармонік струму ввімкнення у розрахунку параметрів фільтрів. Одним з основних факторів тут є наявність значних величин парних гармонік і насамперед – другої.

На рис. 5 зображені осцилограми ввімкнення трансформатора у системі електропостачання зі схемою фільтрів рис. 2 за умови максимального залишкового насичення трансформатора. Ілюстративність цих осцилограм полягає у тому, що, незважаючи на максимально можливе значення струму ввімкнення, напруга на шинах має відносно незначне спотворення порівняно з режимом увімкнення з рис. 3, проте фільтр 2 гармоніки суттєво перевантажується. Тут виразно видно характер зміни струму другої гармоніки у колі фільтра цієї гармоніки. Можна показати, що власне цей режим відіграє визначальну роль у виборі потужності фільтра у вказаних системах електропостачання. На першому етапі оцінку потужностей фільтрів окремих гармонік, враховуючи можливі резонансні умови у вибраній системі електропостачання, можна здійснити на основі традиційного підходу, який базується на аналізі усталеного режиму з обов'язковим врахуванням змін частотної характеристики мережі у можливих експлуатаційних ситуаціях, а також можливих флуктуацій частоти системи та параметрів фільтрів. Подальше уточнення

схеми і параметрів системи фільтрів повинно враховувати особливості експлуатаційних режимів системи та навантаження тощо [10].

Наприклад, схеми СТК у системах електропостачання ДСП часто містять фільтри різних комбінацій 3, 4, 5, 7 гармонік. Якщо ж маємо справу з експлуатацією дугових комплексів у порівняно слабких системах електропостачання, то загострюється проблема резонансу на 4 або 2 гармоніці у випадку відсутності відповідних фільтрів на цих гармоніках. Як показують дослідження, у схемах електропостачання з СТК паралельні резонанси на цих частотах можуть збільшувати як тривалість перехідного режиму, так і самого резонансу. Покажемо на прикладі рис. 6 характеристики резонансних режимів у разі застосування різних систем фільтрів сумарною потужністю 50 МВА у системах електропостачання різної потужності. На рис. 6, а показані частотні характеристики схеми систем фільтрів, що містить фільтри 3, 5 та 7 гармонік. Тут видно, що для даної систем фільтрів паралельний резонанс на другій гармоніці може виступити тільки у випадку досить значного зменшення потужності системи ( $S_{к.з.} = 0,29$ ). У той же час для схеми СТК, яка містить фільтри 5 і 7 гармонік (рис. 6, б), потрібна порівняно більша потужність короткого замикання ( $S_{к.з.} = 0,4$ ), щоб спостерігався паралельний резонанс на 2 гармоніці.

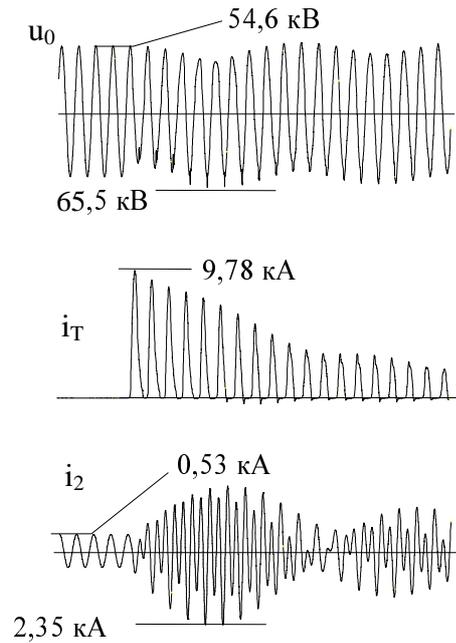


Рис. 5. Увімкнення пічного трансформатора у системі електропостачання з фільтрами (рис. 2)

