

**ОЦІНКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ
У СТАНІ ХОЛОДНОГО ПРОКАТУ**

2018

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	6
1 Нормування коливань напруги	7
2 Моделювання графіка електричних навантажень	12
3 Розрахунок коливань напруги.....	15
4 Зниження коливань напруги	23
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	29
ДОДАТОК А. Програма для побудови графіка електричних навантажень.....	30

АНОТАЦІЯ

У студентській науковій роботі під шифром «Коливання напруги» зазначено наступне:

Актуальність роботи обумовлена існуючими особливостями роботи споживачів цеху холодної прокатки металургійного підприємства. Характерною особливістю роботи споживачів цеху холодної прокатки є вплив їх на якість електроенергії мереж живлення.

Одним з основних питань, пов'язаних з підвищенням якості електроенергії в мережах, що вирішуються як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації систем промислового електропостачання, є питання про зниження коливань напруги від прокатного стану, що включає вибір доцільних джерел компенсації коливань напруги.

Метою роботи є оцінка методів, а також засобів зниження коливань напруги у стані холодного прокату металургійного підприємства.

Об'єктом дослідження є фізичні процеси, що виникають при виникненні коливань напруги, а предметом дослідження - методи і способи вимірювання та розрахунків показників, які їх характеризують, а також вплив коливань напруги на електрообладнання та заходи щодо їх зниження.

Методи дослідження. Для аналізу та вирішення поставленого питання було використано загальні методи теорії електротехніки та математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети було виконано наступні задачі:

- розглянуто особливості роботи споживачів цеху холодної прокатки, розглянуто питання нормування коливань напруги;
- розроблена програма для побудови графіка електричних навантажень;
- змодельовано графік електричних навантажень – активної та реактивної потужності;
- розраховано рівень коливань напруги;
- розраховано струми короткого замикання для визначення розмаху коливань напруги прямокутної форми;

- розглянуто методи і засоби зниження коливань напруги в умовах роботи цеху холодної прокатки металургійного підприємства.

Обсяг роботи складається з 30 сторінки, кількість рисунків - 11, використано наукових джерел - 11.

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, КОЛИВАННЯ НАПРУГИ, ФЛІКЕР, ГРАФІК ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕНЬ, РОЗМАХ ЗМІНИ НАПРУГИ.

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КН - коливання напруги;

ЯЕ - якість електроенергії;

ЕП - електроприймач;

ПЯЕ - показники якості електроенергії;

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика;

МЕК - міжнародна електротехнічна комісія;

ІФ - інтенсивність флікера;

КЗ - коротке замикання;

ДФ - доза флікера;

СЕП - система електропостачання;

ГДЗ - гранично допустиме значення;

СТК - статичний тиристорний компенсатор;

КРП - компенсація реактивної потужності;

РП - реактивна потужність;

АЕС - атомна електростанція;

ПУЕ - правила улаштування електроустановок;

ПТЕЕС - правила технічної експлуатації електроустановок споживачів;

ППР - планово-попереджувальний ремонт;

РЗ - радіоактивне забруднення;

НС - надзвичайна ситуація;

ГЗ - цивільний захист;

ЗРЗ - зона радіоактивного зараження;

РНО - радіаційно-небезпечний об'єкт.

ВСТУП

Електрична енергія як товар використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, володіє сукупністю специфічних властивостей і безпосередньо бере участь при створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. Поняття якості електроенергії (ЯЕ) відрізняється від поняття якості інших видів продукції. Кожен електроприймач (ЕП) призначений для роботи при певних номінальних параметрах електричної енергії, які характеризуються показниками якості електричної енергії.

Забезпечення вимог до ЯЕ на місць виробництва не гарантує їх наявність на місці споживання, так як на показники якості електричної енергії впливають технічні характеристики мережі та ЕП, а також режими експлуатації. Якість електроенергії характеризують також терміном «електромагнітна сумісність». Під електромагнітною сумісністю розуміють здатність ЕП нормально функціонувати в його електромагнітному середовищі (в електричній мережі, до якої він приєднаний), не створюючи неприпустимих електромагнітних завад для інших ЕП, що функціонують в тому ж середовищі.

Підвищення ЯЕ - актуальне завдання розвитку електроенергетики, спрямована на зниження втрат електроенергії, підвищення терміну служби електроустаткування, забезпечення умов нормального технологічного процесу споживачів електроенергії

При роботі електроприймачів з різкозмінним ударним навантаженням в електричній мережі виникають різкі поштовхи споживаної потужності. Це викликає зміни напруги мережі, розмахи яких можуть досягати великих значень. Такі явища викликаються технологічними установками з швидкозмінним режимом роботи, який супроводжується збільшенням активної і реактивної потужностей, такими як двигуни прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати і т.п.

1 Нормування коливань напруги

До коливань відносять швидкі зміни діючого значення напруги, що відбуваються зі швидкістю 1-2% в секунду і більше.

КН характеризуються двома показниками [1]:

- розмахом зміни напруги (δU_t), %;
- дозою флікера (P_{st} , PL_t).

Розмах зміни напруги - це величина, що дорівнює різниці значень U_i і U_{i+1} наступних один за одним екстремумів обвідної діючих значень напруги, визначених на кожному напівперіоді в процентах від номінальної напруги:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_n} \cdot 100, \quad (1)$$

де U_n – номінальну напругу мережі, кВ;

U_i , U_{i+1} – значення наступних один за іншим екстремумів відповідно до рис. 1.

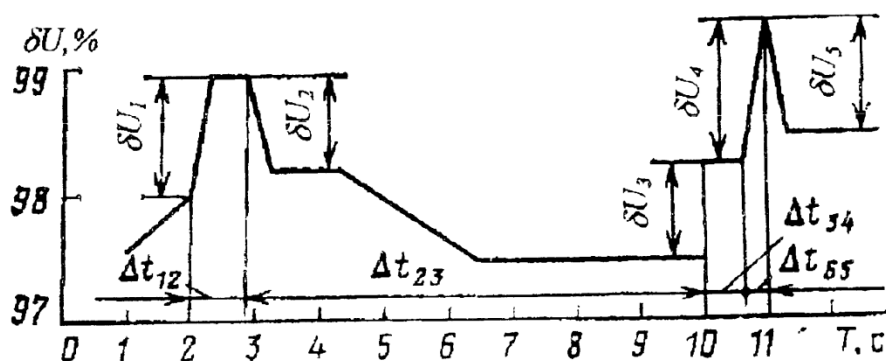


Рисунок 1 – Коливання напруги (п'ять розмахів змін напруги за 12 с)

Частота повторення змін напруги при числі їх m за час T (1 / с, 1 / хв) визначається за виразом:

$$f = \frac{m}{T}, \quad (2)$$

де m – число змін напруги за час T ;

T – інтервал часу вимірювання, що дорівнює 10 хв.

