

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни

«Системи електропостачання»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого(бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

за темою № 4 – Якість електричної енергії

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Значення якості електричної енергії.
2. Вплив відхилень напруги на роботу приймачів електричної енергії.
3. Способи і засоби підвищення якості електроенергії.
4. Несиметрія напруг.
5. Несинусоїдальність форми кривої напруги і струму.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2012.
2. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч.посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.І. та ін. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.
5. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. –Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

Допоміжна література:

1. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2006. -153 с.
2. Рудницький В.Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2007. - 280 с.
3. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електропостачання>
2. <https://www.ukrnafta.com/sistema-elektropostachannya>
3. <https://www.pronet.ua/sistemi-elektropostachannya/>
4. <http://web.kpi.kharkov.ua/elmarsh/wp-content/uploads/sites/108/2017/04/Elektropostachannya-promislovih-pidpriyemstv.-Pidruchnik.Milih-V.I-Pavlenko-T.P.2016.pdf>
5. <https://avenston.com/solutions/mep-systems/power-supply-systems/>

Текст лекції

1. Значення якості електричної енергії

До якості електричної енергії пред'являються такі ж вимоги, що пред'являються до якості будь-якої промислової продукції. Електрична енергія як продукт істотно відрізняється від продукції інших галузей промисловості тим, що вона не складається. Однак від якості електричної енергії значною мірою залежать умови роботи її споживачів. Тому забезпечення необхідної якості електричної енергії має велике народногосподарське значення. Підвищення якості електричної енергії найчастіше пов'язано з додатковими витратами, тому що вимагає застосування додаткових технічних пристроїв.

Доцільно розрізняти наступні показники якості електричної енергії: гранично припустимі значення по технічним умовам, нормовані значення й оптимальні або економічно обґрунтовані значення. Ці значення можуть помітно розрізнятися і залежать від ряду місцевих умов. В основному, по технічним умовам допускаються гранично припустимі відхилення від номінальних значень. За умовами економічності часто доцільним виявляється їхнє зменшення.

Як правило, нормуватися можуть тільки значення, зумовлені технічними умовами. Оптимальні значення повинні визначатися в кожному конкретному випадку особливо, хоча деякі типові рішення не виключаються.

Раніше вважалося, що на промислових підприємствах у мережах трифазного струму напруги повинні складати практично симетричну систему і повинні змінюватися практично синусоїдально в часі (за час одного періоду основної частоти). У дійсності положення різко змінилося за останні 25-30 років у зв'язку з широким застосуванням приймачів електричної енергії, що мають несприятливими з погляду роботи системи електропостачання характеристиками. До таких приймачів відносяться: вентильні перетворювачі, установки однофазного і трифазного електрозварювання, потужні електротермічні установки, зокрема дугові плавильні печі, потужні газорозрядні лампи та ін. Вольтамперна характеристика таких пристроїв нелінійна. Це приводить до погіршення якості електричної енергії внаслідок значного порушення форми кривих струмів і напруг у системі електропостачання промислових підприємств.

В системах електропостачання ряду промислових підприємств сумарна частка участі електротермічних і вентильних навантажень може складати до 40 % і більше. Тому такі явища, як порушення симетрії напруг і синусоїдальності їхньої зміни в часі, приходиться вважати постійно діючими. Відповідно до нормативів вони повинні знаходитися в припустимих межах, у противному випадку необхідне проведення відповідних заходів щодо нормалізації положення.

Варто розрізняти показники якості електроенергії, зумовлені живильною електроенергетичною системою і приймачами електричної

енергії. Так, наприклад, відхилення частоти залежить від живильної системи; коливання частоти, несинусоїдальність форми кривої напруги, коливання напруги, несиметрія напруг, зсув нейтралі викликаються роботою окремих приймачів електричної енергії.

Не всі показники якості електричної енергії мають жорстко нормовані значення. Так, за значенням і тривалістю нормуються тільки відхилення частоти, інші – тільки за значенням. Відхилення і коливання напруги нормуються за швидкістю зміни напруги; для інших показників якості електричної енергії швидкість зміни не встановлюється.

Варто мати на увазі, що якщо порушення технічних умов може бути помічене за непрямыми проявами (перегрів елементів електроустаткування, підвищена пошкоджуваність, збільшення браку продукції і т.д.), то зниження техніко-економічних показників роботи систем електропостачання промислових підприємств, транспорту і побуту може залишатися непоміченим. Для його виявлення потрібен ретельний контроль, виконання розрахунків, зіставлення з іншими, аналогічними умовами і т.д. Якість електричної енергії можна поліпшити засобами живильної мережі або застосуванням відповідного додаткового устаткування на основі наявного досвіду проектних і експлуатаційних організацій.

2. Вплив відхилень напруги на роботу приймачів електричної енергії

В залежності від режиму навантаження промислового підприємства напруга на затискачах приймачів електроенергії не залишається постійною і може відрізнятись від номінального.

Зміни напруги можна поділити на відхилення і коливання. Відхилення напруги V – це різниця дійсного значення напруги U і його номінального значення для даної мережі $U_{ном}$, що виникає при порівняно повільній зміні режиму роботи, коли швидкість зміни напруги менше 1 % у секунду:

$$V = U - U_{ном}$$

Якщо V виражається у відсотках від номінальної напруги, а U і $U_{ном}$ – у вольтах або кіловольтах, то

$$V\% = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100$$

Припустимі значення відхилень напруги від номінального на затискачах різних приймачів електроенергії регламентуються державними стандартами, наприклад:

- на затискачах приладів робочого освітлення, встановлених у виробничих приміщеннях і суспільних будинках, де потрібна значна зорова напруга, а також у прожекторних установках зовнішнього освітлення допускаються відхилення напруги в межах від $-2,5$ до $+5$ % номінального;

- на затискачах електричних двигунів і апаратів для їхнього пуску і керування допускаються відхилення напруги в межах від -5 до $+10$ % номінального;

- на затискачах інших приймачів електричної енергії, у тому числі приймачів електричної енергії сільськогосподарського призначення, допускаються відхилення напруги в межах $\pm 5\%$ номінального;
- у післяаварійних режимах допускається додаткове зниження напруги на 5% .

