

ЛЕКЦІЯ 6

ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВЕЛИЧИНУ ЇЇ ВИТРАТИ ТА РІВЕНЬ ВТРАТ

Мета лекції – усвідомити компромісні рішення при застосуванні у системах електропривода напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

6.1. Загальні положення застосування напівпровідникових перетворювачів у системах регульованого електропривода

Класифікація і систематизація систем електропривода, що використовуються для технологічних установок у різних галузях промисловості, наведена у ДСТУ 3886–99 "Енергозбереження. Системи електропривода. Метод аналізу і вибору". У стандарті окрім методу аналізу та вибору систем електропривода наведені рекомендації зі зниження величини витрати електроенергії та визначення раціональних режимів експлуатації технологічних установок.

Системи електропривода можна класифікувати за одним критерієм – застосування різноманітних НП для ефективного регулювання параметрів технологічного процесу. Враховуючи ідею та мету цього розділу, системи електропривода технологічних установок без НП надалі розглядатимуться лише епізодично з метою зіставлення переваг і недоліків. Їх будова, схемні рішення, конструктивне виконання, автоматизація, технологічні параметри і режими роботи достатньо повно викладені у багатьох літературних джерелах, наприклад, у роботі [19]. Так, наприклад, для підйомних установок шахт використовують "класичний" асинхронний електропривід з реостатним регулюванням в ланцюзі ротора, якому властивий цілий ряд недоліків, основними з яких є неможливість точної підтримки швидкостей "дотягування" без застосування механічного гальма та значні втрати електроенергії. Величина цих втрат прямо пропорційна різниці між номінальною та зниженою швидкостями та часу руху на зниженій швидкості. Для ВГП застосовується система синхронного електропривода з незалежним збудженням, основними перевагами якої є відносно невисока вартість і можливість компенсації реактивної потужності при роботі в режимі перезбудження. Проте недоліки такої системи роблять її неконкурентоспроможною порівняно із системами на базі НП: великі пускові струми (особливо для потужних вентиляторів) і значна тривалість пуску; необхідність в установленні системи збудження; низька надійність тиристорних збуджувачів тощо.

Існує два способи регулювання продуктивності технологічних установок: технологічне (механічне) регулювання і використання системи регульованого електропривода на базі НП електроенергії. Причому ефективність заходів першого способу невелика (часто це всього лише "уявна" економія електроенергії) і вони характеризуються обмеженими діапазоном регулювання та сферою застосування. Тоді як другий спосіб дозволяє регулювати продуктивність майже будь-якої технологічної установки у дуже великому діапазоні (від нуля до но-

мінальної, а іноді й більше) з "дійсною" енергетичною ефективністю у вигляді зниження величини витрати електроенергії.

Зростання вимог до підвищення продуктивності машин, необхідність керування технологічним процесом, поява надійних і відносно недорогих НП – це основні передумови для широкого впровадження у 70-х роках минулого століття регульованого електропривода у всі галузі промисловості, особливо в металургійну. Для вугільних шахт України ця тенденція проявилася приблизно у 90-ті роки.

Нині всі провідні електротехнічні фірми випускають регульовані електроприводи комплектно з комп'ютерними засобами автоматизації у вигляді гнучкопрограмованих систем на базі: потужних польових транзисторів (MOSFET), біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT), замикальних тиристорів з інтегрованим керуванням (IGCT) та без нього (GTO). Основна перевага тиристорних перетворювачів – здатність працювати з великими струмами і напругами, витримуючи тривале навантаження та імпульсні дії. Вони також мають більш високий (до 98 %) ККД порівняно з перетворювачами на транзисторах, основними перевагами яких є проста система керування, висока надійність і повна керованість [20, 21].

Основним обладнанням вугільних шахт, на якому впроваджуються сучасні технології з перетворення електроенергії, є енергоємні стаціонарні установки: підйоми (головні та допоміжні), ВГП, компресори. Враховуючи специфіку технологічних процесів, використання НП у системах регульованого електропривода стаціонарних установок шахт дозволить отримати такі переваги [22–24]:

- підвищити безпеку та надійність роботи стаціонарних установок, що забезпечить нормальну ритмічну роботу всього підприємства;
- зменшити величину витрати електроенергії до 10 – 20 % залежно від типу технологічної установки та режиму її роботи;
- більш точно і плавно регулювати частоту обертання електродвигуна, що допоможе відмовитися від використання редукторів, варіаторів та іншої регулювальної апаратури та значно спростити керовану механічну схему і підвищити її надійність;
- плавно регулювати пуск двигуна (без підвищених пускових струмів і механічних ударів) та розгін, що знизить навантаження на двигун і збільшить термін його експлуатації;
- упровадити системи дистанційного керування стаціонарними установками і системи постійного моніторингу механізмів і електроприводів з мікропроцесорним керуванням;
- підвищити продуктивність підйомних установок на 10 – 15 % за рахунок "ущільнення" і строгого дотримання заданої тахограми підйому, витримки пауз між циклами при завантаженні–розвантаженні скіпів, автоматизації допоміжних операцій;
- візуально контролювати технологічні та механічні параметри установки (наприклад, як змінюється живильна напруга і струм, положення скіпу в стовбурі, кількість циклів підйому за добу тощо).

До основних недоліків застосування систем регульованого електропривода на базі НП слід віднести:

- генерацію значних електромагнітних перешкод, які виявляються під час спотворення синусоїдальної форми кривих напруги і струму живильної електричної мережі;

- низький коефіцієнт потужності, особливо при глибокому регулюванні швидкості обертання двигуна, що виявляється в значному обсязі та різкозмінних режимах споживання реактивної потужності та пов'язаних з цим коливаннях напруги;

- зниження коефіцієнта корисної дії та терміну служби двигунів, додаткові втрати потужності та енергії, пов'язані з погіршенням якості електроенергії при роботі НП;

- значні капітальні витрати тощо.

Отже, наявність істотних технологічних переваг перетворювачів енергії зумовила їх широке впровадження в системи регульованого електропривода різних технологічних процесів, у тому числі й стаціонарних установок вугільних шахт. Недоліків від застосування НП, які більш докладно розглянуті у п. 6.3, можливо уникнути при застосуванні у системах електропостачання спеціальних пристроїв, типи та характеристики яких наведені у п. 6.4.

6.2. Джерела вищих гармонік в електричних мережах шахт

6.2.1. Вентильні перетворювачі

Вентильні перетворювачі напруги є потужними джерелами гармонійних перешкод. У поширених 6–пульсних мостових схемах основними є 5, 7, 11 та 13-та гармоніки, які називаються канонічними (рис. 6.1, *a*). При використанні 12–пульсних схем для більш потужних установок теоретично немає 5 і 7-ї гармонік, а переважають 11, 13, 23 і 25-та [25, 26]. Такі перетворювачі застосовуються на вугільних шахтах, насамперед, у системах електропривода типу "тиристорний перетворювач – двигун постійного струму" на скіпових та клітьових підйомних установках. Це комплектні тиристорні електроприводи серій ЕКТЦ, КТЕУ тощо.