Оцінка допустимості розмахів зміни напруги здійснюється за допомогою кривої залежності допустимих розмахів коливань від частоти повторень змін напруги або інтервалу часу між подальшими змінами напруги (рис. 2).

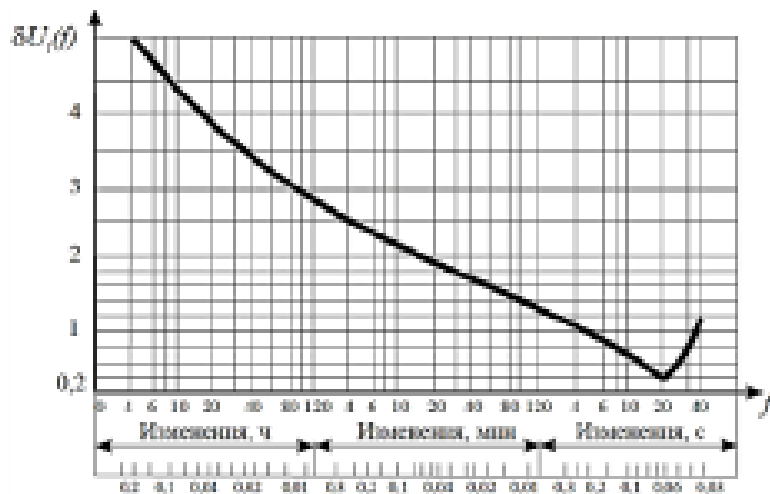


Рисунок 2 – Крива допустимих значень δU_t

Якість електроенергії в точці загального приєднання при періодичних КН, що мають форму меандру (прямокутну, рис. 3), вважають відповідним вимогам стандарту, якщо виміряне значення розмаху змін напруги не перевищує значень, що визначаються за кривою рис. 2.

Флікер - суб'єктивне сприйняття людиною коливань світлового потоку штучних джерел освітлення, викликаних коливаннями напруги в електричній мережі, що живить ці джерела [2]. Інтенсивність флікера напруги характеризує потужність КН з урахуванням характерних особливостей зорового і мозкового сприйняття людиною коливань світлового потоку ламп розжарювання, повністю подібних КН.

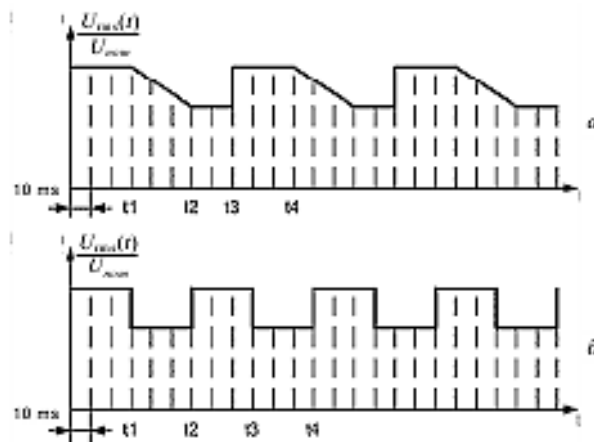


Рисунок 3 – Коливання напруги довільної форми (а)
і мають форму меандру (б)

Лампи розжарювання є найбільш масовими навантаженнями, чутливими до КН в більшій мірі, ніж телевізійні приймачі, комп'ютери, електронні та мікроелектронні пристрої управління. Інтенсивність флікера виражається в безрозмірних одиницях; ординати стандартної кривої допустимих значень КН $\delta U_t(f)$ (рис. 2) відповідають значенням інтенсивності флікера, визначеному протягом 10 хв. з ймовірністю 99 % $P_{St} = 1$.

Доза флікера - це міра сприйнятливості людини до впливу коливань світлового потоку, викликаних КН в мережі живлення, за встановлений проміжок часу, яка вимірюється стандартним флікерметром. Час сприйняття флікера - мінімальний час для суб'єктивного сприйняття людиною флікера, викликаного коливаннями напруги певної форми.

Стандартом [2] встановлюється короткочасна P_{St} і тривала доза флікера P_{Lt} (короткочасну визначають на інтервалі часу спостереження, що дорівнює 10 хв, тривалу на інтервалі - 2 г).

Вихідними даними для розрахунку є рівні флікера, вимірювані за допомогою флікерметра - приладу, в якому моделюється крива чутливості, тобто амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) органу зору людини [3].

Процес зорового сприйняття при КН моделюється на основі теорії проходження складного сигналу через нелінійну динамічну систему. На рис. 4 представлена АЧХ зорового аналізатора, прийнята міжнародної

електротехнічної комісією (МЕК). Верхня межа частоти КН, що впливають на зір, з урахуванням постійної часу ниток ламп розжарювання, становить приблизно 35 Гц при $\delta U t \leq 10\%$.

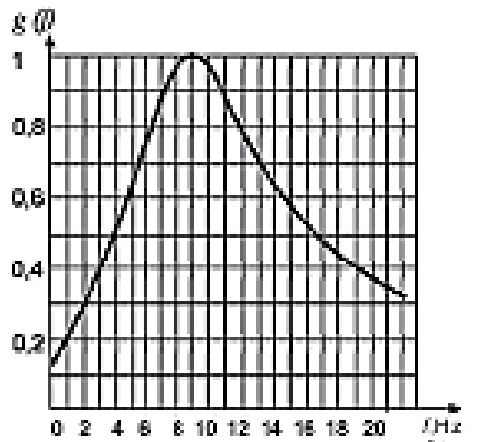


Рисунок 4 – Амплітудно-частотна характеристика зорового аналізатора

де: $g(f)$ - змінний коефіцієнт посилення інерційної адаптивної системи (очей), що залежить від частоти коливань f .

Дослідження, проведені в рамках МЕК, показали, що для оцінки P_{st} досить використовувати п'ять точок (рівнів): $P_{0,1}$ - рівень, який перевищувався протягом 0,1% часу спостереження; P_1 - рівень, який перевищувався протягом 1,0% часу спостереження; P_3 - рівень, який перевищувався протягом 3,0% часу спостереження; P_{10} - рівень, який перевищувався протягом 10% часу спостереження.

Вихідна точка P_{50} відповідає рівню інтенсивності флікера (ІФ), який перевищувався протягом половини часу спостереження, і тому характеризує середній рівень флікера.

У цьому випадку значення коефіцієнтів K_i :

$K_1 = 0,0314$ - для 0,1 % рівня;

$K_2 = 0,0525$ - для 1,0 % рівня;

$K_3 = 0,0657$ - для 3,0 % рівня;

$K_4 = 0,28$ - для 10,0 % рівня;

$K_5 = 0,08$ - для 50,0 % рівня.