Основними факторами, що визначають якість напруги в системах електропостачання, є: дотримання балансу реактивної потужності у вузлі навантажень, способи і режим регулювання напруги в центрі живлення, способи і засоби місцевого регулювання напруги, наявність однофазних навантажень і їхній розподіл по фазах, наявність ударних навантажень і заходу щодо зниження і локалізації їхнього впливу і т.д.

В умовах безперервного росту електричних навантажень на підприємствах, важливим фактором поліпшення якості напруги є підвищення рівня номінальної напруги розподільних мереж на ступіні внутрішнього електропостачання і вибір раціональних напруг для систем електропостачання при проектуванні.

Слід зазначити, що необхідність застосування тих або інших засобів регулювання напруги в системі електропостачання промислових підприємств є наслідком недосконалості самої системи. При відхиленнях напруги в приймачах електроенергії вище припустимих значень часто доцільніше не встановлювати засоби регулювання напруги, що збільшують капітальні витрати на мережу і втрати електроенергії, а перестроїти систему електропостачання, перейшовши до більш високих рівнів напруги розподільних мереж. Цей захід одночасно зменшить втрати електроенергії в елементах системи електропостачання і дозволить безперешкодно вводити в експлуатацію нові електричні навантаження при розширенні промислового підприємства.

В загальному випадку справедливе твердження, що кожен приймач електроенергії має найкращі техніко-економічні показники при визначеній оптимальній нарузі на його затискачах. Відхилення напруги від оптимального приводить до зміни техніко-економічних показників приймачів електричної енергії. При зміні напруги міняються також показники самої мережі в основному за рахунок зміни втрат потужності та енергії. Таким чином, відхилення напруги в окремих точках мережі впливають на всю систему електропостачання підприємства.

Розглянемо приклади впливу відхилень напруги в системі електропостачання на роботу окремих приймачів електричної енергії і на протікання технологічних процесів.

В даний час найбільш розповсюдженими приймачами електричної енергії в промисловості є асинхронні двигуни, що використовуються для привода найрізноманітніших механізмів. У табл. 1 приведені дані по впливу відхилень напруги в межах від -10 до $+10\%$ на характеристики асинхронних двигунів.

При зміні напруги мережі вбік від номінального активна потужність на валу асинхронного двигуна залишається практично постійною, змінюються втрати активної потужності в ньому, що може дати перевитрату або економію електричної енергії. Реактивна потужність електродвигуна при цьому істотно міняється. Для наближених розрахунків можна прийняти, що для електродвигунів єдиної серії А потужністю 20-100 кВт підвищення напруги на 1 % приводить до росту реактивної потужності на 3 %, а для електродвигунів меншої потужності – на 5-7 %.

Значний збиток промисловим підприємствам наносить скорочення терміну служби асинхронних двигунів, що працюють з великим навантаженням і зниженою напругою. Розрахунки показують, що найвигіднішим, з погляду збільшення терміну служби двигунів, є номінальна напруга або напруга вище номінальної.

Таблиця 1.

| Характеристики двигунів | Зміна характеристики при V | |
|--|------------------------------|---------------------|
| | - 10% | + 10% |
| <i>Пусковий і максимальний обертаючі моменти</i> | -19% | +21% |
| <i>Синхронна частота обертання</i> | Постійна | Постійна |
| <i>Ковзання</i> | +23% | -17% |
| <i>Частота обертання при номінальному навантаженні</i> | -1,5% | +1% |
| <i>ККД при навантаженні:</i> | | |
| <i>Номінальному</i> | | |
| 75% | -2% | +1% |
| 50% | -1÷-2% | +1÷+2% |
| <i>Коефіцієнт потужності при навантаженні: 100%</i> | +1% | -3% |
| 75% | +2÷+3% | -4% |
| 50% | +4÷+5% | -5÷-6% |
| <i>Струм ротора при номінальному навантаженні</i> | +14% | -11% |
| <i>Струм статора при номінальному навантаженні</i> | +10% | -7% |
| <i>Пусковий струм</i> | -10÷-12% | +10÷+12% |
| <i>Приріст температури обмотки при номінальному навантаженні</i> | +5÷+6% | Практично без зміни |

Частота обертання асинхронних двигунів міняється в залежності від підведеної напруги, що може істотно вплинути на продуктивність технологічного устаткування.

Значний вплив робить відхилення напруги на протікання електротермічних процесів. Мінусове відхилення напруги на затискачах неавтоматизованих електричних печей приводить до зниження їхньої потужності і зміни тривалості технологічного процесу. Вплив відхилення

напруги на роботу дугових печей залежить від вибору параметра регулювання:

- при підтримці постійними опорю дуги і її довжини, потужність печі знижується пропорційно квадратові напруги;
- при підтримці постійним струму дуги – пропорційно першого ступеня напруги;
- при підтримці постійної потужності печі відбувається збільшення втрат потужності в квадратичній залежності стосовно зниження напруги.

Відхилення напруги можуть погіршувати технологічний і енергетичний режим печей опорю та індукційних печей. В багатьох випадках при зниженні напруги на 8-10 % технологічний процес не можна довести до кінця. Відхилення напруги впливає і на електричне зварювання. Зниження напруги погіршує якість зварених швів. Час зварювання при зниженні напруги на 10 % подовжується приблизно на 20 % (для прогріву швів). Підвищення напруги приводить до збільшення реактивної потужності зварювального агрегату, причому на холостому ходу при підвищенні напруги з 200 до 220 В кожному відсотковій підвищення напруги відповідає підвищення реактивного навантаження приблизно на 5 %, в той час як при навантаженні це підвищення складає близько 2,5 %.