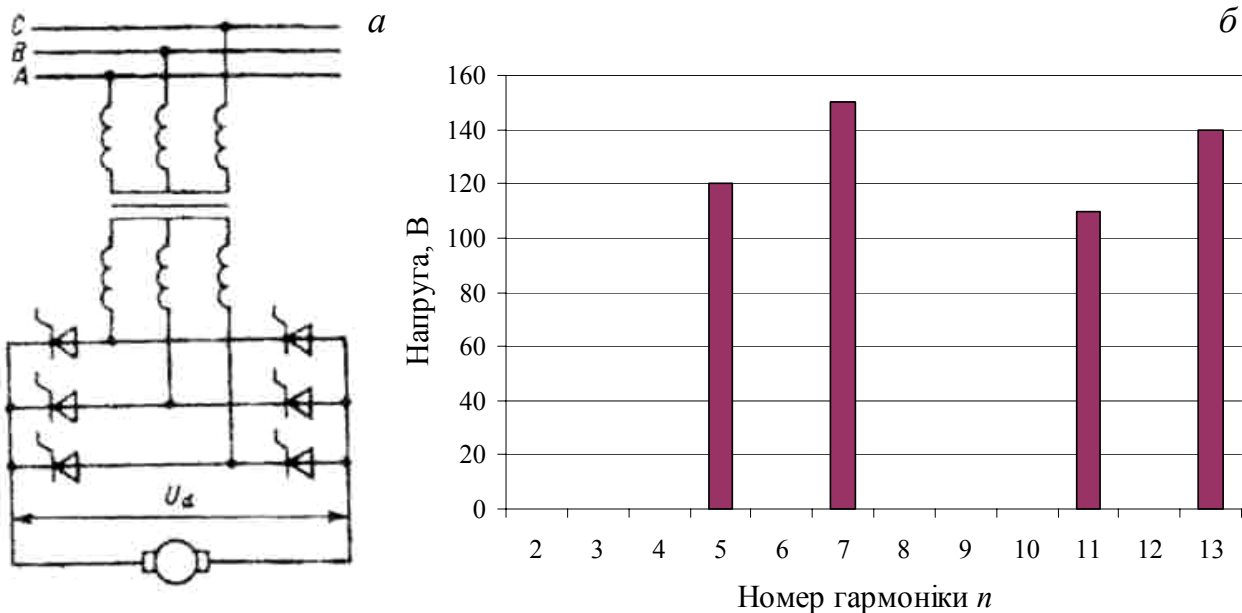


Рис. 6.1. Трифазна мостова схема 6-пульсного вентильного перетворювача (а) та амплітудний спектр кривої напруги (б)

Приклад 6.1. Визначити коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U (коефіцієнт несинусоїдальності напруги) для гармонійного спектра, що відповідає циклу роботи головного підйому шахти на номінальній напрузі $U_{ном} = 6000$ В (рис. 6.1, б).

Розв'язування. Коефіцієнт n -ї гармоніки напруги $K_{U(n)}$, наприклад, 5-ї

$$K_{U(5)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{U_5}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{120}{6000} \cdot 100 = 2,0 \%$$

де U_n – діючі значення напруги відповідних гармонік, В.

Аналогічно знаходимо: $K_{U(7)} = 2,5 \%$; $K_{U(11)} = 1,83 \%$; $K_{U(13)} = 2,33 \%$.

Коефіцієнт несинусоїдальності напруги

$$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} K_{U(n)}^2} = \sqrt{K_{U(5)}^2 + K_{U(7)}^2 + K_{U(11)}^2 + K_{U(13)}^2} = \\ = \sqrt{2,0^2 + 2,5^2 + 1,83^2 + 2,33^2} = 4,36 \%$$

Розрахований коефіцієнт несинусоїдальності напруги відповідає вимогам діючого міждержавного стандарту ГОСТ 13109–97 "Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения".

6.2.2. Перетворювачі частоти з ланкою постійного струму

Перетворювачі частоти з ланкою постійного струму є потужними джерелами вищих гармонік канонічних порядків (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 ...) та інтергармонік (їх частота не кратна основній 50 Гц, наприклад, 88 Гц). Подвійне перетворення енергії, що відбувається у таких перетворювачах, трохи знижує ККД, але ряд переваг забезпечує широку сферу їх застосування у сучасному електроприводі, у тому числі й технологічних установок шахт. Наприклад, для

ВГП розроблена система регульованого електропривода типу ПЧСВ на базі синхронного двигуна напругою 6 кВ з незалежним збудженням.

Перетворювач з ланкою постійного струму (рис. 6.2) складається з двох вентильних систем – випрямляча та інвертора (як правило, інвертора напруги). Ланка постійного струму включає індуктивність L_d і ємність C . Потужні перетворювачі частоти оснащуються ви-рівнювальним реактором L_d , призначеним для зменшення пульсацій струму I_d , а в малопотужних перетворювачах зв'язок випрямляча й інвертора здійснюється тільки за допомогою конденсатора C . До електричної мережі ПЧПС підключається безпосередньо, тобто без спеціального трансформатора [26].

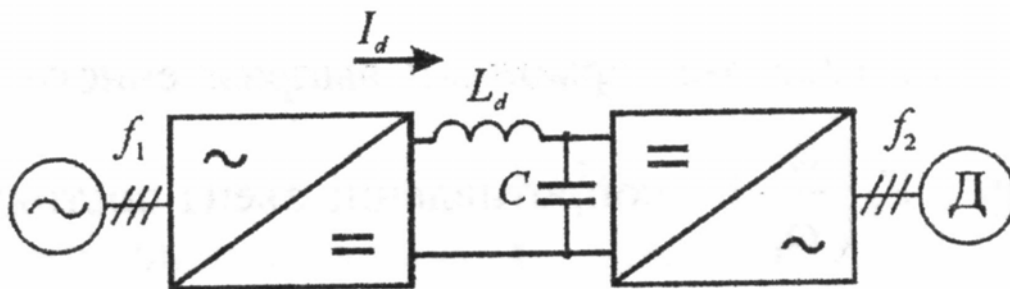


Рис. 6.2. Структурна схема ПЧПС

6.2.3. Безпосередні перетворювачі частоти

Перетворювачі частоти без проміжної ланки постійного струму або безпосередні перетворювачі частоти (циклоконвектори) генерують у живильні електричні мережі значні за рівнем вищі гармоніки канонічного ряду та інтергармоніки. Існує ряд типів і схем перетворювачів частоти, що мають своє практичне застосування. Одним із найпоширеніших типів є безпосередній перетворювач частоти з природною комутацією струму тиристорів, спрощена схема якого наведена на рис. 6.3. Схема містить два однакових вентильних комплекти B_1 і B_2 , які пропускають струм навантаження різної полярності. Частота f_2 основної гармоніки струму навантаження визначається системою імпульсно-фазового керування СІФК [26].

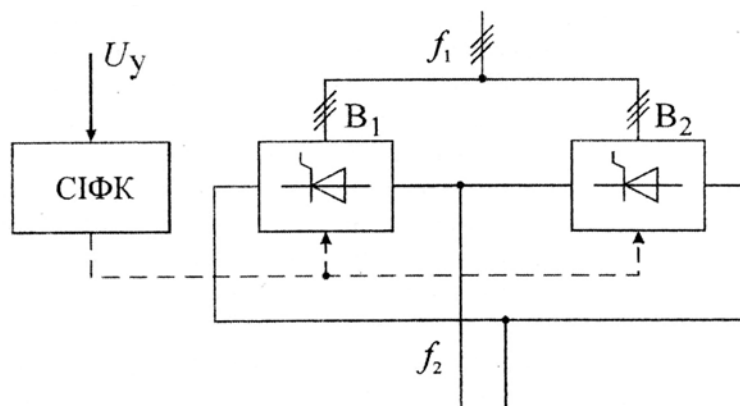


Рис. 6.3. Схема трифазно – однофазного циклоконвектора

з природною комутацією

Більш удосконаленими є безпосередні перетворювачі частоти зі штучною комутацією тиристорів, які будуються за тими принциповими схемами, що й з природною комутацією, але з додатковою ланкою (ланками) штучної комутації.

У системах електропривода технологічних установок вугільних шахт також застосовують безпосередні перетворювачі частоти, наприклад, в апаратурі частотного електропривода серії ПЧВ-К У5 для потужних магістральних конвеєрів з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором.

6.2.4. Каскадні схеми на базі асинхронного двигуна

Як відомо, асинхронні двигуни найбільше застосовуються на вугільних шахтах, а тому саме різноманітні каскадні схеми електропривода на їх базі (асинхронний вентильний, інверторний або тиристорний каскади) широко використовуються для регулювання технологічних параметрів різних установок. Водночас каскадні схеми дуже погіршують якість напруги та струму в системі електропостачання, що викликано наявністю двох перетворювачів P1 і P2 та електричним зв'язком із живильною мережею як статора, так і ротора керуемого асинхронного двигуна (рис. 6.4, а).