Всі вибрані коефіцієнти позитивні, що забезпечує стійкість отриманих значень ІФ. Для прийнятого періоду спостереження (10 хв) ІФ визначається наступним чином:

$$P_{St} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,28 \cdot P_{50}}, \quad (3)$$

Запропонований 10-хвилинний інтервал може бути використаний для оцінки ІФ, що викликається прокатними станами, насосами, побутовим обладнанням. Якщо загальний ефект КН зумовлений низкою різкозмінних навантажень, що характеризуються випадковим характером роботи (зварювання, електродвигуни та ін.), Інтенсивність флікера P_{Lt} за розглянутий проміжок часу знаходять, виходячи з сукупності 10-хвилинних значень:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{stk}^3}, \quad (4)$$

где P_{stk} ($i = 1, 2, \dots, N$) — послідовні значення короткочасної дози флікера на k -му інтервалі часу T_s протягом тривалого періоду спостереження T_L [5].

Якість електроенергії по дозі флікера відповідає вимогам стандарту, якщо короткочасна і тривала дози флікера, визначені шляхом вимірювання протягом 24 год або розрахунку, не перевищують гранично допустимих значень: для короткочасної дози флікера - 1,38 і для тривалої - 1,0 (при КН з формою, що відрізняється від меандру). Ступінь впливу на роботу обладнання визначається амплітудою коливань і їх частотою. Коливання навантаження великої потужності такої як прокатні стани, викликають коливання моменту, активної і реактивної потужності генераторів місцевих електростанцій.

Коливання і провали напруги з глибиною понад 10% можуть призвести до згасання газорозрядних ламп, повторне запалювання яких в залежності від типу лампи може відбуватися тільки через значний проміжок часу.

При глибоких коливаннях і провалах напруги (понад 15%) можуть відпасти контакти магнітних пускачів, викликавши збої у виробництві.

На металургійних заводах КН більше 3% призводять до неузгодженості швидкостей роботи приводів клітей станів безперервної прокатки металу, що знижує якість (стабільність товщини) прокочується стрічки.

ГОСТ 13109-97 визначає вплив КН на освітлювальні установки, що впливають на зір людини. Миготіння ламп освітлення (флікер-ефект) викликає неприємний психологічний ефект, стомлення зору й організму в цілому. Ступінь роздратування органів зору залежить від величини і частоти миготіння. Найбільш сильний вплив на око людини надають миготіння світла з частотою 3 ... 10 Гц, тому допустимі коливання напруги в цьому діапазоні мінімальні: менше 0,5%. Причому, ступінь впливу залежить від типу джерела світла. Наприклад, при однакових КН лампи розжарювання надають значно більший вплив, ніж газорозрядні лампи.

2 Моделювання графіка електричних навантажень

Відповідно до поставленої задачі для дослідження КН необхідно створити модель графіка активної і реактивної навантаження цеху холоднокатаного листа.

У переважній більшості випадків графіки електричних навантажень промислових підприємств є випадкові процеси [4]. Електричні навантаження, як по активної, так і по реактивної потужності, як правило, підпорядковуються нормальному закону розподілу. Одним з головних чинників, що впливає на якість прогнозування будь-якого випадкового процесу, є його автокореляційна функція. Тип і параметри автокореляційних функцій електричних навантажень тісно пов'язані з характером технологічного процесу. Найбільш поширеними типами автокореляційних функцій для таких навантажень, як прокатні стани, дугові сталеплавильні печі (ДСП), металорізальні верстати є експоненціально-косинусна (1), для зварювання та інших навантажень - експоненціальна (2)

$$K(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \cos(\omega_0 \tau); \quad (5)$$

$$K(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|}, \quad (6)$$

де α – коефіцієнт загасання кореляційної функції;

D – дисперсія;

ω_0 – власна частота кореляційної функції.

Очевидно, що експоненціальна функція є окремим випадком експоненціально-косинусної при $\omega_0 = 0$, тому в подальшому зупинимося на розгляді тільки експоненціально-косинусної кореляційної функції. Методи експериментального визначення характеристик випадкових графіків навантаження описані в [5].

Для побудови графіка навантаження цеху холодної прокатки була розроблена програма моделювання графіка споживання потужності з нормальним законом розподілу і експоненціально-косинусної кореляційної функцією в програмному середовищі Matlab у відповідності з наступним алгоритмом.

Для моделювання випадкового процесу зміни навантаження була використана випадкова послідовність значень $X(i)$ з нормальним законом розподілу, що представляє собою білий шум, з нульовим математичним очікуванням і одиничним середньоквадратичним відхиленням. Для того щоб отримати випадковий процес з кореляційною функцією (1), математичним очікуванням M і середньоквадратичним відхиленням σ , кроком дискретизації Δt необхідно пропустити випадкову послідовність $X(i)$ через фільтр з наступними параметрами [6]:

$$P(i) = M + a_0 X(i) + a_1 X(i-1) + b_1 Q(i-1) + b_2 Q(i-2), \quad (7)$$

де

$$a_0 = \sigma b_0; \quad a_1 = \frac{\sigma c_0}{b_0}; \quad b_1 = 2e^{-\alpha \Delta t} \cos \omega_0 \Delta t; \quad b_2 = -e^{-2\alpha \Delta t};$$

$$b_0 = \sigma \sqrt{c_1 + \frac{\sqrt{(c_1^2 - 4c_0^2)}}{2}}; \quad c_0 = e^{-\alpha \Delta t} (e^{-2\alpha \Delta t} - 1) \cos \omega_0 \Delta t.$$

В результаті було отримано вектор значень P , що складається з 120 значень з дискретністю $\Delta t = 30$ сек, математичним очікуванням $M = 5500$ кВт і середньквдратическим відхиленням $\sigma = 916$ кВт. Результат моделювання графіка активного навантаження наведено на рис.5, а його кореляційна функція – на рис. 6.