Відхилення напруги істотно впливає на роботу освітлювальних установок. Від підведеної напруги залежить світловий потік, освітленість, термін служби, споживана потужність і ККД освітлювальних установок. Так, наприклад, для ламп накаливання підвищення напруги тільки на 1 % більше номінального викликає збільшення споживаної потужності приблизно на 1,5 %, світлового потоку на 3,7 % і скорочення терміну служби ламп на 14 %. Збільшення напруги на 5 % приводить до скорочення терміну служби ламп накаливання в 2 рази.

Термін служби люмінесцентних ламп при підвищенні напруги на 10 % скорочується на 20-30 %. Зниження напруги нижче номінального збільшує термін служби ламп накаливання, зменшує потужність, споживану лампою. При цьому в лампі зменшується струм і світловий потік, що негативно впливає на освітленість. При зниженні напруги на 20 % і більш у газорозрядних ламп, у тому числі і люмінесцентних, запалювання стає практично неможливим.

3. Способи і засоби підвищення якості електроенергії

Як вказувалося раніше, необхідність проведення заходів щодо поліпшення якості електроенергії в електричних мережах є в більшості випадків свідченням невдалої побудови системи електропостачання. Підвищення напруги живильних мереж, як правило, поліпшує техніко-економічні показники системи електропостачання промислових підприємств, одночасно поліпшується і якість електроенергії у споживачів електроенергії.

Якщо перебудова системи електропостачання промислового підприємства неможлива, то для того, щоб відхилення напруги у приймачів

електричної енергії не перевищували меж, встановлених діючими нормативами, застосовуються різні способи і засоби регулювання напруги.

У загальному випадку для забезпечення необхідного режиму напруги у приймачів електричної енергії можуть використовуватися наступні способи: регулювання напруги на шинах центра живлення; зміна опору елементів мережі; зміна реактивного струму, що протікає в мережі; зміна коефіцієнта трансформації розподільчих трансформаторів і автотрансформаторів (лінійних регуляторів).

Застосування цих способів вимагає спеціальних технічних засобів. До основних засобів регулювання напруги в промислових електричних мережах варто віднести: трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН); лінійні регулятори; керовані батареї конденсаторів; синхронні двигуни, обладнані автоматичними регуляторами збудження. Крім того, можуть використовуватися і неавтоматизовані засоби, наприклад некеровані батареї конденсаторів, синхронні двигуни без автоматичного регулювання збудження.

Економічну ефективність застосування засобів регулювання напруги визначають, порівнюючи річні приведені витрати Z_p на регулюючий пристрій зі збитком Y від низької якості напруги:

$$Z_{p,y} = K_{p,y}(\kappa_{н,э} + \kappa_a) + C_{y,э} \Delta\mathcal{E} < Y,$$

де $K_{p,y}$ – капітальні вкладення в регулюючий пристрій даного типу;
 $C_{y,э}$ – вартість 1 квт*год електроенергії; $\Delta\mathcal{E}$ – втрати електроенергії в пристроях; $\kappa_{н,э}$ – нормативний коефіцієнт ефективності; κ_a – коефіцієнт відрахування на амортизацію, ремонт, обслуговування.

Размахи змін напруги є наслідком різкої зміни втрати напруги в елементах мережі, пов'язаного з виникненням додаткових ударних навантажень. Для зниження або усунення впливу ударних різкозмінних навантажень, створюваних потужними електропечами, великими двигунами і т.п., при проектуванні електропостачання необхідно передбачати наступні заходи:

а) виділення великих приймачів електричної енергії з різкозмінним поштовховим навантаженням і забезпечення їхнього живлення по самостійних лініях безпосередньо від джерела електроенергії (ГЗП, ТЕЦ та ін.);

б) обмеження струмів пуску і самозапуску двигунів;

в) застосування автоматичного регулювання збудження потужних синхронних двигунів, що працюють в режимі перезбудження для зменшення накидань реактивної потужності;

г) застосування (у вигляді виключення) паралельної роботи живильних ліній і трансформаторів на ГЗП з врахуванням викликуваного цим режимом збільшення струму КЗ;

д) застосування подовжньої компенсації;

е) виділення на окремі лінії або окремі трансформатори споживачів, що не допускають стрибків напруги, наприклад освітлення;

ж) приєднання ударних і спокійних навантажень на різні плечі здвоєних реакторів або різні обмотки трансформаторів з розщепленими обмотками.

4. Несиметрія напруг

Несиметрія напруг і струмів трифазної системи є одним з найважливіших показників якості електричної енергії. Причиною появи несиметрії напруг і струмів є різні несиметричні режими системи електропостачання. Широке застосування різного роду однофазних електротермічних установок значної потужності (до 10 000 кВт) і трифазних дугових печей також привело до значного збільшення частки несиметричних навантажень на промислових підприємствах.

В системах електропостачання розрізняють короточасні (аварійні) і тривалі (експлуатаційні) несиметричні режими. Короточасні несиметричні режими найчастіше пов'язані з різними аварійними процесами, як, наприклад, несиметричні КЗ, обриви одного або двох проводів повітряної лінії з замиканням на землю, відхилення або ушкодження ізоляції щодо землі однієї з фаз і т.п. Тривалі несиметричні режими часто зумовлені несиметрією елементів електричної мережі або підключенням до системи електропостачання несиметричних (одно-, дво- або трифазних) навантажень.

Несиметрія напруг і струмів, зумовлена несиметрією елементів електричної мережі, називається подовжньою. Прикладом подовжньої несиметрії є неповнофазні режими повітряних ліній і несиметрія параметрів фаз окремих елементів мережі. Подовжня несиметрія характерна також для спеціальних систем електропередач: два провoda – земля (ДПЗ), два провoda – рейка (ДПР), два провoda – труба (ДПТ) і т.д.

Для аналізу і розрахунків несиметричних режимів у трифазних колах в основному застосовується метод симетричних складових.