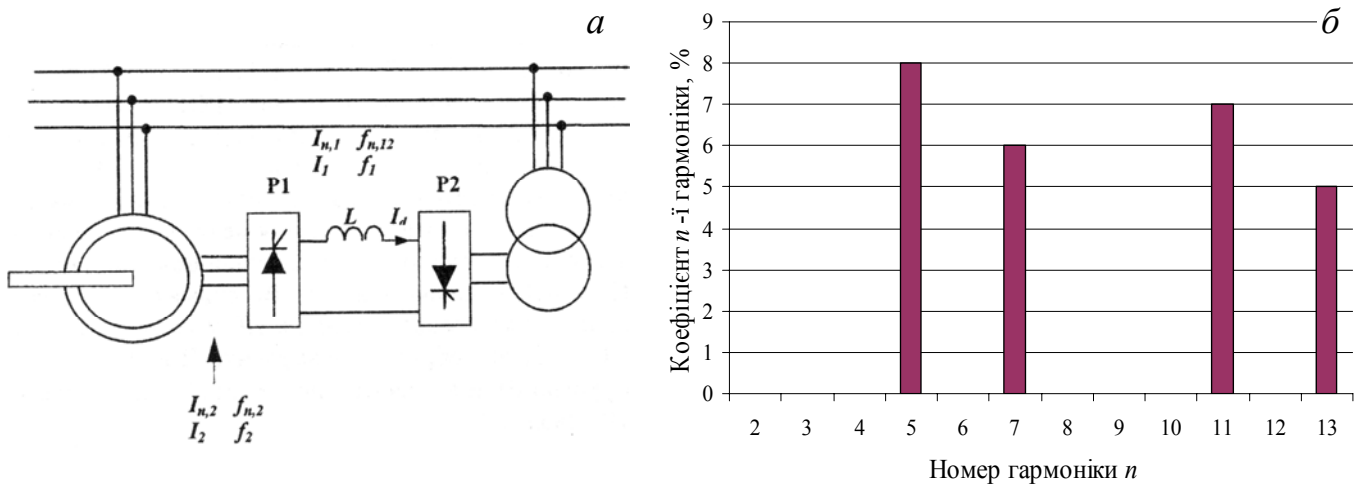


Рис. 6.4. Принципова схема каскадного електропривода (а) та вигляд гармонійного спектра струму при його роботі (б)

Саме тому при роботі асинхронного каскаду у струмі мережі можуть з'явитися складові таких частот [26]:

1. Канонічні гармоніки, що генеруються перетворювачем P2:

$$f_k = (p_2 k \pm 1) f_1,$$

де p_2 – пульсність перетворювача P2; $f_1 = 50$ Гц – основна частота електричної мережі; $k = 0, 1, 2, \dots$

2. Інтергармоніки з частотами $f_{n,12}$, які за допомогою перетворювача P2 переходять у живильну мережу як бічні складові навколо його канонічних гармонік.

3. Гармонійні складові, наявність яких обумовлена трансформацією гармонік ротора на бік статора. Складові струмів ротора з частотою $f_{n,2}$ з'являються в статорі з частотою $f_{n,1}$.

На вугільних шахтах останнім часом у системах електропривода головних підйомних та вентиляторних установок застосовують схему АТК на базі асинхронного двигуна з фазним ротором напругою 6 кВ.

Приклад 6.2. Визначити діюче значення повного струму, споживаного з мережі двигуном системи АТК для електропривода вентилятора головного провітрювання, якщо діюче значення струму основної гармоніки $I_1 = 120$ А, а спектр вищих гармонік має такий вигляд, як на рис. 6.4, б (постійну складову струму можна не враховувати).

Розв'язування. Діючі значення n -ї гармонійної складової струму

$$I_5 = \frac{K_{I(n)}}{100} \cdot I_1 = \frac{K_{I(5)}}{100} \cdot I_1 = \frac{8}{100} \cdot 120 = 9,6 \text{ А,}$$

де $K_{I(n)}$ – коефіцієнт n -ї гармонійної складової струму, % (рис. 6.4, б).

Аналогічно знаходимо: $I_7 = 7,2$ А; $I_{11} = 8,4$ А; $I_{13} = 6,0$ А.

Тоді діюче значення повного струму

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{40} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} = \sqrt{120^2 + 9,6^2 + 7,2^2 + 8,4^2 + 6^2} = 121,04 \text{ А.}$$

Бачимо, що повний споживаний з мережі струм за рахунок появи вищих гармонійних складових збільшився на 1,04 А. Для умов прикладу таке зростання несуттєве, однак при іншому спектральному складі та більших рівнях вищих гармонік повний струм може збільшитися настільки, що це потребує заміни живильного кабелю, комутаційної апаратури тощо. Окрім цього, пропорційно його величині зростають втрати електроенергії в елементах СЕП.

6.3. Основні негативні наслідки застосування систем регульованого електропривода

6.3.1. Додаткові втрати потужності та енергії від струмів вищих гармонік

Відповідно до п. 6.2 усі системи регульованого електропривода на базі напівпровідникових перетворювачів є джерелами вищих гармонік напруги та струму в живильну мережу, які, окрім усього іншого, викликають додаткові втрати активної потужності в електрообладнанні, що знаходиться під впливом неякісної електроенергії. Зазвичай враховують додаткові втрати енергії в обмотках статора та ротора двигунів (втрати в міді), а втратами в сталі нехтують.

На рис. 6.5 розглянуто криві, які характеризують процес зміни коефіцієнтів несинусоїдальності напруги і струму в циклі роботи головної підйомної установки з електроприводом за системою АТК та підтверджують висновок стосовно суттєвого "забруднення" живильної мережі вищими гармоніками при використанні напівпровідникових перетворювачів.

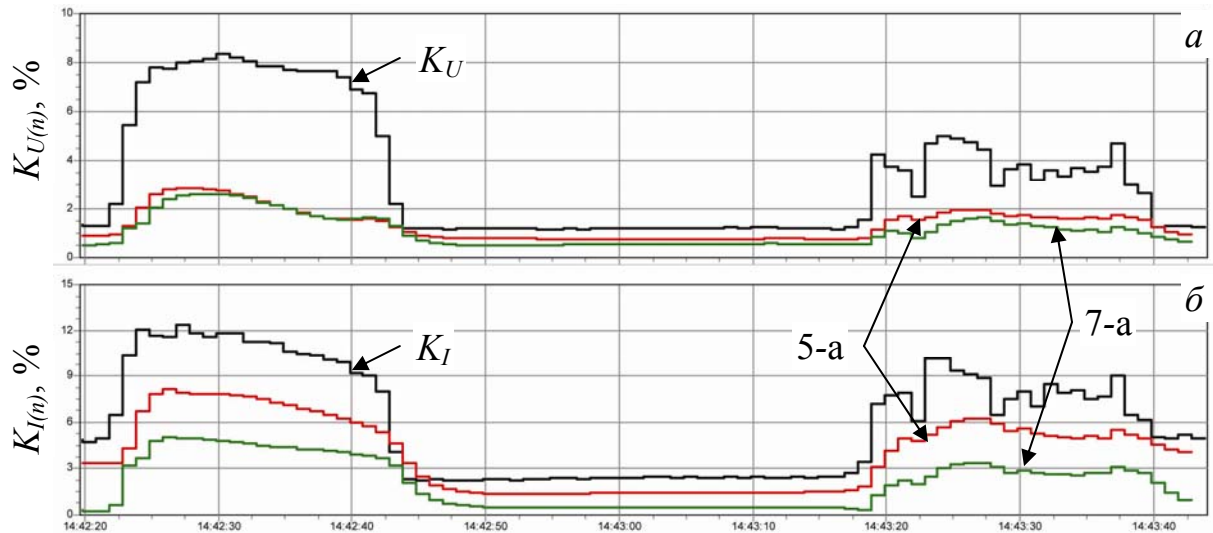


Рис. 6.5. Криві зміни коефіцієнта несинусоїдальності напруги (а) та струму (б) у циклі роботи головної підйомної установки із системою АТК

Додаткові втрати в асинхронних двигунах, обумовлені вищими гармоніками, визначаються за такими формулами [25, 26]:

$$\Delta P_{AD}^{(n)} = \Delta P_{\text{м.ном}} \sum_{n=2}^m K_{I(n)}^2 \sqrt{n}; \quad (6.1)$$

$$\Delta P_{AD}^{(n)} = 2\Delta P_{\text{м.ном}} k_{nc}^2 \sum_{n=2}^m K_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}},$$

де $\Delta P_{\text{м.ном}}$ – номінальні втрати в міді статора електродвигуна, кВт; n – порядковий номер гармоніки; k_{nc} – кратність пускового струму; $K_{I(n)} = I_n / I_1$ та $K_{U(n)} = U_n / U_1$ – коефіцієнти n -ї гармонійної складової струму та напруги відповідно, в.о.; I_n та U_n – діючі значення струму (А) та напруги (В) n -ї гармоніки відповідно; I_1 та U_1 – діючі значення струму (А) та напруги (В) першої (основної) гармоніки відповідно.