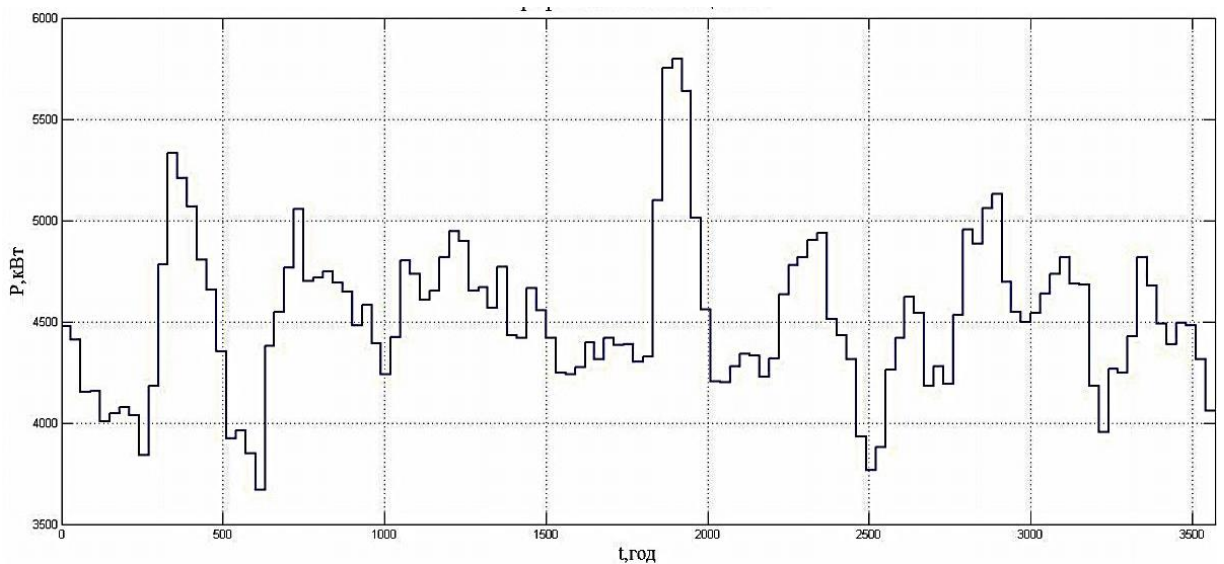


Рисунок 5 – Графік активного навантаження, отриманий в результаті моделювання

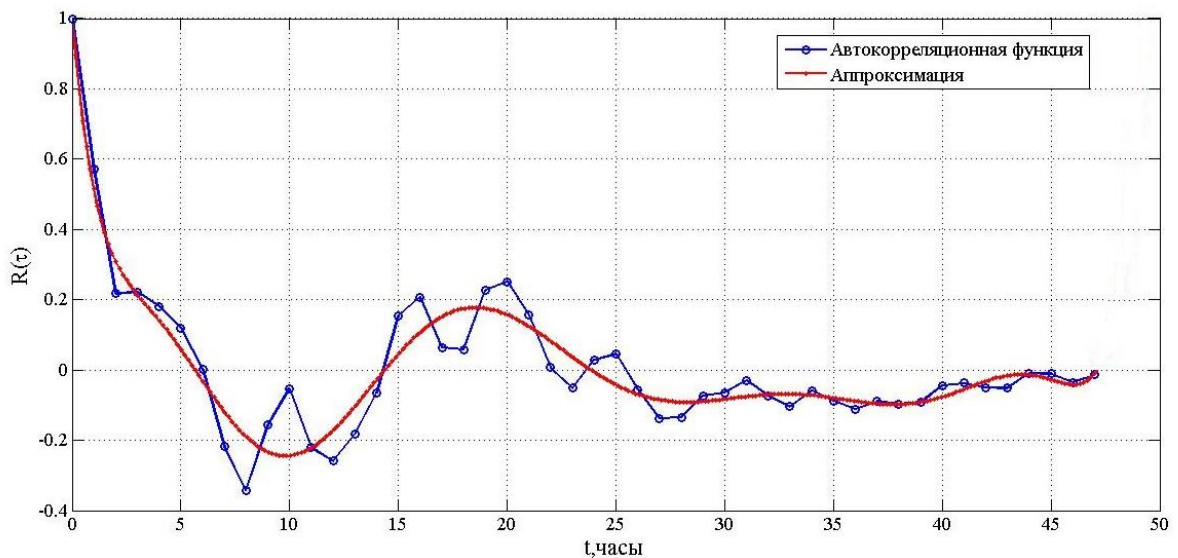


Рисунок 6 - Автокореляційна функція змодельованого графіка активного навантаження

Програма моделювання електричних навантажень MATLAB наведена в Додатку А.

Активна потужність прокатного стану становить 5500 кВт, коефіцієнт потужності,. Знаючи це, визначаємо значення реактивної потужності на кожному інтервалі часу. Графік реактивного навантаження представлений на рис. 7.

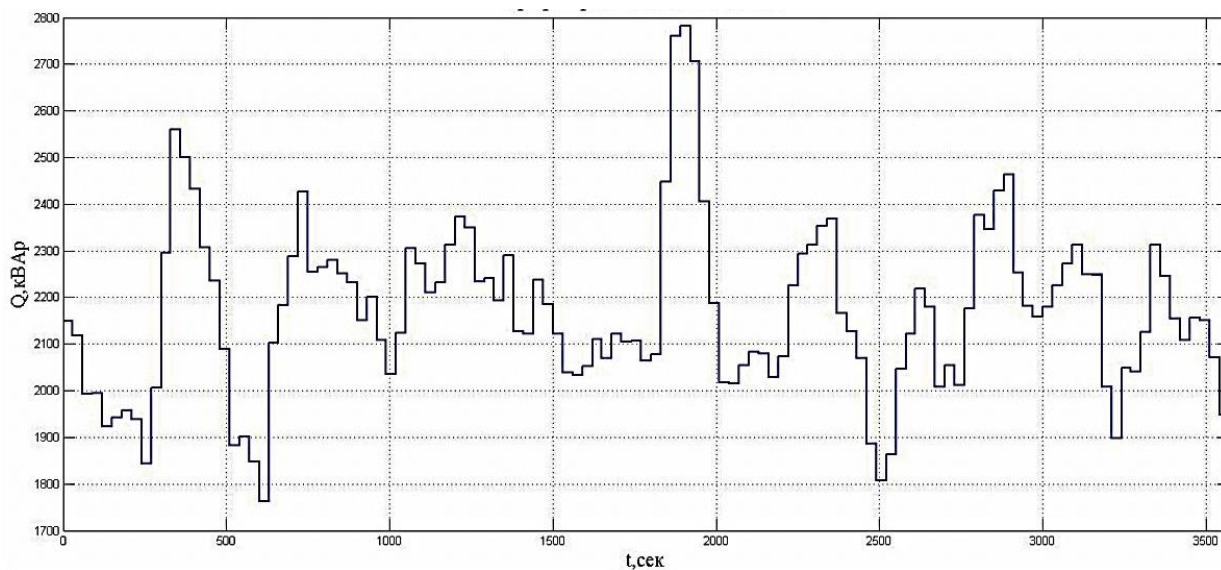


Рисунок 7 - Графік реактивного навантаження

3 Розрахунок коливань напруги

Для визначення значення дози флікера (ДФ) можуть бути використані два підходи:

- застосування флікерметра для безпосереднього вимірювання інтенсивності флікера;
- застосування розрахункових методів.