Метод симетричних складових заснований на представленні будь-якої трифазної несиметричної системи величин (струмів, напруг, магнітних потоків) у вигляді суми в загальному випадку трьох симетричних систем. Симетричні складові відрізняються порядком проходження фаз, тобто порядком, у якому фазні величини проходять через максимум і називаються системами прямої, зворотної і нульової послідовностей.

Несиметрія міжфазних напруг викликається наявністю складової зворотної послідовності, а несиметрія фазних – ще і наявністю складової нульової послідовності.

Як критерій несиметрії напруг використовується коефіцієнт несиметрії напруг $k_{нсм, U}$, що визначається процентним відношенням напруги зворотної послідовності основної частоти до номінальної лінійної напруги

$$k_{нсм, U} = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100, \%,$$

Коефіцієнт несиметрії струмів $\kappa_{нсм, I}$ визначається аналогічно

$$\kappa_{нсм, I} = \frac{I_2}{I_{ном}} \cdot 100.$$

При наявності складової нульової послідовності відбувається зсув нейтралі трифазної системи, що характеризується коефіцієнтом невідношеності напруг, зумовленим як процентне відношення напруги нульової послідовності до номінальної фазної напруги

$$\kappa_{0, U} = \frac{U_0}{U_{ном}} \cdot 100, \%$$

Симетричні складові напруг прямої \dot{U}_1 зворотної \dot{U}_2 і нульової \dot{U}_0 послідовностей визначаються за відомими співвідношеннями для симетричних складової прямої

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a\dot{U}_b + a^2\dot{U}_c),$$

зворотної

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c)$$

і нульової послідовностей

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c),$$

де $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$, – фазні напруги мережі;

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

– комплексне число, що називається фазним множителем;

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Коефіцієнт несиметрії $\kappa_{нсм, U}$ є нормованим показником якості електричної енергії. Відповідно до діючих стандартів $\kappa_{нсм, U} \leq 2\%$ довгостроково допустимо на затискачах будь-якого трифазного симетричного приймача електричної енергії. У випадках, коли коефіцієнт несиметрії виявляється більше зазначених меж, повинні бути прийняті заходи для його зниження.

Несиметрія напруг в системах електропостачання значно впливає на роботу окремих елементів мережі і приймачів електричної енергії.

Синхронні машини. При несиметрії струмів і напруг, зумовлених несиметричним навантаженням, у статорах синхронних генераторів проходять струми прямої, зворотної і нульової послідовностей. Струми прямої послідовності створюють магнітне поле, що обертається синхронно з

ротором, а зворотної послідовності – магнітне поле, що обертається з подвійною синхронною частотою в напрямку, зворотному напрямкові обертання ротора, в результаті чого магнітний потік, створюваний струмами зворотної послідовності, перетинає полюси ротора з подвійною частотою обертання і наводить в останніх ЕРС з частотою 100 Гц. Ця ЕРС зумовлює в обмотці збудження пульсуюче поле, яке можна розкласти на дві складові: поле, що обертається в напрямку обертання ротора і наводить в статорі ЕРС потрібної частоти, і поле, що обертається в напрямку, зворотному напрямку обертання ротора, і наводить у статорі ЕРС з частотою обертання основного поля зворотної послідовності, частково компенсуючи його. Електрорушійна сила потрібної частоти викликає в статорі струми прямої та зворотної послідовностей такої ж частоти. Магнітне поле струмів зворотної послідовності індукує у масивних металевих частинах ротора значні вихрові струми, що мають подвійну частоту і створюють додатковий пульсуючий з подвійною частотою електромагнітний момент. Вихрові струми викликають підвищене нагрівання ротора, а пульсуючий момент – вібрацію обертової частини машини. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною для конструкцій машини. Особливо небезпечна несиметрія напруги для потужних сучасних турбо- і гідрогенераторів, виконаних зі зниженим тепловим запасом.

Асинхронні двигуни. Особливо несприятливо несиметрія напруги позначається на роботі і терміну служби асинхронних двигунів. Опір асинхронних електродвигунів струмам зворотної послідовності в 5–7 разів менше опору струмам прямої послідовності. При наявності навіть невеликої за значенням складової напруги зворотної послідовності виникає значний струм зворотної послідовності. Цей струм накладається на струм прямої послідовності і викликає додаткове нагрівання ротора і статора, що приводить до швидкого старіння ізоляції і зменшенню потужності двигуна. Наприклад, при несиметрії напруг у 4 % термін служби цілком завантаженого асинхронного двигуна скорочується в 2 рази, а при несиметрії напруг, яка дорівнює 5 %, потужність двигунів зменшується на 5–10%, при несиметрії 10 % – на 20-25 % в залежності від виконання двигуна.

В асинхронних двигунах несиметрія напруг зумовлює протидіючий обертовий момент, що зменшує корисний момент. Зменшення корисного моменту за рахунок протидіючих стосовно моменту при симетричному навантаженні визначається виразом

$$\frac{M_2}{M_{\text{ном}}} = \frac{s}{(2-s)} \frac{Z_1^2 U_2^2}{Z_2^2 U_{\text{ном}}^2} = \frac{s}{(2-s)} \frac{Z_1^2}{Z_2^2} K_{\text{НСМ},U}^2,$$

де s – ковзання; $K_{\text{НСМ},U}$ – коефіцієнт несиметрії; Z_1 і Z_2 – повні опори двигуна відповідно струмам прямої і зворотної послідовностей.

Таким чином, зменшення обертового моменту залежить від квадрата коефіцієнта несиметрії напруг.