Додаткові втрати в синхронних машинах, обумовлені вищими гармоніками,

$$\Delta P_{CD}^{(n)} = k_{cm} P_{\text{ном}} \sum_{n=2}^m K_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}},$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність електродвигуна, кВт; k_{cm} – коефіцієнт синхронної машини, що залежить від її типу [25].

Втрати активної потужності від струмів вищих гармонік у трансформаторах

$$\Delta P_{TP}^{(n)} = 3 \sum_{n=2}^m I_n^2 r_k k_n,$$

де I_n – струм n -ї гармоніки, що проходить через трансформатор; r_k – опір короткого замикання трансформатора при промисловій частоті; k_n – коефіцієнт, що враховує збільшення опору короткого замикання для вищих гармонік унаслідок впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості (для силових трансформаторів можна прийняти: $k_5 = 2,1$; $k_7 = 2,5$; $k_{11} = 3,2$; $k_{13} = 3,7$).

Додаткові втрати потужності в силових трансформаторах (кВт) також можна визначити за формулою (при цьому нехтуємо додатковими втратами холостого ходу від струмів вищих гармонік)

$$\Delta P_{TP}^{(n)} = 1,291 \frac{\Delta P_{кз}}{u_{кз}^2} \sum_{n=2}^m \frac{1 + 0,05n^2}{n\sqrt{n}} K_{U(n)}^2, \quad (6.2)$$

де $\Delta P_{кз}$ – втрати короткого замикання трансформатора, кВт; $u_{кз}$ – напруга короткого замикання, в.о.

Додаткові втрати потужності в батареях конденсаторів (Вт) при їх приєднанні до шин без захисного реактора визначаються з урахуванням припущення, що коефіцієнт діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ однаковий для усіх вищих гармонік (включно до 13-ї гармоніки):

$$\Delta P_{БК}^{(n)} = 3\omega C \text{tg}\delta \sum_{n=1}^{13} n U_n^2,$$

де U_n – напруга n -ї гармоніки (включаючи інтергармоніки) на шині після підключення батареї конденсаторів, В; C – ємність конденсаторів, Ф; ω – кутова частота, рад.

Додаткові втрати потужності в конденсаторних установках (кВт) від несинусоїдальності [27]

$$\Delta P_{БК}^{(n)} = 10^{-4} Q_n \text{tg}\delta \sum_{n=2}^{40} n K_{U(n)}^2,$$

де Q_n – номінальна реактивна потужність установки, квар.

Додаткові втрати потужності у фільтрокомпенсувальних пристроях n -ї гармоніки (Вт) складаються переважно із втрат у реакторі та батареї конденсаторів на частотах вищих гармонік та інтергармонік, на які налаштований ФКП (втратами від інших вищих гармонік, що проникають у фільтр, можна знехтувати) [26]:

$$\Delta P_{\Phi K\Pi}^{(n)} = 3I_n^2 r_p \sqrt{n} + 3nU_n^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

де I_n – струм n -ї гармоніки, що проходить через фільтр; $r_p \sqrt{n}$ – активний опір реактора для n -ї гармоніки за припущення різкого прояву поверхневого ефекту.

Додаткові втрати потужності в лініях електропередачі за умови різкого прояву поверхневого ефекту

$$\Delta P_{\text{ЛЕП}}^{(n)} = 3r_l \sum_{n=2}^m I_n^2 \sqrt{n}, \quad (6.3)$$

де r_l – активний опір ЛЕП на основній частоті, Ом.

Додаткові втрати потужності від струмів вищих гармонік викликають відповідні втрати електроенергії, що визначаються за відомими формулами для різних видів електрообладнання та прямо пропорційні часу роботи устаткування за умов впливу несинусоїдальних напруги та струму.

Приклад 6.3. Для умов прикладу 6.2 визначити додаткові втрати активної потужності від вищих гармонік в асинхронному двигуні системи АТК з номінальними втратами в міді статора $\Delta P_{\text{м.ном}} = 240$ кВт та в живильній кабельній лінії довжиною $l_k = 400$ м з питомим активним опором $r_{0k} = 0,28$ Ом/км.

Розв'язування. Додаткові втрати потужності від вищих гармонік в асинхронному двигуні

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{АД}}^{(n)} &= \Delta P_{\text{м.ном}} \sum_{n=2}^m K_{I(n)}^2 \sqrt{n} = \Delta P_{\text{м.ном}} \left(K_{I(5)}^2 \sqrt{5} + K_{I(7)}^2 \sqrt{7} + K_{I(11)}^2 \sqrt{11} + K_{I(13)}^2 \sqrt{13} \right) = \\ &= 240 \left(0,08^2 \sqrt{5} + 0,06^2 \sqrt{7} + 0,07^2 \sqrt{11} + 0,05^2 \sqrt{13} \right) = 11,8 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

де $K_{I(n)}$ – коефіцієнти n -ї гармонійної складової струму згідно з рис. 6.4, б, в.о.

За формулою (6.3) додаткові втрати в кабельній ЛЕП

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ЛЕП}}^{(n)} &= 3r_l \sum_{n=2}^m I_n^2 \sqrt{n} = 3r_{0k} l_k \left(I_5^2 \sqrt{5} + I_7^2 \sqrt{7} + I_{11}^2 \sqrt{11} + I_{13}^2 \sqrt{13} \right) = \\ &= 3 \cdot 0,28 \cdot 0,4 \left(9,6^2 \sqrt{5} + 7,2^2 \sqrt{7} + 8,4^2 \sqrt{11} + 6^2 \sqrt{13} \right) = 0,24 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

де $r_l = r_{0k} l_k$ – активний опір кабельної ЛЕП, Ом; I_n – струм n -ї гармоніки, А.

Сумарні втрати активної потужності, що визначають зростання величини витрати електроенергії, для умов прикладу сягають 12 кВт, що досить суттєво.

Приклад 6.4. Для умов прикладу 6.1 визначити додаткові втрати активної потужності від вищих гармонік у силовому трансформаторі типу ТРДН-25000/110 головної знижувальної підстанції шахти.

Розв'язування. Додаткові втрати потужності від вищих гармонік у силовому трансформаторі за формулою (6.2)

$$\Delta P_{TP}^{(n)} = 1,291 \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \sum_{n=2}^m \frac{1 + 0,05n^2}{n\sqrt{n}} K_{U(n)}^2 = 1,291 \frac{120}{0,105^2} \times$$

$$\times \left(\frac{1 + 0,05 \cdot 5^2}{5\sqrt{5}} 0,02^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 7^2}{7\sqrt{7}} 0,025^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 11^2}{11\sqrt{11}} 0,0183^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 13^2}{13\sqrt{13}} 0,023^2 \right) =$$

$$= 5,2 \text{ кВт},$$

де $\Delta P_{K3} = 120$ кВт і $u_{K3} = 0,105$ в.о. – рівень втрат потужності та напруга короткого замикання трансформатора ТРДН-25000/110 (довідкові матеріали).

Для зазначеного у прикладі гармонійного спектра та рівня вищих гармонік додаткові витрати електроенергії у силовому трансформаторі сягнуть величини понад 45 МВт·год на рік, що підтверджує важливість вирішення проблеми її якості.

Слід розуміти, що додаткові втрати потужності та електроенергії в елементах СЕП та привідних двигунах від несінусоїдальності напруги та струму значно менші за втрати, викликані перетоками реактивної потужності та відповідним низьким значенням $\cos \phi$ (див. п. 1.2). Такі значні за величиною перетоки зумовлені застосуванням напівпровідникових перетворювачів у системах регульованого електропривода. Розглянемо цю проблему детальніше.