Другий підхід може бути використаний не тільки при проектуванні, а й в умовах експлуатації системи електропостачання (СЕП).

У разі періодичних КН синусоїдальної і трикутної форми в певних діапазонах частот можливе використання кривої допустимих значень амплітуд КН в залежності від частоти і коефіцієнтів приведення F_{Σ} до еквівалентним прямокутним коливань, для яких побудована крива допустимих значень. Наприклад, для наближеного еквівалентування синусоїдальних і прямокутних КН використовується коефіцієнт 1,27.

Спосіб визначення ДФ за допомогою кривої допустимих значень і аналізу Фур'є застосуємо також для аналізу інших періодичних КН. Інтенсивність флікера може визначатися досить просто для певного виду ізольованих або повторюваних КН.

Загальний підхід до розрахунку КН полягає у визначенні короткочасної дози флікера $-P_{St}$, спричиненої КН різної форми. Результируюча ДФ за час T визначається і розраховується як результат коливань ступінчастою форми P_{St} за допомогою коефіцієнта $F_{\text{э}}$, який називається коефіцієнтом еквівалентності:

$$P_{St} = F_{\text{э}} \cdot P_{Sts} , \quad (8)$$

Практично використовується один з двох методів, викладених нижче, а саме:

1. Метод визначення ДФ по кривій допустимих значень.

2. Аналітичний метод

Розглянемо ці методи.

1. Метод визначення ДФ по кривій допустимих значень.

Відповідно до цього методу інтенсивність флікера визначається за допомогою кривої (рис. 8). Якщо повторювані ступінчасті зміни d_0 відбуваються з частотою r_0 , то ДФ P_{St0} буде являти собою величину, відповідну ординате кривої інтенсивності флікера. Якщо при одній і тій же швидкості повторення розмах ступеневої зміни напруги дорівнює d_1 , то відповідне значення ДФ P_{St1} буде визначатися як

$$P_{St1} = \frac{d_1}{d_0} \cdot P_{St0} , \quad (9)$$

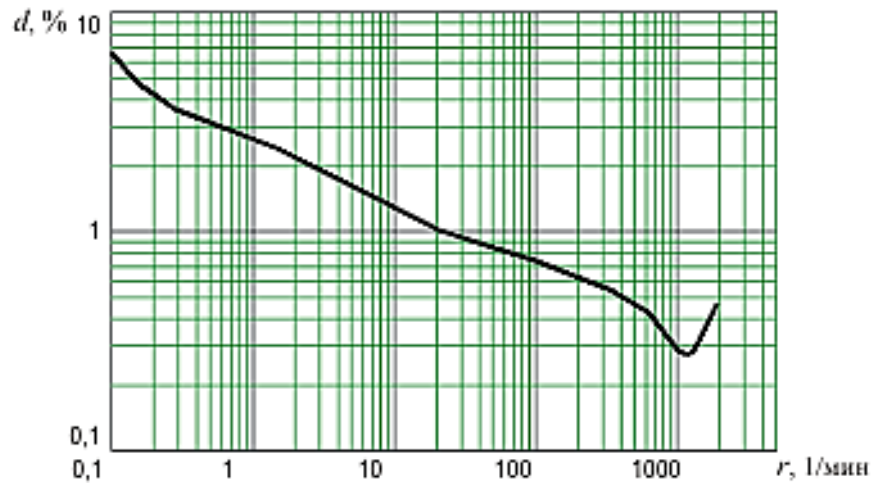


Рисунок 8 – Крива допустимих розмахів коливань напруги

2. Аналітичний метод застосовується, якщо мають місце повторювані обурення, з використанням залежності:

$$P_{St} = 0,365 \cdot d \cdot F_g \cdot r^{0.31} \cdot R, \quad (10)$$

де d – відносна величина зміни напруги, %;

r – частота зміни напруги, 1 / хв;

R – коефіцієнт, що залежить від частоти повторення (рис.9).

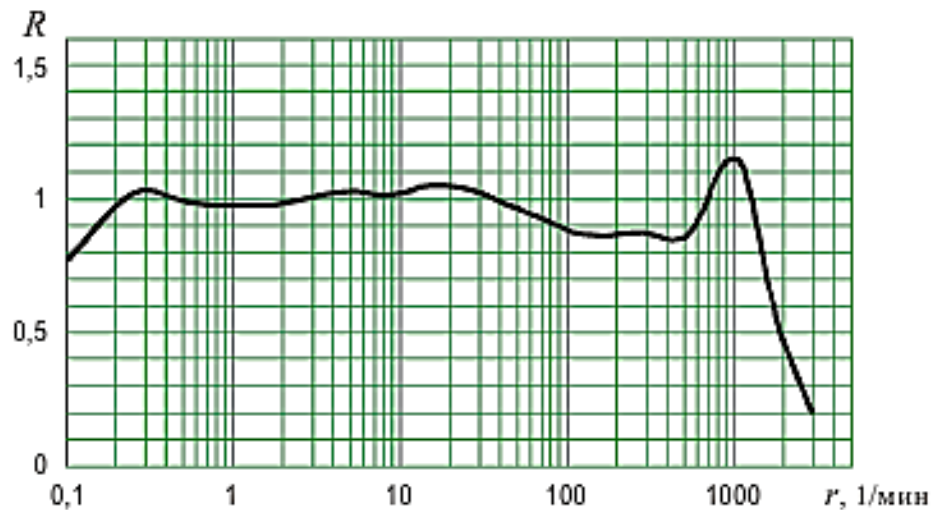


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта R від частоти зміни напруги

У загальному випадку (при коливаннях напруги прямокутної і похилій форми) може бути застосована інженерна методика розрахунку показників

коливань напруги. Ця методика може використовуватися для визначення короткочасної і тривалої доз флікера як для періодичних, так і неперіодичних коливань напруги згідно з наступним алгоритмом.

1. На інтервалі часу вимірювання (не менше 24 годин) виділяються тривалі інтервали спостереження $T_L = 2$ години, відповідні періодам найбільших коливань напруги за розмахом і кількістю змін.

2. Тривалі інтервали спостереження T_L розбивають на 12 короткочасних інтервалів $T_{sk} = 10$ хв.

3. На кожному короткочасному інтервалі T_{sk} визначаються розмахи δU_i і тривалості t_i коливань напруги.