Конденсаторні установки. Підключення симетричної по ємності трифазної конденсаторної батареї до електричної мережі з несиметричною напругою може викликати ще більшу несиметрію. Крім того, при несиметрії напруг конденсаторні установки нерівномірно завантажуються реактивною потужністю по фазах, змінюється їх загальна реактивна потужність. Відношення реактивної потужності конденсаторної установки при несиметричній напрузі до реактивної потужності при симетричній напрузі в номінальному режимі визначається з виразу

$$\frac{Q_{\text{НСМ}}}{Q_{\text{НОМ}}} = \frac{U_2^2}{U_{\text{НОМ}}^2} (1 + \kappa_{\text{НСМ},U}).$$

Нормальна тривала експлуатація конденсаторної установки можлива за умови, що в жодній фазі, в тому числі й у найбільш завантаженій, потужність втрат не перевищує номінального значення. Ця умова унеможливує повне використання встановленої реактивної потужності. Її можна використовувати тільки до рівня розташовуваної потужності. Розташовувана потужність – це верхня межа реактивної потужності трифазної конденсаторної установки, що може бути корисно використана при несиметричній напрузі без зниження терміну служби конденсаторів найбільш завантаженої фази. Розташовувана потужність при несиметричній напрузі завжди менше номінальної

$$Q_{\text{расп}} = Q_{\text{НОМ}} U_2^2 (1 + \kappa_{\text{НСМ},U}) \frac{1}{U_{\text{н,з,ф}}^2},$$

де $U_{\text{н,з,ф}}$ – напруга найбільш завантаженої фази.

Багатофазні випрямлячі. Несиметрія напруг впливає на режим роботи багатофазних випрямлячів. Якщо при симетричній напрузі струми (наприклад, в мостовій схемі) однакові у всіх випрямлячах і мають однакову тривалість протікання, то при несиметричній напрузі вони можуть значно відрізнятись. В результаті припустима потужність випрямляча знижується, тому що частина випрямлячів виявляється недовантаженою.

Несиметрія напруг знижує також ефективність роботи трьох-, шести-, дванадцятифазних і інших схем випрямлення. При несиметрії напруг з'являються гармоніки (пульсації) подвійної частоти випрямленого за допомогою таких схем струму, амплітуда яких пропорційна коефіцієнтові несиметрії напруг. Ці гармоніки, резонуючи в не розрахованих на їхню появу згладжувальних фільтрах, перевантажують конденсатори і виводять їх з ладу. Наявність цих пульсацій у напрузі тягової мережі навіть при роботі згладжувальних фільтрів, негативно впливає на роботу зв'язку.

Трансформатори, кабельні і повітряні лінії. При розрахунку втрат активної потужності в кабельних і повітряних лініях $\Delta P_{\text{л2}}$ і трансформаторах $\Delta P_{\text{т2}}$ у несиметричних режимах полагають, що ці втрати визначаються тільки струмом зворотної послідовності I_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{\text{л}2} = 3I_2^2 r_{\text{л}2} \\ \Delta P_{T2} = 3I_2^2 r_{T2} \end{array} \right\}$$

Несиметрія напруг не робить помітного впливу на роботу кабельних і повітряних ліній, але за тих самих умов нагрівання трансформаторів і скорочення терміну їхньої служби можуть виявитися істотними.

Струми нульової послідовності постійно проходять через заземлювачі і негативно позначаються на їхній роботі, викликаючи висушування ґрунту і збільшення опору розтікання.

Заходи щодо зниження несиметрії напруг зводяться в основному до того, щоб коефіцієнт несиметрії напруг не перевищував припустимих меж. Основною причиною виникнення несиметрії напруг є наявність несиметричних однофазних електричних навантажень. Розглянемо основні методи і схеми симетрування однофазних навантажень.

Знизити несиметрію напруг у деяких випадках можна раціональним пофазним розподілом навантажень, однак це не завжди дозволяє забезпечити несиметрію напруг у припустимих межах. У таких випадках для зниження несиметрії застосовуються спеціальні симетрируючі пристрої.

Симетрування системи лінійних напруг трифазної мережі зводиться до компенсації струму зворотної послідовності, споживаного однофазними навантаженнями, і зумовленої ним напруги зворотної послідовності. Симетруючі пристрої виготовляються керованими і некерованими в залежності від характеру графіка навантаження. В даний час розроблено велика кількість схем симетруючих пристроїв як з електричними, так і з електромагнітними зв'язками між елементами.

Для симетруванн однофазних приймачів електричної енергії з практично постійним графіком навантаження і коефіцієнтом потужності, близьким до 1,0 (дугові печі, печі опору), застосовується схема Штейнметца (рис. 1). Необхідна потужність конденсаторної батареї С и дроселя L визначається з умови

$$Q_C = Q_L = \frac{P_o}{\sqrt{3}},$$

де P_o – активна потужність однофазного навантаження.

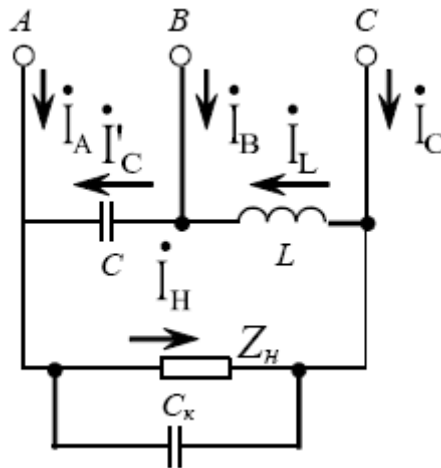


Рисунок - 1. Схема симетрування однофазного навантаження Штейнметца

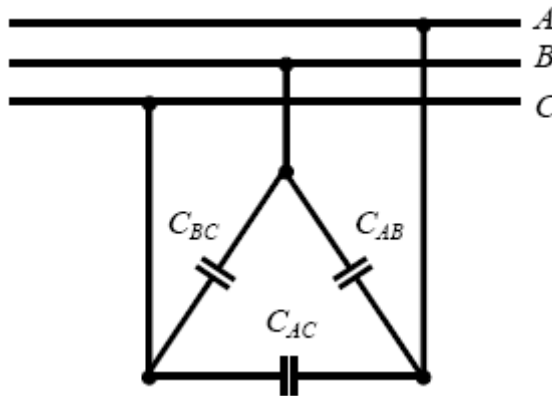


Рисунок - 2. Схема симетрування несиметричного трифазного навантаження за допомогою несиметричної конденсаторної батареї

Компенсація струму зворотної послідовності здійснюється за допомогою конденсаторної батареї C і дроселя L . Варто мати на увазі, що ця схема найбільш ефективна при симетруванні чисто активного навантаження. Керовані симетруючі пристрої відрізняються від некерованих тим, що потужність конденсаторної батареї і дроселя регулюється відключенням частини секцій паралельно включених конденсаторів і переключенням відпайок дроселя або відключенням окремих дроселів.