6.3.2. Проблема компенсації реактивної потужності

Робота систем регульованого електропривода на базі НП характеризується різкозмінним режимом споживання реактивної потужності з мережі, особливо для технологічного устаткування, що потребує "глибокого" регулювання за відносно короткі проміжки часу (наприклад, підйомних установок). Для такого режиму характерні значні за величиною стрибки споживання реактивної енергії та низький коефіцієнт потужності $\cos \phi$ (наприклад, для підйомних установок його середньозважене за цикл роботи значення складає лише 0,3 – 0,6).

Як підтвердження останньої тези, на рис. 6.6 наведені криві споживання активної P , реактивної Q та повної S потужностей за цикл роботи головної підйомної установки із системою АТК, а також її добовий графік електричного навантаження.

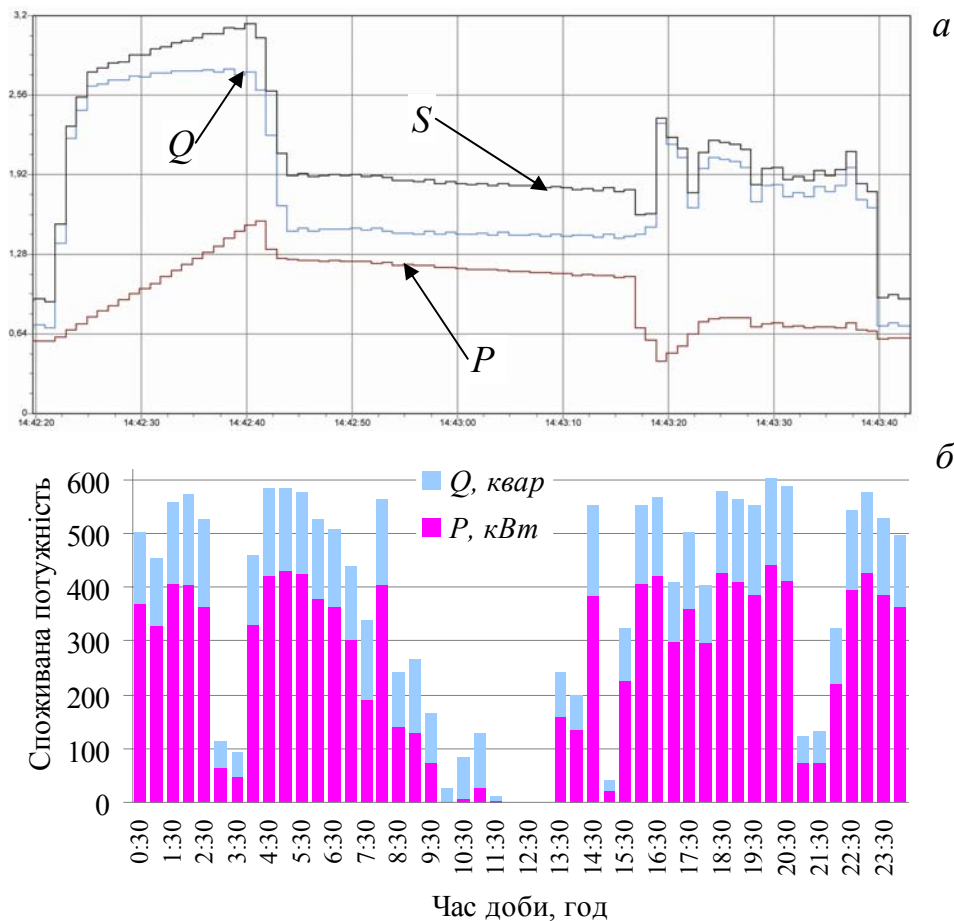


Рис. 6.6. Криві споживання потужностей за цикл роботи головної підйомної установки із системою АТК (а) та її фактичний добовий ГЕН (б)

Форма кривих зміни потужностей свідчить, що значне споживання її реактивної складової спостерігається в періоди несталого руху скіпа, тобто в процесі його розгону, гальмування й розвантаження. У цей час величина споживаної реактивної потужності в 1,5 – 2 рази перевищує активну. В процесі сталого руху скіпа стрибків споживання реактивного навантаження не відбувається, і його величина порівняна з активним. Це підтверджує тезу про те, що "глибоке" регулювання технологічних параметрів за допомогою напівпровідникових перетворювачів значно знижує величину коефіцієнта потужності.

У системах реверсивних тиристорних електроприводів з міркувань забезпечення сталої роботи інвертора діапазон зміни кута регулювання тиристорів складає 30 – 150 електричних градусів. При цьому під час регулювання швидкості приводу коефіцієнт потужності змінюється від $\cos 30^\circ$ (150°), який дорівнює 0,866 при номінальній швидкості електродвигуна, до $\cos 90^\circ$, який дорівнює нулю при нульовій швидкості (двигун не обертається), тобто найбільш складні режими з точки зору споживання реактивної потужності – це режими розгону та гальмування приводів (мінімальних швидкостей), оскільки при цьому з мережі споживається максимальний струм індуктивного характеру [24].

За умови несинусоїдальності напруги й струму в електричній мережі компенсація реактивної потужності за допомогою найбільш розповсюджених

БСК значно ускладнюється або взагалі виявляється неможливою. Це пов'язано з декількома основними факторами. По–перше, батареї конденсаторів можуть довгий час працювати при перевантаженні струмами вищих гармонік, які не перевищують 30 %, та підвищеній до 10 % напрузі. Однак опір саме конденсаторів значно зменшується зі зростанням частоти, тому у цих умовах термін їхньої роботи скорочується (особливо це стосується батарей, що приєднуються до мережі безпосередньо, тобто без захисних реакторів). По–друге, значення ємності конденсаторів та індуктивності електричної мережі можуть спровокувати в системі електропостачання режим, близький до резонансу струмів на частоті будь-якої з гармонік. Звичайно, що такий режим призводить до перевантаження батарей конденсаторів та виходу їх із ладу. По–третє, різкозмінний режим споживання реактивної потужності (короткотривалі стрибки і провали) при застосуванні систем електропривода на базі напівпровідникових перетворювачів робить неефективним використання нерегульованих або ступенево регульованих конденсаторних установок. Для таких умов необхідне впровадження фільтрокомпенсувальних пристроїв, величина генерованої реактивної потужності яких регулюється в масштабі реального часу (див. п. 6.4).

Отже, величина потенціалу зниження величини витрати електроенергії при використанні регульованого електропривода залежить від необхідного (або наявного) діапазону регулювання продуктивності технологічної установки. При наближенні фактичних регульованих параметрів установки до номінальних енергетична ефективність застосування систем регульованого електропривода щодо зниження величини витрати електроенергії зменшується, а при їх рівності й зовсім зникає. Водночас при "глибокому" регулюванні значно зростає споживання реактивної потужності та спотворюється синусоїдальна форма кривих напруги та струму в електричній мережі.

6.3.3. Інші негативні наслідки впливу вищих гармонік струму та напруги

За умови несинусоїдальної напруги, окрім додаткових втрат активної потужності та енергії в елементах системи електропостачання та електричних машинах (див. п. 6.3.1), а також ускладнення режиму компенсації реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів (див. п. 6.3.2) спостерігається ряд інших негативних явищ. Рівень прояву таких явищ залежить від потужностей джерел вищих гармонік та системи електропостачання, що оцінюється потужністю короткого замикання у місці приєднання нелінійного навантаження.

У результаті додаткового нагріву струмами вищих гармонік та інтенсифікації іонізаційних процесів скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів, що особливо виявляється при експлуатації "незахищених" батарей конденсаторів [25, 26].

При роботі асинхронних двигунів в умовах несинусоїдальної напруги їх коефіцієнт потужності й обертальний момент на валу незначно знижуються внаслідок впливу струмів вищих гармонік та зворотної послідовності.