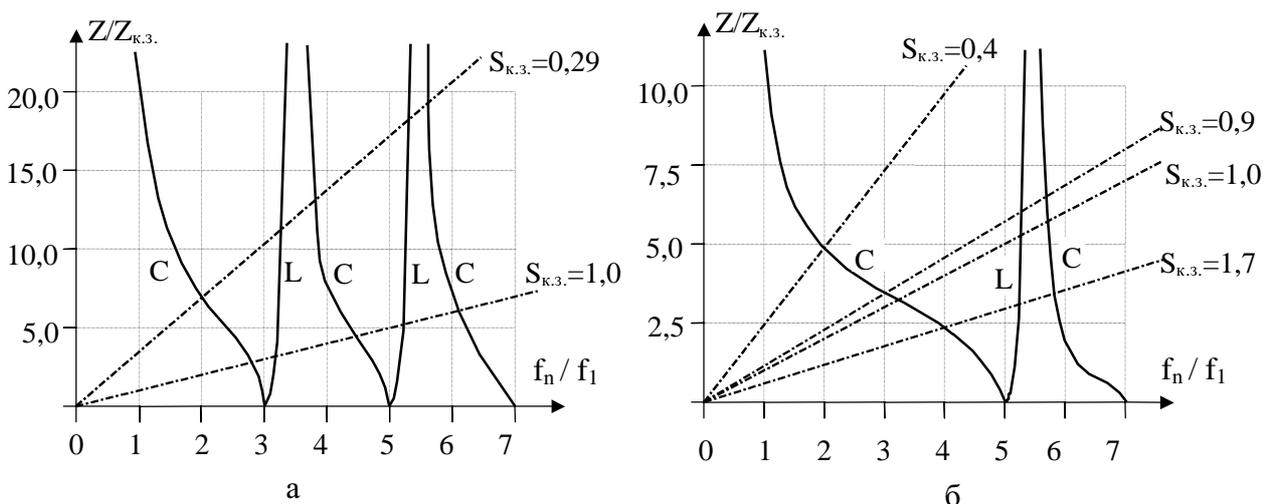


Рис. 6. Частотні характеристики систем електропостачання (штрих-пунктир) та системи фільтрів (неперервна) для 3,5,7 гармонік (а) і 5,7 гармонік (б):  
 $S_{к.з. баз} = 1000 \text{ МВА}$ ;  $U_{баз} = 35 \text{ кВ}$ ;  $S_{ФК} = 50 \text{ МВА}$

З іншого боку, як видно з рис. 6, б, з такою схемою фільтрів існує велика ймовірність резонансних умов на третій та четвертій гармоніках. Оскільки 2, 3, 4 гармоніки мають значні величини у струмі ввімкнення пічних трансформаторів, то, як правило, у таких системах електропостачання обов'язковим є використання фільтра 3 гармоніки, а у випадку порівняно слабкої системи електропостачання – також фільтрів 2 та 4 гармонік.

### Висновки

Увімкнення трансформаторів у електропостачальних системах супроводжується виникненням короткотривалих (1–3 с) поштовхів струмів вищих гармонік, які мають значні величини. З застосуванням конденсаторних батарей чи силових фільтрів вони можуть спричиняти значні тимчасові динамічні та електричні навантаження на обладнання електропостачальної системи. Тому для забезпечення надійної роботи електропостачальної системи під час проектування та розрахунку засобів компенсації необхідно враховувати вплив цих гармонік.

1. Yacamini R., Abu-Nasser A. *The calculation of inrush current in three-phase transformers* // *Proc. IEE.* – Vol. 133. – № 1. – P. 31–40. 2. Povh D., Schultz W. *Analysis of overvoltages caused by transformer magnetizing inrush current* // *IEEE Trans. on PAS.* – 1978. – Vol. 97. – № 4. – P. 1355–1365. 3. Sybille G., Gavrilovic M.M., Belanger J. *Transformer saturation effects on EHV system overvoltages* // *IEEE Trans. on PAS.* – 1985. – Vol. 104. – № 3. – P. 671–680. 4. Варецький Ю.Е., Гапанович В.Г., Жураховський А.В. и др. *Исследование бросков токов намагничивания в системе электроснабжения сверхмощных дуговых сталеплавильных печей* // *Техническая электродинамика.* – 1990. – № 2. – С. 38–42. 5. Dick E.P., Watson W. *Transformer models for transient studies based on field measurements* // *IEEE Trans. on PAS.* – 1981. – Vol. 100. – № 1. – P. 409–419. 6. Dommel H.W. *Transformer models in simulation of electromagnetic transients* // *Proc. of 5-th Power System Computation Conf.* – Cambridge, 1975. – Paper № 3.1/4. 7. Yamashita H., Nakamae E., Hammam M.S., Wakisho K. *A program to analyse transient phenomena of circuits including precisely represented transformers* // *IEEE PES Summer Meeting.* – 1975. – Paper A 75 403-6. 8. Rye J. *Remanent flux in distribution transformers* / *Electricity Council Research ECRC-M747.* – 1974. 9. Huber F. *Inrush current of distribution transformers* // *Brown Boveri Rev.* – 1965. – Vol. 52. – № 11, 12. – P. 908–916. 10. Varetsky Y. *Exploitative characteristics of static filter circuits* // *Proc. of 5-th, Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Conf. Electric power quality and utilization.* – Cracow, 2001. – P. 297–302.