4. Все розмахи коливань напруги приводяться до коливань, які мають форму меандру згідно виразу:

$$\delta U_{np.i} = \delta U_i \cdot F_{np.i}, \quad (11)$$

где $F_{np.i}$ - - коефіцієнт приведення відповідний кривої, наведеної на рисунку 10.

$$F_{np.i} = \frac{1}{(6,646 - 5,725 \cdot e^{-\Delta t_i})} \quad (12)$$

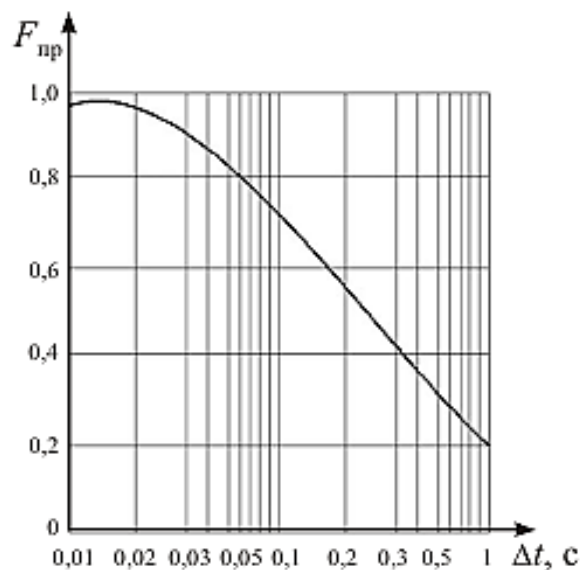


Рисунок 10 – Крива допустимих розмахів коливань напруги

5. Визначається час сприйняття флікера для кожного коливання напруги:

$$t_{\phi} = 2,3 \cdot (\delta U_{np.i})^{3,2} = \left(\frac{\delta U_i}{6,646 - 5,725 \cdot e^{-\Delta t_i}} \right)^{3,2}, \quad (13)$$

На кожному короткочасному інтервалі T_{sk} обчислюється короткочасна доза флікера:

$$P_{stk} = \sqrt[3,2]{\frac{2,3}{T_{sk}} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\delta U_i}{6,646 - 5,725 \cdot e^{-\Delta t_i}} \right)^{3,2}}, \quad (14)$$

де m – число коливань напруги на інтервалі T_{sk} .

7. На кожному тривалому інтервалі T_L обчислюється тривала доза флікера:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} P_{stk}^3}, \quad (15)$$

де P_{stk} - короткочасна доза флікера на k -му інтервалі T_{sk} всередині тривалого інтервалу T_L .

8. Короткочасні P_{St} і тривалі P_{Lt} дози флікера порівнюються з відповідними нормованими значеннями.

Розрахунок коливань напруги в СЕС прокатних станів може проводитися за спрощеною методикою. Похибка розрахунку за наведеним алгоритмом не перевищує 1,5% [9].

Для визначення потужності короткого замикання на шинах 10 кВ було виконано розрахунок струмів короткого замикання з наближеним приведенням у відносних одиницях. Потужність короткого замикання на шинах 10 кВ склала 226,7 МВА.

Розрахунок ведемо для першого коливання напруги, а для інших коливань розрахунок за запропонованим алгоритмом зводимо в таблицю 1.

1. Визначають розмах коливань напруги прямокутної форми:

$$\delta U_i = \frac{\Delta Q}{S_K} \cdot 100, \%; \quad (16)$$

де ΔQ = величина наброса реактивної потужності, кВар;

S_K = потужність короткого замикання на шинах 10 кВ, МВА.

Розмах коливань напруги на першому інтервалі за формулою (16):

$$\delta U_{t1} = \frac{24,66}{226,7} \cdot 100, \% = 10,88\%.$$

2. В залежності від тривалості інтервалу T (хв) розраховують еквівалентну частоту коливань як

$$r = \frac{1}{T}, \quad (17)$$

де T – тривалість інтервалу, хв.

Еквівалентна частота коливань при тривалості інтервалу $T = 1$, за формулою (17).

$$r = \frac{1}{0,5} = 2.$$

3. Відповідно до значення r будують залежність $d_0 = f(r)$, т. е. криву допустимого розмаху коливань рис.10.

Згідно кривої $d_0 = 7$.

4. Обчислюють інтенсивність короткочасного флікера відповідно до вираза

$$P_{st} = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n d_i^3}}{d_o} = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \delta U_i^3}}{d_o}, \quad (18)$$

За формулою (18)

$$P_{st} = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \delta U_i^3}}{d_o} = \frac{\sqrt[3]{10,88^3 + 10,36^3 + 10,53^3 + \dots + 8^3 + 8,52^3 + 8,56^3}}{7},$$

$$P_{st} = \frac{\sqrt[3]{107997,15^3}}{7} = \frac{47,6}{7} = 6,8.$$

Доза флікера перевищує нормоване значення в 5 разів.

Таблиця 1 - Результати розрахунку дози флікера

№	ΔQ_i , кВар	δU_i , %	№	ΔQ_i , кВар	δU_i , %
1	24660,02	10,88	44	22260,89	9,82
2	23481,37	10,36	45	22390,77	9,88
3	23878,9	10,53	46	22279,31	9,83
4	22372,37	9,87	47	20869,31	9,21
5	22149,11	9,77	48	21345,93	9,42
6	21741,88	9,59	49	21774,2	9,60
7	22264,18	9,82	50	21130,47	9,32
8	20323,91	8,97	51	22291,25	9,83
9	20439,39	9,02	52	20711,45	9,14
10	20742,59	9,15	53	20459,26	9,02
11	19285,22	8,51	54	20283,74	8,95
12	19427,15	8,57	55	19876,33	8,77
13	20320,32	8,96	56	19586,2	8,64
14	19500,76	8,60	57	20371,25	8,99
15	19633,53	8,66	58	19922,66	8,79
16	20224,58	8,92	59	20352,47	8,98
17	20146,11	8,89	60	20322,26	8,96
18	21915,29	9,67	61	20555,73	9,07
19	22798,66	10,06	62	22576,47	9,96
20	22350,72	9,86	63	22209,85	9,80

Продовження таблиці 1.

№	ΔQ_i , кВар	δU_i , %	№	ΔQ_i , кВар	δU_i , %
21	22675,97	10,00	64	23063,55	10,17
22	23626,85	10,42	65	23042,17	10,16
23	23664,22	10,44	66	22956,32	10,13

24	23905,09	10,54	67	21133,73	9,32
25	24146,49	10,65	68	22032,78	9,72
26	24400,6	10,76	69	22112,54	9,75
27	22773,27	10,05	70	21663,93	9,56
28	21837,67	9,63	71	21670,34	9,56
29	21302,67	9,40	72	21558,15	9,51
30	19775,27	8,72	73	23170,65	10,22
31	18629,12	8,22	74	22046,19	9,72
32	19236,75	8,49	75	21471,04	9,47
33	19890,71	8,77	76	21680,89	9,56
34	21037,86	9,28	77	23287,44	10,27
35	21604,05	9,53	78	23335,51	10,29
36	21101,43	9,31	79	24083,19	10,62
37	21279,23	9,39	80	24402,63	10,76
38	20815,74	9,18	81	24607,04	10,85
39	21779,36	9,61	82	25238,87	11,13
40	20561,35	9,07	83	26641,55	11,75
41	21523,79	9,49	84	25961,2	11,45
42	22089,34	9,74	85	24876,96	10,97
43	22821,96	10,07	86	24276,25	10,71
87	23305,45	10,28	104	24312,57	10,72
88	20688,87	9,13	105	23095,71	10,19
89	20315,07	8,96	106	25064,54	11,06
90	20349,78	8,98	107	24738,71	10,91
91	20017,32	8,83	108	23814,43	10,50
92	19930,65	8,79	109	21550,02	9,51
93	21202,39	9,35	110	20939,23	9,24
94	21389,63	9,44	111	22165,73	9,78
95	21463,31	9,47	112	21623,68	9,54