При несинусоїдальних режимах роботи облік електроенергії пов'язаний зі значними похибками, значення яких залежать від вимірювальної системи лічи-

льника, його частотної характеристики, місця встановлення та інших факторів. Наприклад, електронні лічильники мають позитивну частотну похибку, тому в мережах з несинусоїдальною напругою має місце недооблік електроенергії, а в іншому випадку – переоблік.

Вплив вищих гармонік на системи імпульсно-фазового керування перетворювачів може призвести до появи так званої гармонійної нестійкості, тобто до появи на шинах багатопульсного напівпровідникового перетворювача великої напруги парної гармоніки або кратної трьом. При цьому можливо порушення комутації, і як наслідок робота системи може виявитися нестійкою.

Вищі гармоніки струму й напруги в мережі погіршують роботу телемеханічних пристроїв, якщо силові кола використовуються як канали зв'язку для диспетчерського керування, ускладнюють застосування системи телекерування по лініях розподільних мереж.

Окрім цього, струми вищих гармонік призводять до погіршення роботи високочастотного зв'язку й систем автоматики, а також викликають помилкове спрацьовування деяких релейних захистів. Особливо це стосується пристроїв, що мають у своєму складі напівпровідникові елементи.

За умови несинусоїдальності напруги й струму підсилюється вплив інших видів електромагнітних перешкод. Наприклад, при зниженні напруги в мережі внаслідок різних причин імовірність відмов електронних систем обліку, захисту та керування в умовах несинусоїдальних режимів значно зростає.

6.4. Шляхи вирішення проблеми підвищення якості електроенергії

Для підвищення показників якості електроенергії використовуються різні методи й технічні засоби. Батареї статичних конденсаторів застосовуються безпосередньо для компенсації реактивної потужності. Як додаток до неї, фільтрокомпенсувальні пристрої на базі простих резонансних або складних комбінованих фільтрів забезпечують також фільтрацію вищих гармонік та інтергармонік. Ще більші можливості мають активні й гібридні фільтри, за допомогою яких також знижується рівень інтергармонік [25, 26].

Пряма компенсація передбачає генерування реактивної потужності за допомогою БСК зі ступеневим або плавним регулюванням. У першому разі різну кількість секцій батарей конденсаторів підключають за допомогою тиристорних ключів, у другому – використовують перетворювачі частоти зі штучною комутацією тиристорів. Однак за умов несинусоїдальних режимів пряма компенсація виявляється вкрай неефективною (див. п. 6.3.2).

Зниження рівнів вищих гармонік у мережах потребує комплексного підходу, оснований на застосуванні *резонансних фільтрів*, які називаються *фільтрокомпенсувальними пристроями*, що разом зі зниженням несинусоїдальності генерують реактивну потужність.

При паралельному з'єднанні LC -кіл, налаштованих на частоти окремих гармонік, реалізується ланцюжковий ФКП. Дефіцит реактивної потужності в цьому разі може бути повністю покритий за допомогою БСК, встановлена потужність яких використовується на 80 – 90 %. Отже, фільтрокомпенсувальні

пристрої за своєю будовою є найбільш простими й економічними, що забезпечило їхнє широке застосування.

Активні фільтри є перспективними багатофункціональними пристроями, що забезпечують залежно від їх схем фільтрацію вищих гармонік та інтергармонік, компенсацію реактивної потужності, зменшення глибини й тривалості провалів напруги, регулювання напруги у споживача.

Взагалі АФ являє собою джерело реактивного струму навантаження основної частоти, вищих гармонік та інтергармонік, яке приєднується паралельно навантаженню або послідовно в роз'язття лінії. Пристрій керування АФ забезпечує формування сигналів відповідно до алгоритму, що дозволяє активним фільтрам генерувати реактивний компенсувальний струм основної частоти та струми вищих гармонік й інтергармонік, щоб у сумі зі струмом нелінійного навантаження в мережі отримати активний струм практично синусоїдальної форми.

Основним недоліком АФ є його значна вартість, особливо для високої напруги та великих потужностей.

Інший різновид активної фільтрації полягає у використанні *гібридних фільтрів*, у яких активний фільтр вмикається паралельно або послідовно з фільтрокомпенсувальним пристроєм. При цьому ФКП налаштовується на частоти значущих вищих гармонік, а АФ забезпечує додаткове зниження несинусоїдальності. У цьому разі потрібна значно менша встановлена потужність активного фільтра, який дорого коштує.

Одне з найбільш ефективних рішень з підвищення якості електроенергії в електричних мережах з нелінійним навантаженням – використання регульованого ФКП, структурна схема якого наведена на рис. 6.7. Пристрій складається з фільтра n -ї гармоніки (або гармонік), індуктивність L_ϕ та ємність C_ϕ якого налаштовуються на відповідну частоту. Ємність забезпечує також постійну компенсацію реактивної потужності. Пристрій декомпенсації, що складається з дроселів L_d та тиристорних груп TT , "забирає" в себе надлишки реактивної потужності при перекомпенсації, обсяг якої визначається за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги VTH та струму TC . Система керування ФКП окрім загальновідомих відповідних функцій регулює кут відкривання тиристорів, який тим більше, чим більше обсяг перекомпенсації реактивної потужності.

Регульований ФКП забезпечує зниження несинусоїдальності кривих напруги та струму за рахунок фільтрації відповідних гармонік, а також підтримує на постійно високому рівні (близькому до одиниці) значення коефіцієнта потужності на шинах підстанції, до якої він приєднується. Як приклад ефективності застосування регульованих ФКП, на рис. 6.8 розглянуто криві зміни коефіцієнтів несинусоїдальності напруги та потужності. Ми бачимо, що при вмиканні пристрою (час $t_{вм}$) рівні 5-ї гармоніки та загального коефіцієнта несинусоїдальності напруги знижуються, а величина $\cos \phi$ значно підвищується.

