

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
Дніпровський металургійний комбінат, м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОЯВИ ВИЩИХ ГАРМОНІК ТА СТРУКТУРИ КОЕФІЦІЄНТІВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ СТРУМУ І НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА З ПРОКАТНИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Вступ. Застосування на промислових підприємствах металургійного комплексу потужних електроспоживачів, які живляться від напівпровідникових перетворювачів, обумовило появу в електричних мережах вищих гармонік (ВГ) струмів і напруг. Приймаючи до уваги їх негативний вплив на експлуатаційні характеристики електричного обладнання та хід технологічних процесів, необхідно визначити принципи появи ВГ та засоби їх обмеження. У цьому аспекті доцільно також дослідити склад і рівень гармонік різних порядків, тобто структуру основних показників – коефіцієнтів несинусоїдальності струму і напруги.

Постановка задачі. Аналіз причин появи вищих гармонік, визначення складу та рівня вищих гармонік струмів і напруг мережі живлення, їх взаємний вплив на структуру коефіцієнтів несинусоїдальності.

Результати роботи. Проведено вимірювання вищих гармонік струмів і напруг (до $v \leq 40$) з визначенням коефіцієнтів несинусоїдальності при роботі та відсутності силових фільтрів; дослідження показали, що для систем електроживлення підприємств із значною кількістю регульованих перетворювачів не можна обмежуватись вищими гармоніками порядку $v \leq 13$, оскільки визначення коефіцієнта несинусоїдальності напруги у цьому разі дає похибку до 30-40%, а однією з основних причин появи ВГ є недосконала робота системи імпульсно-фазового керування перетворювачами. Дослідження дозволили визначити структуру коефіцієнтів несинусоїдальності, тобто вклад ВГ різних порядків у їх формування та величину.

Основний зміст роботи.

1. Характеристика об'єкта та результати експериментальних досліджень.

У якості об'єкта дослідження взятий вузол електроживлення сортопрокатних цехів металургійного комбінату з підстанцією глибокого вводу 150/10 кВ, яка живить три цехові підстанції.

Загальна потужність навантаження

– для трансформатора Т-3 (III секція шин):

$n=20$, за схемою $\Delta Y-Y$ – 12995 кВт; $n=12$, за схемою $Y Y-Y$ – 9440 кВт;

– для трансформатора Т-4 (IV секція шин):

$n=21$, за схемою $\Delta Y-Y$ – 11225 кВт; $n=26$, за схемою $Y Y-Y$ – 13035 кВт.

На кожну секцію шин ввімкнені силові резонансні фільтри, налаштовані на 3-5-7-11 гармоніки.

Вимірювання і обробка інформації виконувалась в основному мікропроцесорним комплексом ANAYST2Q (фірми LANDIS&GYR), комплекс дозволив реєструвати вищі гармоніки напруги і струму до 25-ї гармоніки включно, гармоніки від 2 до 40 вимірювались аналізатором гармонік 43250. Вимірювання проводились протягом кількох діб з різними навантаженнями при наявності та відсутності силових фільтрів.

Вимірювання гармонік у нормальних режимах навантаження та без фільтрів показало наступне: друга та третя гармоніки слабо проявляються у спектрі, тобто середні значення на рівні 0,2-0,5%; канонічні гармоніки 5-7 на рівні 0,8-1,2%; гармоніки 11-13 на рівні 1,0-1,2% відповідно; при цьому коефіцієнт несинусоїдальності напруги ($K_{нс}$) знаходився у межах 4,5-8,7% [2]. Результати вимірювань наведено у табл.1.