Симетрування дво- і трифазових несиметричних навантажень з низьким коефіцієнтом потужності можна здійснити за допомогою трифазної несиметричної батареї конденсаторів (рис. 2). У загальному випадку потужності конденсаторів у кожній фазі можуть бути не рівними

$$Q_{C,AB} \neq Q_{C,BC} \neq Q_{C,CA}.$$

Трифазні симетричні конденсаторні батареї компенсують тільки реактивну складову струму і не впливають на активну складову.

5. Несинусоїдальність форми кривої напруги і струму

Широке впровадження приймачів електричної енергії з нелінійними вольт-амперними характеристиками, приводить до погіршення якості електричної енергії (зокрема до появи вищих гармонік) і тим самим до появи народногосподарського збитку. До елементів систем електропостачання з нелінійними вольт-амперними характеристиками відносяться вентиляльні і частотні перетворювачі, установки електрозварювання, електродугові печі, газорозрядні джерела світла, а також силові трансформатори і двигуни. Характерною рисою цих пристроїв є споживання ними з мережі несинусоїдальних струмів при підведенні до їхніх затискачів синусоїдальної напруги.

Як приклад на рис. 3 приведена крива струму однієї з фаз трифазного вентиляльного перетворювача. Несинусоїдальні криві струмів можна розглядати як складні гармонійні коливання, що складаються із сукупності простих гармонійних коливань різних частот. Струми вищих гармонік, проходячи по елементах мережі, викликають спадання напруги в опорах цих елементів, і накладаючись на основну синусоїду напруги, приводять до перекошування форми кривій напруги (крива U_a , рис. 3). Ступінь несинусоїдальності напруги мережі прийнято характеризувати коефіцієнтом несинусоїдальності напруги, що являє собою відношення діючого значення гармонійного змісту несинусоїдальної напруги до напруги основної частоти, %:

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100,$$

де U_v , U_1 – діючі значення відповідно v -ї і 1-ї гармонік напруги.

Розрахунок коефіцієнта несинусоїдальності виконується за формулою

$$K_{нс} = X_{c*} \sqrt{\frac{\frac{3}{\pi} \frac{\sin \varphi}{X_{c*} + X_{np*}} - \frac{9}{\pi^2}}{1 - \frac{6}{\pi} X_{c*} \sin \varphi + \frac{9}{\pi^2} X_{c*}^2}},$$

де $X_{c*} = S_{np} / S_k$ – еквівалентний індуктивний опір живильної системи від умовного джерела нескінченної потужності до досліджуваної точки мережі; S_{np} – повна потужність, споживана перетворювачем; S_k – потужність КЗ в досліджуваній точці мережі;

$$X_{np*} = \frac{u_k}{100} \frac{S_{np}}{S_{np,T}}, \quad U_k, \quad S_{np,m} \quad - \quad \text{відповідно індуктивний опір,}$$

напруга короткого замикання і номінальна потужність перетворювального трансформатора.

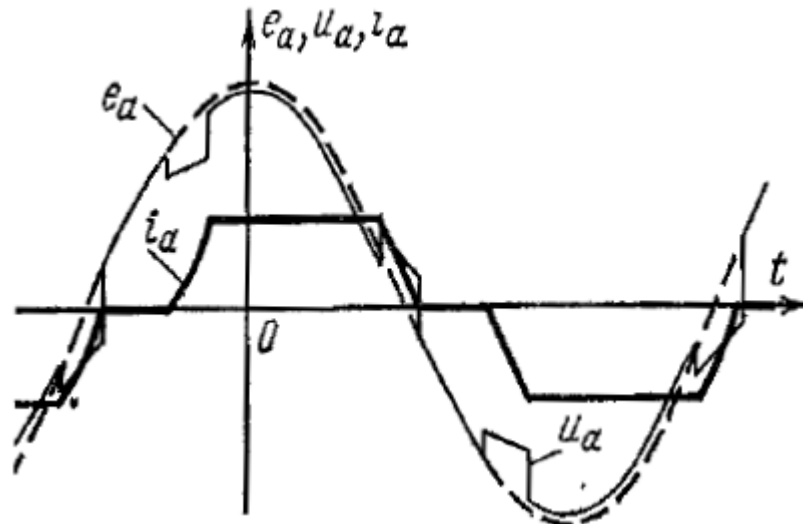


Рисунок - 3. Криві ЕРС джерела живлення (e_a), напруги на затискачах трифазного вентильного перетворювача (u_a), та струму однієї з його фаз (i_a)

Основним джерелом вищих гармонік в системах електропостачання промислових підприємств є напівпровідникові перетворювачі частоти. Істотний вплив на несинусоїдальність напруги мережі можуть робити й установки електрозварювання, електродугові печі і газорозрядні джерела світла. Силкові трансформатори і двигуни працюють найчастіше в умовах щодо незначного насичення стали. Тому створювані ними струми вищих гармонік невеликі і при розрахунках нормальних режимів, як правило, не враховуються.

Дугові електропечі одержали широке поширення на сучасних металургійних і машинобудівних підприємствах. Нелінійність вольтамперної характеристики дуги приводить до генерації печами струмів вищих гармонік. Форми кривих струму печей у великому ступені залежать від режиму горіння дуги в різні періоди плавки. У початковий період розплавлювання струм печі коливається між струмами режимів холостого ходу і металевих короткого замикання. Ці сильні і нерегулярні коливання навантаження носять випадковий характер. Форма кривих струмів в цей період значно відрізняється від синусоїдальної. З появою рідкого металу плавку ведуть при короткій дузі, коливання струму стають менше. Форма кривих струмів поліпшується і наближається до синусоїдального.