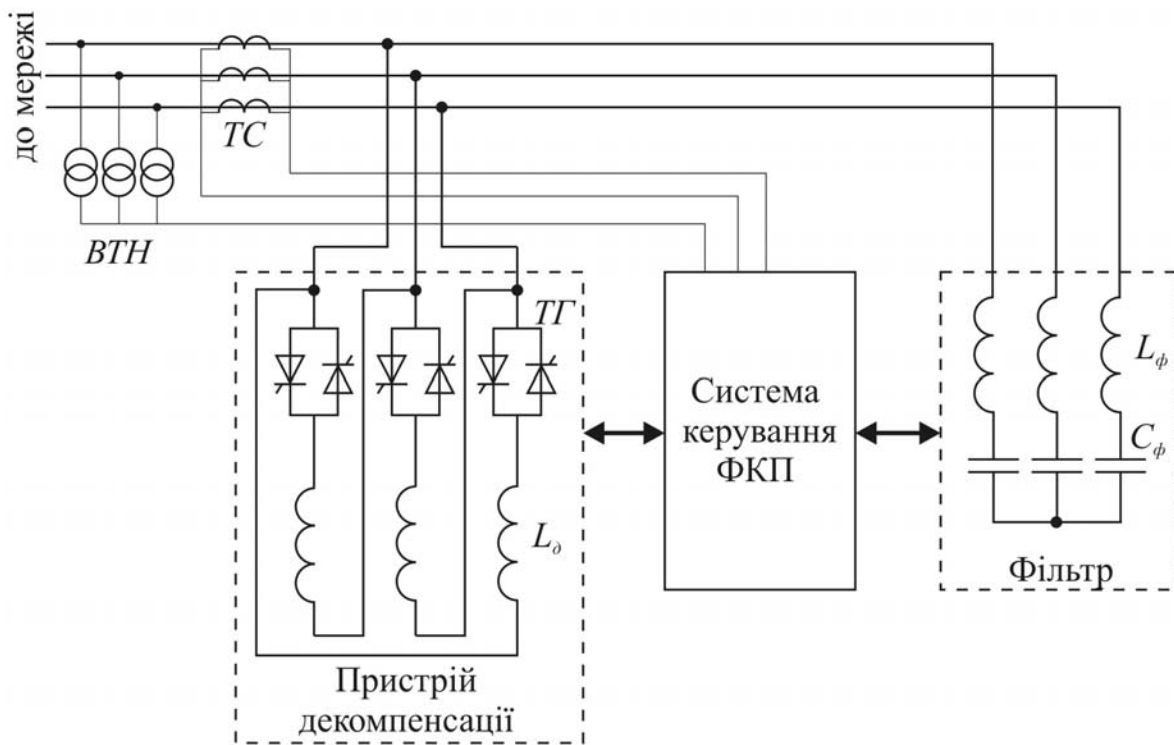


Рис. 6.7. Структурна схема регульованого ФКП

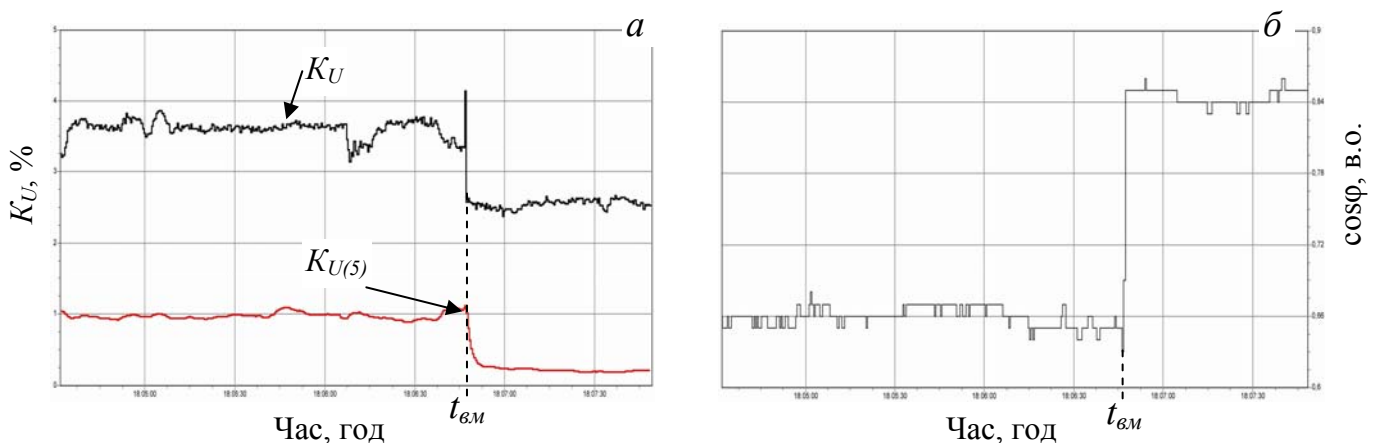


Рис. 6.8. Криві зміни коефіцієнтів несинусоїдальності напруги (а) та потужності (б) під час вмикання $t_{вм}$ ФКП 5-ї гармоніки

Отже, проблема підвищення якості електроенергії в електричних мережах з нелінійним навантаженням, що дуже гостро постає останнім часом унаслідок широкого впровадження НП, потребує комплексного вирішення як з боку зниження несинусоїдальності, так і з боку компенсації реактивної потужності.

Приклад 6.5. Споживана комплектним розподільним пристроєм (КРП) напругою $U_n = 6$ кВ активна електроенергія W_a при середньозваженому коефіцієнті потужності $\cos\varphi_{cp1} = 0,7$ за показаннями лічильника дорівнює 132 МВт·год за добу. З причини використання систем регульованого електропривода на базі НП (тривалість їх роботи $T_{рНП} = 18$ год за добу) гармонійний спектр кривої напруги характеризується такими коефіцієнтами: $K_{U(5)} = 4,4$ %;

$K_{U(7)} = 3,2 \%$; $K_{U(11)} = 2,1 \%$; $K_{U(13)} = 1,7 \%$; $K_U = 6,1 \%$, а струму: $K_{I(5)} = 8,7 \%$; $K_{I(7)} = 6,8 \%$; $K_{I(11)} = 4,2 \%$; $K_{I(13)} = 3,4 \%$; $K_I = 12,3 \%$. Для того, щоб показники якості електроенергії відповідали вимогам ГОСТ 13109–97, до КРП був приєднаний ФКП 5-ї гармоніки потужністю $Q_\phi = 3$ Мвар, після чого середньозважений коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{cp2}$ підвищився до величини 0,9, а коефіцієнти гармонійних складових отримали такі значення:

- напруги $K_{U(5)} = 0,2 \%$, $K_{U(7)} = 0,7 \%$, $K_{U(11)} = 2,2 \%$, $K_{U(13)} = 1,9 \%$, $K_U = 3,0 \%$;
- струму $K_{I(5)} = 1,4 \%$, $K_{I(7)} = 2,5 \%$, $K_{I(11)} = 3,9 \%$, $K_{I(13)} = 2,9 \%$, $K_I = 5,6 \%$.

Визначити, на яку величину зменшиться річна витрата електроенергії після приєднання ФКП, що обумовлено зниженням несинусоїдальності та зростанням $\cos \varphi_{cp}$, у:

- силовому трансформаторі типу ТДНС-10000/35, від якого живиться КРП, з параметрами $\Delta P_{xx} = 12$ кВт, $\Delta P_{кз} = 60$ кВт, $I_{xx} = 0,75 \%$, $u_{кз} = 8,0 \%$;
- кабельній лінії, що живить КРП, при $r_{ок} = 0,07$ Ом/км, $l_k = 200$ м.

Розв'язування. За формулою (6.2) додаткові втрати потужності від вищих гармонік у силовому трансформаторі до встановлення ФКП

$$\Delta P_{TP1}^{нес} = 1,291 \frac{\Delta P_{кз}}{u_{кз}^2} \sum_{n=2}^m \frac{1+0,05n^2}{n\sqrt{n}} K_{U(n)}^2 = 1,291 \frac{60}{0,08^2} \times$$

$$\times \left(\frac{1+0,05 \cdot 5^2}{5\sqrt{5}} 0,044^2 + \frac{1+0,05 \cdot 7^2}{7\sqrt{7}} 0,032^2 + \frac{1+0,05 \cdot 11^2}{11\sqrt{11}} 0,021^2 + \frac{1+0,05 \cdot 13^2}{13\sqrt{13}} 0,017^2 \right) =$$

$$= 8,8 \text{ кВт.}$$

Додаткові витрати електроенергії від несинусоїдальності для цього варіанта за рік

$$\Delta W_{TP1}^{нес} = \Delta P_{TP1}^{нес} T_{рНП} \cdot 365 = 8,8 \cdot 18 \cdot 365 = 57,8 \text{ МВт}\cdot\text{год.}$$

Додаткові витрати потужності та електроенергії у трансформаторі від несинусоїдальної напруги після встановлення ФКП

$$\Delta P_{TP2}^{нес} = 2,1 \text{ кВт}; \quad \Delta W_{TP2}^{нес} = 13,8 \text{ МВт}\cdot\text{год за рік.}$$

За формулою (5.46) фактичне завантаження трансформатора до та після приєднання ФКП

$$S_{\phi 1} = W_a / (T_3^\circ \cos \varphi_{cp1}) = 132 \cdot 10^3 / (24 \cdot 0,7) = 7857,1 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$S_{\phi 2} = W_a / (T_3^\circ \cos \varphi_{cp2}) = 132 \cdot 10^3 / (24 \cdot 0,9) = 6111,1 \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

де $T_3^\circ = 24$ год – загальний час роботи трансформатора за добу.

За формулою (5.45) основні (режимні) втрати активної електроенергії у трансформаторі до встановлення ФКП за рік

$$\Delta W_{TP1}^{реж} = \Delta P'_{xx} T_3^p + K_{31}^2 \Delta P'_{кз} T_3^p = 18 \cdot 8760 + 0,786^2 \cdot 124 \cdot 6570 = 661,0 \text{ МВт}\cdot\text{год},$$

де $\Delta P'_{xx} = \Delta P_{xx} + K_e \Delta Q_{xx} = 12 + 0,08 \cdot 75 = 18$ кВт; $K_e = 0,08$ згідно з табл. 5.2; $\Delta Q_{xx} = S_{ном} I_{xx} / 100 = 10000 \cdot 0,75 / 100 = 75$ квар; $K_{31} = S_{\phi 1} / S_{ном} = 7857,1 / 10000 =$

0,786; $\Delta P'_{кз} = \Delta P_{кз} + K_e \Delta Q_{кз} = 60 + 0,08 \cdot 800 = 124$ кВт; $\Delta Q_{кз} = S_{ном} u_{кз} / 100 = 10000 \cdot 8 / 100 = 800$ квар; $T_3^p = 8760$ год; $T_p^p = T_{рНП} \cdot 365 = 18 \cdot 365 = 6570$ год.