96	20972,01	9,25	113	21121,08	9,32
97	20617,97	9,09	114	19943,68	8,80
98	20713,58	9,14	115	19049,46	8,40
99	21021,63	9,27	116	18839,29	8,31
100	21540,4	9,50	117	19558,16	8,63
101	23101,41	10,19	118	18146,36	8,00
102	24241,05	10,69	119	19308,41	8,52
103	22956,82	10,13	120	19412,78	8,56

4 Зниження коливань напруги

Один з методів зниження коливання напруги - це поділ навантажень. Для поділу різкоперемінної і спокійною навантажень можуть використовуватися різні схеми і пристрої. Найбільш простою є схема, заснована на використанні зведеного реактора: спокійне та різкозмінне навантаження підключаються до різних секцій (обмоткам) реактора. Завдяки тому, що коефіцієнт взаємоіндукції між секціями $M \neq 0$, падіння напруги в кожній з них при токах навантаження i_1 та i_2 представляються виразом:

$$\Delta \dot{U} = jx_L (\dot{I}_1 - k_M \dot{I}_2) = jx_L (\dot{I}_2 - k_M \dot{I}_1), \text{В}, \quad (19)$$

де x_L – індуктивний опір секції реактора;

$k_M = M/L$ – коефіцієнт взаємоіндуктивної зв'язку; $k_M = 0,5 \div 0,6$.

В ідеальному випадку, коли $i_1 = i_2$:

$$\Delta U = I_{1(2)} x_L (1 - k_M), \text{В}. \quad (20)$$

Застосування описаної схеми для підключення потужних електродвигунів дозволяє в ряді випадків забезпечити на шинах «спокійною» навантаження коливання напруги, які не перевищують гранично-допустимі значення (ГДЗ).

Для різкозмінних і спокійних навантажень застосовуються також трансформатори з розщепленими обмотками. У разі підключення до однієї гілки обмотки низької напруги трансформатора спокійній навантаженню, а до іншої - різкоперемінній зв'язок між значеннями розмахів зміни напруги на відповідних шинах δU_{t2} й δU_{t3} можна представити у вигляді:

$$\delta U_{t2} = \delta U_{t3} \frac{4 - k_{\text{рщ}}}{4 + k_{\text{рщ}}}, \text{В} \quad (21)$$

де $k_{\text{рщ}}$ – коефіцієнт розщеплення, рівний 3,34–3,64

Поздовжня ємнісна компенсація параметрів лінії.

ПК полягає в послідовному включенні конденсаторів в розсечку лінії, завдяки чому її реактивний опір x_l та повний опір z_l зменшуються:

$$x_l = x_L - x_C < x_L, \text{Ом}. \quad (22)$$

Розглянемо метод зниження КН за допомогою швидкодіючих статичних тиристорних компенсаторів (СТК) [10].

СТК є пристроєм що забезпечує підвищення ефективності роботи систем передачі і розподілу електроенергії.

Крім забезпечення вимог за основними показниками якості електропостачання, СТК здійснюють розвантаження трансформаторів і живлять лінії електропередачі від реактивної потужності, тим самим знижуючи в них величину діючого струму і активних втрат. У сукупності це дозволяє збільшити передану активну потужність без установки нового обладнання. Ці фактори визначають основний економічний ефект від застосування СТК в електричних мережах. Термін окупності СТК становить від 1 до 3 років.

СТК призначені для оптимізації режимів роботи електричних мереж з метою підвищення пропускної спроможності і стійкості ліній електропередачі, стабілізації напруги в вузлах навантаження, зменшення втрат електроенергії та підвищення її якості.

Функції СТК:

- Регулювання напруги;
- Підвищення статичної та динамічної стійкості електроенергетичних систем;
- Обмеження комутаційних перенапруг;
- Симетрування напружень.

Для компенсації реактивної потужності і підвищення коефіцієнта потужності, фільтрації вищих гармонік струму, зниження коливань напруги і поліпшення параметрів якості електроенергії (зниження несиметрії напруги і стабілізація напруги) застосовуються статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності (КРП).

Ефект від застосування СТК:

- Істотно знизити навантаження по реактивної потужності і вищим гармоникам струму трансформаторів, що живлять споживачі, що дає можливість підключити додаткове навантаження;
- Поліпшити показники якості напруги і тим самим підвищити якість продукції, що випускається і продуктивність технологічного процесу споживача електроенергії.

Наприклад, застосування СТК на металургійному підприємстві призвело до збільшення коефіцієнта потужності навантаження з 0,7 до 0,97, зниження коливання напруги мережі живлення в 3 рази, так само скорочення часу однієї плавки металу (з 150 хвилин до 130 хвилин). Знизилася питома витрата електроенергії на тонну виплавленої сталі на 4%, а також скоротився загальний витрата графітових матеріалів.

Склад СТК:

- Тиристорно-реакторні групи (компенсуючі реактори з тиристорними вентилями)
- Фільтро-компенсуючі пристрої;
- Конденсаторні батареї.

Компенсація КН в даному випадку здійснюється за рахунок компенсації накидів реактивної потужності (РП). Для забезпечення компенсуючого ефекту

час запізнювання при генерації РМ компенсатором має бути мінімальним, щоб не викликати збільшення рівня КН. Так, наприклад, при компенсації наброса РП прямокутної форми рис 11, а з деяким часом запізнювання Δt замість одного з'являється два накинун РМ рис. 11, б і рівень КН збільшується. Ця обставина враховується на практиці при проектуванні системи автоматичного управління СТК, а також виборі його потужності.