Відносні значення амплітуд вищих гармонік порядків $\nu = 6k \pm 1$ ($\nu = 1, 2, 3, 4, \dots$) можуть бути приблизно визначені за формулою

$$I_{\nu*} = \frac{I_{\nu}}{I_1} = \frac{\kappa_{\partial}}{\nu^2}.$$

Коефіцієнт κ_{∂} залежить від відношення амплітуди проти ЕРС дуги E_d до ЕРС живильної енергосистеми E_t і співвідношення між індуктивним x_k і активним r_k опорами в колі дуги, значення яких визначаються опорами пічного трансформатора, короткої мережі і живильної енергосистеми. У початковий період плавки κ_{∂} дорівнює $0,3 \div 0,4$, при завершенні плавки – $0,05 \div 0,10$.

В струмах електродугових печей поряд з 5, 7, 11 і 13-ї гармоніками утримуються також 2, 3, 4 і 6-а гармоніки. Ці гармоніки за аналогією з відповідними гармоніками вентильних перетворювачів називають аномальними. Основними причинами появи аномальних гармонік є безперервна зміна умов горіння дуг печі і неповне вирівнювання опорів короткої мережі. Значення аномальних гармонік струму близькі до значень 5-ї і 7-ї гармонік. Еквівалентне діюче значення струмів вищих гармонік у струмі печі за рахунок аномальних гармонік зростає в 1,8-2 рази.

При проходженні струмів вищих гармонік по елементах системи електропостачання виникають додаткові втрати активної потужності через несинусоїдальності, що в елементі системи електропостачання можуть бути обчислені за формулою

$$\Delta P_{nc} = 3 \sum_{\nu=3}^n I_{\nu}^2 R_{\nu},$$

де I_{ν} – струм ν -ї гармоніки; R_{ν} – активний опір елемента струму ν -ї гармоніки.

Додаткові втрати електроенергії, зумовлені вищими гармоніками, визначаються за формулою

$$\Delta \mathcal{E}_{nc} = 3 T_p \sum_{\nu=3}^n \kappa_{np,\nu} I_{c,\nu}^2 R_{\nu},$$

де T_p – число робочих годин елемента системи електропостачання за обліковий період;

$\kappa_{np,\nu} = \frac{\pi}{2\sqrt{2\nu}}$ – коефіцієнт приведення графіка ν -ї гармоніки до графіка 1-ї гармоніки з періодом 2π ; $I_{c,\nu}$ – середнє значення струму ν -ї гармоніки; n – порядок гармоніки, що враховується (останньої).

При наявності гармонік у кривій напруги процес старіння ізоляції протікає більш інтенсивно, чим у випадку роботи електроустаткування при синусоїдальній напрузі. Вищі гармоніки струму і напруги впливають на

погрішності електровимірювальних приладів. У практиці експлуатації істотне значення має збільшення погрішностей індукційних лічильників активної і реактивної енергії. Наявність вищих гармонік ускладнює та у ряді випадків унеможлиблює використання силових кіл як канали зв'язку для передачі інформації. Спостерігалися також випадки помилкової роботи пристроїв релейного захисту, у якій використовувалися фільтри струмів зворотної послідовності.

Вплив вищих гармонік на роботу релейного захисту виявляється, як правило, при рівні гармонік у струмі навантаження порядку 5-7 %.

Найбільш відчутний вплив вищі гармоніки роблять на роботу батарей конденсаторів. Практика роботи вітчизняних і закордонних промислових підприємств свідчить про те, що батареї конденсаторів, що працюють при несинусоїдальній напрузі, у ряді випадків швидко виходять з ладу в результаті вздуття і вибухів. Причиною руйнування конденсаторів є перевантаження їх струмами вищих гармонік, що виникає, як правило, при виникненні в мережі резонансного режиму на частоті однієї з гармонік.

З огляду на негативний вплив вищих гармонік на роботу електроустаткування, нормативними документами обмежується рівень несинусоїдальності форми кривої напруги. Як показник, що характеризує несинусоїдальність форми кривої напруги, прийняте еквівалентне діюче значення вищих гармонік напруги, що не повинна перевищувати 5 % діючої напруги основної частоти на затискачах будь-якого приймача електроенергії.

Експериментальні дослідження показали, що в системах електропостачання промислових підприємств, що мають потужні вентильні і тиристорні перетворювачі, несинусоїдальність напруги, як правило, перевищує нормовані межі, досягаючи в ряді випадків 20 %

($K_{нс} = 20 \%$).

Розглянемо найбільш розповсюджені методи зменшення несинусоїдальності форми кривої напруги.

1. Збільшення числа фаз випрямлення.

Спектральний склад струмів вентильних агрегатів визначається числом фаз випрямлення p . Зі збільшенням p форма первинного струму перетворювача наближається до синусоїдального, а кількість гармонік, що утримуються в струмі випрямителя і, отже, у напрузі мережі, зменшується. Так, наприклад, при 6-фазній схемі випрямлення ($p = 6$) у струмі вентильного агрегату утримуються 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25-я ... гармоніки, а при 12-фазній схемі ($p = 12$) – 11, 13, 23, 25-я ..., тобто перехід від 6-фазної до 12-фазної схеми випрямлення приводить до зникнення в напрузі мережі гармонік з номерами

$$\nu = 6 \cdot (2k - 1) \pm 1.$$

Розрахунки показують, що при цьому несинусоїдальність напруги мережі зменшується приблизно в 1,4 рази. Збільшення числа фаз

випрямлення є дійовим заходом зниження змісту вищих гармонік у кривих первинного струму перетворювачів і в напрузі мережі.

Фільтри вищих гармонік.

На рис. 4 представлена схема підключення фільтра до електричної мережі. Ланка фільтра являє собою контур з послідовно з'єднаною індуктивності і ємності, налагоджена на частоту визначеної гармоніки.