Аналогічно $\Delta W_{TP2}^{реж} = 461,8$ МВт·год за рік.

Загальні втрати електроенергії у силовому трансформаторі до та після встановлення ФКП

$$\Delta W_{TP1} = \Delta W_{TP1}^{реж} + \Delta W_{TP1}^{нес} = 661,0 + 57,8 = 718,8 \text{ МВт·год за рік};$$

$$\Delta W_{TP2} = \Delta W_{TP2}^{реж} + \Delta W_{TP2}^{нес} = 461,8 + 13,8 = 475,6 \text{ МВт·год за рік}.$$

Зниження рівня загальних втрат електроенергії у трансформаторі

$$\Delta W_{TP\Sigma} = 718,8 - 475,6 = 243,2 \text{ МВт·год за рік}.$$

Повний струм навантаження, що протікає по кабельній лінії:

$$I_{н1} = S_{\phi 1} / (\sqrt{3} U_n) = 7857,1 / (\sqrt{3} \cdot 6) = 756,9 \text{ А}; \quad I_{н2} = 588,7 \text{ А}.$$

Діюче значення 5-ї гармонійної складової струму до встановлення ФКП

$$I_5 = \frac{K_{I(5)}}{100} \cdot I_{н1} = \frac{8,7}{100} \cdot 756,9 = 65,8 \text{ А}.$$

Аналогічно знаходимо: $I_7 = 51,5$ А; $I_{11} = 31,8$ А; $I_{13} = 25,7$ А.

За формулою (6.3) додаткові втрати потужності від несинусоїдальності у кабельній лінії до встановлення ФКП

$$\begin{aligned} \Delta P_{КЛ1}^{нес} &= 3r_l \sum_{n=2}^m I_n^2 \sqrt{n} = 3r_{0к} l_k (I_5^2 \sqrt{5} + I_7^2 \sqrt{7} + I_{11}^2 \sqrt{11} + I_{13}^2 \sqrt{13}) = \\ &= 3 \cdot 0,07 \cdot 0,2 (65,8^2 \sqrt{5} + 51,5^2 \sqrt{7} + 31,8^2 \sqrt{11} + 25,7^2 \sqrt{13}) = 0,94 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Додаткові витрати електроенергії від несинусоїдальності для цього варіанта за рік

$$\Delta W_{КЛ1}^{нес} = \Delta P_{КЛ1}^{нес} T_{рНП} \cdot 365 = 0,94 \cdot 18 \cdot 365 = 6,2 \text{ МВт·год}.$$

Додаткові витрати електроенергії у кабельній лінії від несинусоїдальної напруги після встановлення ФКП (з урахуванням діючих значень струмів гармонік $I_5 = 8,2$ А, $I_7 = 14,7$ А, $I_{11} = 22,9$ А, $I_{13} = 17,1$ А)

$$\Delta P_{КЛ2}^{нес} = 0,15 \text{ кВт}; \quad \Delta W_{КЛ2}^{нес} \approx 1,0 \text{ МВт·год за рік}.$$

За залежностями (5.36) і (5.37) основні (режимні) втрати потужності та електроенергії у кабельній лінії за рік

$$\Delta P_{КЛ1}^{реж} = 3I_{н1}^2 r_{0к} l_k \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 756,9^2 \cdot 0,07 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 24,1 \text{ кВт};$$

$$\Delta W_{КЛ1}^{реж} = \Delta P_{КЛ1}^{реж} \tau_1 = 24,1 \cdot 3950 = 95,2 \text{ МВт·год},$$

де $\tau_1 = 3950$ год – тривалість максимальних втрат потужності (згідно з рис. 1.4 при $T_m = 5000$ год і $\cos \phi_{cp1} = 0,7$).

Аналогічно знаходимо $\Delta P_{КЛ2}^{реж} = 14,5$ кВт; $\Delta W_{КЛ2}^{реж} = 48,6$ МВт·год за рік.

Загальні втрати електроенергії у кабельній лінії до та після встановлення фільтрокомпенсувального пристрою

$$\Delta W_{КЛ1} = \Delta W_{КЛ1}^{реж} + \Delta W_{КЛ1}^{нес} = 95,2 + 6,2 = 101,4 \text{ МВт·год за рік};$$

$$\Delta W_{KЛ2} = \Delta W_{KЛ2}^{реж} + \Delta W_{KЛ2}^{нес} = 48,6 + 1,0 = 49,6 \text{ МВт}\cdot\text{год за рік.}$$

Зниження рівня загальних втрат електроенергії у кабельній лінії

$$\Delta W_{KЛ\Sigma} = 101,4 - 49,6 = 51,8 \text{ МВт}\cdot\text{год за рік.}$$

Сумарне річне зниження величини витрати електроенергії у результаті встановлення ФКП 5-ї гармоніки

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{TP\Sigma} + \Delta W_{KЛ\Sigma} = 243,2 + 51,8 = 295,0 \text{ МВт}\cdot\text{год за рік.}$$

Виконаний розрахунок підтверджує ефективність застосування регульованого ФКП для зменшення перетоків реактивної потужності та зниження несинусоїдальності живильних напруги та струму. Крім того бачимо, що рівень втрат електроенергії у елементах СЕП від низького значення коефіцієнта потужності набагато (на порядок) вище за аналогічний показник для несинусоїдальних режимів.

Контрольні питання

1. Наведіть переваги та недоліки напівпровідникових перетворювачів електроенергії.
2. Назвіть відомі Вам перетворювачі електроенергії та галузь їх застосування.
3. Які переваги мають перетворювачі частоти з ланкою постійного струму порівняно з іншими системами?
4. Як утворюються додаткові втрати електроенергії від струмів вищих гармонік та в яких електричних пристроях це спостерігається?
5. Чому існує проблема компенсації реактивної електроенергії при застосуванні перетворювачів?
6. Наведіть шляхи вирішення проблеми компенсації реактивної електроенергії у мережах з перетворювачами.
7. Які фільтрокомпенсуювальні пристрої Вам відомі та для чого вони застосовуються?
8. Назвіть основні складові втрат електроенергії при використанні перетворювачів. Частина якої складової більша?
9. Номера яких вищих гармонік відносяться до канонічного порядку?
10. Що таке інтергармоніки та в чому їх особливість?

Завдання до самостійної роботи

1. Досконально розглянути результати п'яти прикладів, наведених у розд. 6. Висловити свою думку з економічної точки зору зі зниження величини витрати електроенергії електроприводом та підвищення рівня її втрат у елементах системи електропостачання з урахуванням усіх недоліків. Добре виконаний аналіз допоможе сформулювати тему магістерської роботи.
2. Більш детально ознайомитися зі змістом літературних джерел, на які посилаються у розд. 6.

Тема реферату

Ознайомитися з літературними джерелами, присвяченими розрахунку показників якості електроенергії та їх впливу на рівень втрат електроенергії в елементах систем електропостачання та електропривода.

Компромiс iснує при застосуванні перетворювачiв електроенергiї у системах електропривода з метою удосконалення технологiчного процесу та енергоефективного споживання електроенергiї, однак при цьому генеруються вищi гармонiйнi складовi напруги та струму. Основнi негативнi наслiдки цього – додатковi втрати енергiї та скорочення термiну служби електроустаткування. Дуже важливим є значнi стрибки реактивної складової потужностi, якi негативно впливають на величину коефiцiєнта потужностi. Для компенсацiї вищих гармонiйних складових та отримання постiйного значення коефiцiєнта потужностi застосовують фiльтрокомпенсувальнi пристрої. Системи регульованого електропривода використовуються для удосконалення технологiчного процесу (в чому полягає технологiчна задача), а проблеми такого використання у виглядi негативного впливу на електричнi мережi та устаткування мають вирiшувати фахiвцi з електропостачання.