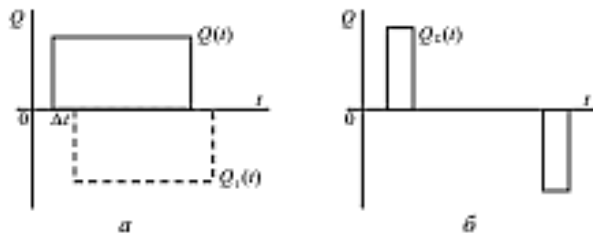


Рисунок 11 – Графіки зміни РП навантаження: а) сумарний графік РП навантаження і СТК (суцільна лінія), і СТК навантаження (пунктирна лінія) б) сумарний графік РП навантаження і СТК

Максимальна компенсує здатність СТК пов'язана з максимальним розмахом КН, який може бути компенсувавши, наступним виразом:

$$Q_{к \max} = \frac{\delta U_{к. \max}}{100 \%} \cdot S_{к} = \frac{d_{к. \max}}{100 \%} \cdot S_{к}, \text{ вар.} \quad (23)$$

З іншого боку, після компенсації цих, еквівалентних по дозі флікера, максимальних КН до допустимого рівня, виходить:

$$\frac{F_{\text{пр}} (d_{\max} - d_{к. \max})}{d_0(r_3)} = 1. \quad (24)$$

З останніх двох виразів очевидно:

$$d_{к. \max} = d_{\max} \left(1 - \frac{1}{P_{St}} \right) \quad (25)$$

або

$$Q_{к.мах} = Q_{мах} \left(1 - \frac{1}{P_{st}} \right). \quad (26)$$

Відзначимо, що розрахунок за виразом (24) дає завищені результати (похибка 5 - 10% в залежності від ступеня розкиду розмахів КН).

Визначимо максимальну компенсуючу здатність СТК-ФКП пов'язану з максимальним розмахом КН:

$$Q_{к.мах} = 26641,55 \cdot \left(1 - \frac{1}{6,8} \right) = 22645,3 \text{ квар.}$$

Доза Флікера після компенсації:

$$P_{st} = 6,8 \cdot \frac{26641,55 - 22645,3}{26641,55} = 1,02 \leq 1,38.$$

Після компенсації реактивної потужності за допомогою СТК доза флікера не перевищує ГДЗ.

Застосування пристроїв компенсації реактивної потужності (ПКРП) дозволяє істотно знизити навантаження по реактивної потужності і вищим гармоникам струму трансформаторів, що дає можливість підключити додаткове навантаження, а так само поліпшити показники якості напруги і тим самим підвищити якість продукції, що випускається і продуктивність технологічного процесу споживача електроенергії.

ВИСНОВОК

В роботі отримано наступні нові результати:

1. Розглянуто фізичні процеси при коливаннях напруги, способи вимірювання та розрахунків показників їх характеризують, вплив коливань напруги на електрообладнання і заходи щодо його зниження в умовах роботи навантаження цеху холодного прокату металургійного підприємства.

2. В результаті проведених досліджень доведено, що КН в цеху холодного прокату перевищують нормоване ГОСТ 13109-97 значення в 5 разів, внаслідок чого знижується якість готових смуг по різнотовщинності і періодичним дефектів поверхні типу «ребристість». Також КН викликають флікер-ефект, що негативно впливає на здоров'я і зір людини.

3. Розроблено програму для побудови графіка електричних навантажень, активної та реактивної потужностей в умовах роботи цеху холодної прокатки металургійного підприємства.

4. Для зменшення КН в умовах роботи цеху холодної прокатки металургійного підприємства слід застосовувати СТК, за допомогою якого вдалося знизити КН до допустимого значення. Крім забезпечення вимог за основними показниками якості електропостачання СТК застосовують також для компенсації реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності, фільтрації вищих гармонік струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жежеленко І.В., Саєнко Ю.Л. Якість електроенергії на промислових підприємствах, Вища школа, 2005 – 320с.
2. ГОСТ 13109-97 Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. - Україна, 2012.
3. Жежеленко І.В., Шидловський А.К., Півняк Г.Г. та ін. Електромагнітна сумісність споживачів. — М.: Машинобудування, 2012. — 351 с.
4. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. — Харків: ФОП Панов А. М., 2016. — 272 с.
5. Жежеленко І.В., Саєнко Ю.Л., Степанов В.П. Методи імовірнісного моделювання в розрахунках характеристик електричних навантажень споживачів. - М.: Вища школа, 1990. - 128с.
6. Солонина А.І. Цифрова обробка сигналів. Моделювання в MATLAB \ А.І. Солонина, С.М, Арбузов - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 816 с.
7. Веніков В.А. Перехідні електромеханічні процеси в електричних системах. - М.: Вища школа, 1985. - 536с.
8. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник / В.Н.Вінославській, Г.Г.Півняк, Л.І.Несен і ін.; Під ред. В.Н.Вінославського. - К.: Вища шк., 1989. - 422с.
9. Півняк Г.Г. Розрахунки показників електромагнітної сумісності: навч. посібник / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка; М-во освіти і науки України, Нац. горн. ун-т. - Д.: НГУ, 2014. - 113 с.
10. Статичні тиристорні компенсатори [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://kvar.su/katalog/staticheskie-tiristornye-kompensatory/>
11. Долін П.А. Техніка безпеки в електроенергетичних установках. - М.: Вища школа, 1988. - 400 с.

ДОДАТОК А Програма для побудови графіка електричних навантажень

```
% Генерація сигналу з заданою АКФ
tic
clear all
clc
t0=1; % дискретність по часу
mm=[5500];
sigma=[916];
A=normrnd(mm, sigma, 1, 120);
w0=0.2; alpha=0.16; % параметри АКФ
c1=1-exp(-4*alpha*t0); c0=exp(-alpha*t0)*(exp(-2*alpha*t0)-
1)*cos(w0*t0); b0=((c1+(c1^2-4*c0^2)^0.5)/2)^0.5; % коефіцієнти
для фільтрації
a0=sigma*b0; a1=sigma*c0/b0; b1=2*exp(-alpha*t0)*cos(w0*t0); b2=-
exp(-2*alpha*t0); % коефіцієнти для фільтрації
for i=3:length(A)-1;
    C(1)=0; C(2)=0;
    C(i)=a0*A(i)+a1*A(i-1)+b1*C(i-1)+b2*C(i-2);
end
I=C'+mm; % додали мат. очікування
del=179; % удаляем початкову частину
I(1:del)=[]; % удаляем початкову частину
R=xcorr(I-mean(I), 'coeff'); R(1:length(I)-1)=[]; % АКФ нормована
X=0:length(I)-1; % масив часу для АКФ
r=exp(-alpha*t0*X).*cos(w0*t0*X); % теоретична АКФ
figure
plot(X*t0,R,X*t0,r), grid on, axis([-0.05 100 -0.5 1]) % совместили
две АКФ
chi2gof(I) % перевірка на нормальність
toc % розрахунок часу виконання коду
Value=reshape(I,1,(length(I))); % Значення змодельованого графіку
переводимо з стовпця у строку
Y=(1:(length(Value)));
plot(I)
```