Ідеальний фільтр цілком споживає струм гармоніки I_v , генерируємий нелінійними елементами. Однак практично наявність активних опорів у реакторі і конденсаторі і неточному їхньому налаштуванні приводять до неповної фільтрації. Фільтр являє собою ряд ланок, кожне з яких налагоджене на резонанс для визначеної гармоніки. Кількість ланок у фільтрі на практиці, як правило, дорівнює 2-м або 4-м. Кожна ланка налагоджується на частоти 5, 7, 11, 13, 23 і 25-ї гармонік. Фільтри приєднуються як у місцях виникнення вищих гармонік, так і в пунктах їхнього посилення (резонанс струмів).

Фільтр вищих гармонік є одночасно і джерелом реактивної потужності і може служити в якості одного з засобів для компенсації реактивних навантажень. Параметри фільтрів найчастіше підбираються так, щоб їхні ланки були налагоджені в резонанс на частоти гармонік, неприпустимих в електричній системі, а значення їхній ємностей дозволили б компенсувати необхідну реактивну потужність основної частоти.

Поширенню фільтрів заважає також їхня велика чутливість до точності налаштування: ефективність фільтра зменшується і навіть може мати місце збільшення гармонік напруги на шинах підстанції.

На шинах нижчої напруги ГЗП (або шинах ГРП) і всіх підстанціях підприємства, що мають джерела вищих гармонік, рекомендується робити періодичний і епізодичний контроль рівнів вищих гармонік. Періодичний контроль повинен здійснюватися не менш 2 разів у рік для характерних експлуатаційних режимів системи електропостачання, а також для режимів, що відповідають максимальним навантаженням джерел вищих гармонік. Епізодичний контроль несинусоидальності напруги і рівнів окремих гармонік варто робити при підключенні нових приймачів електроенергії, що є джерелами вищих гармонік, і змінах в існуючій системі електропостачання, наприклад при підключенні батарей конденсаторів.

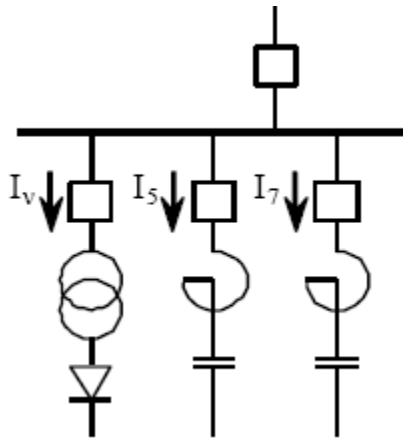


Рисунок - 4. Схема підключення фільтра вищих гармонік.

6. Відхилення і коливання частоти і їхній вплив на роботу приймачів електричної енергії.

Відхилення частоти – це різниця дійсного і номінального значень основної частоти:

$$\Delta f = f - f_{ном}, \quad \text{або} \quad \Delta f\% = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100.$$

У нормальному режимі роботи енергетичної системи допускаються відхилення частоти, усереднені за 10 хв, в межах $\pm 0,1$ Гц. Допускається тимчасова робота енергетичної системи з відхиленням частоти, усередненим за 10 хв, у межах $\pm 0,2$ Гц.

Коливання частоти – це зміни частоти, що відбуваються зі швидкістю 0,2 Гц в секунду.

Розмах коливань частоти – це різниця найбільшого і найменшого значень основної частоти за визначений проміжок часу:

$$\delta f = f_{нб} - f_{нм}, \quad \delta f\% = \frac{f_{нб} - f_{нм}}{f_{ном}} \cdot 100$$

Розмах коливань частоти не повинен перевищувати 0,2 Гц.

Настільки тверді вимоги зумовлені помітним впливом частоти на хід технологічних процесів виробництва. Стабілізація частоти стає все більш необхідною. Разом з тим можна відзначити, що на роботу ряду приймачів електричної енергії відхилення частоти відчутного впливу не роблять (освітлювальні прилади, електротермічні установки).

У сталому режимі частота у всій енергетичній системі (зв'язаної мережами змінного струму) однакова і визначається частотою обертання генераторів. Однак частота обертання генераторів визначається частотою обертання первинних двигунів – турбін, що мають спеціальний регулятор частоти обертання (первинне регулювання), що володіє порівняно великим статизмом (до 5 %). Це значить, що частота обертання турбін залежить від механічного навантаження на її валу і визначається витратою енергоносія (пари, води). Електричне навантаження генераторів, а отже, і механічне

навантаження турбін безупинно змінюється. Тому повинна змінюватися і частота обертання генераторів (турбогенераторів): при зростанні навантаження частота обертання (і частота мережі) знижується, а при зменшенні – зростає.

В даний час підтримка припустимого розмаху коливань частоти в енергетичних системах під час аварійного відключення джерел живлення забезпечується пристроями аварійного автоматичного частотного розвантаження (АЧР), що відключають частину менш відповідальних споживачів. Засобом підтримки частоти також є включення в роботу паралельно з енергосистемою електростанцій промислових підприємств.

Таким чином, у системі електропостачання промислового підприємства частота підтримується енергосистемою постійної й у межах норми. Значні відхилення і розмах коливань частоти можуть виникати на промислових підприємствах, що мають своє джерело живлення (електростанція і т.д.). У цьому випадку виникають істотні збитки через знижену частоту обертання приводних механізмів.

Контрольні питання

1. Показники якості електроенергії та їх нормування.
2. Вплив відхилення напруги на роботу електроприймачів.
3. Метод симетричних складових.
4. Коефіцієнти несиметрії напруг.
5. Вплив несиметрії напруг на роботу електроприймачів.
6. Які причини обумовлюють зміну відхилень напруги?
7. Які методи й засоби регулювання напруги застосовуються в мережах промислових підприємств?
8. Коли застосовують індивідуальне регулювання напруги?
9. Коефіцієнт несинусоїдальності напруги.
10. Вплив несинусоїдальності форми кривої напруги на роботу електроустаткування.
11. Відхилення і коливання частоти.