Таблиця 1 – Значення вищих гармонік напруги живильної мережі 10 кВ у разі відсутності силових фільтрів

Частота ν	$U_v^{\%}$			
	Тр-р Т4 $K_{нс}=(4,5-7,7)\%$ $U_{ш}=10,0$ кВ $I_{наб}=1,1\div 1,3$ кА	Тр-р Т3 $K_{нс}=(4,5-7,2)\%$ $U_{ш}=9,9$ кВ $I_{наб}=1,0\div 1,2$ кА	Тр-р Т3 $K_{нс}=(5,5-8,2)\%$ $U_{ш}=10,0$ кВ $I_{наб}=1,1\div 1,3$ кА	Тр-р Т3 $K_{нс}=(3,5-5,7)\%$ $U_{ш}=10,0$ кВ $I_{наб}=0,8\div 0,9$ кА
3	0,3	0,3-0,4	0,3	0,3
4	0,0	0,1	0,0	0,1
5	0,8-1,1	1,0-1,6	0,8-1,1	0,6
6	0,3	0,0	0,3	0,0
7	0,5-0,7	0,3-0,7	0,5-0,7	0,5-0,6
8	0,2	0,2	0,2	0,0
9	-	-	-	0,0
10	0,1	0,2	0,1	0,1
11	0,3	1,0-1,8	0,3	0,3-0,6
12	0,2	0,1	0,2	-
13	0,3	0,5-1,2	0,3	0,3-0,5
14	-	0,0	-	-
15	0,1	-	0,1	-
16	-	-	-	-
17	0,7-1,0	0,6-1,0	0,7-1,0	0,3-0,4
18	-	0,2	-	-
19	0,9-1,1	0,6-0,7	0,9-1,1	-
20	0,2	-	0,2	0,4-0,6
21	0,6-0,9	0,1-0,4	0,6-0,9	0,3
22	0,4-0,6	-	0,4-0,6	0,5-0,7
23	3,1-3,6	1,0-1,4	3,1-3,6	0,5-0,8
24	0,3	0,2	0,3	0,5-1,1
25	2,3-2,8	0,9-1,2	2,3-2,8	0,4-1,1
26	0,6-1,2	0,4-0,6	0,6-1,2	0,5
27	0,8-1,2	0,2	0,8-1,2	0,9-1,4
28	0,6-1,0	0,4-0,6	0,6-1,0	0,5-0,9
29	1,8-3,9	0,6-0,8	1,8-3,9	1,2-2,3
30	1,1-1,8	0,4-0,6	1,1-1,8	1,4-1,7
31	0,9-1,6	0,4-0,5	0,9-1,6	0,7-1,8
32	0,3-0,5	0,3-0,5	0,3-0,5	0,9-1,4
33	0,2	0,6-1,0	0,2	0,7-1,5
34	0,2	0,4-0,7	0,2	0,5-0,7
35	0,4-0,5	1,4-2,1	0,4-0,5	0,4-0,6
36	0,2	0,7-1,8	0,2	0,2-0,5
37	0,2-0,4	1,5-2,7	0,2-0,4	0,5-0,7
38	0,2-0,4	0,8-1,7	0,2-0,4	0,2
39	0,1	0,8-1,8	0,1	0,2
40	0,1	0,4-0,8	0,1	0,2

Аналіз експериментів показав, що основну вагу у формуванні K_{nc} визначають гармоніки не низького порядку $\nu \leq 13$, як завжди рекомендують [1], а високого – від $\nu=21$ до $\nu=40$.

Так, були зафіксовані значення: $\nu=22 - 0,9\%$; $\nu=25 - 1,3\%$; $\nu=29 - 4,6\%$; $\nu=36 - 1,8\%$; $\nu=39 - 1,8\%$. Як бачимо, тут присутні в основному парні і непарні неканонічні гармоніки. Появу у спектрі парних і непарних гармонік високого порядку такого рівня можна пояснити в основному несиметрією імпульсів керування тиристорами.

Осцилографування імпульсів керування тиристорами перетворювачів (ІФК), проведене на десяти клітках чорнової та чистової групи, показало, що допустима норма у 3 ел.град. [1] перевищувалась у 8 випадках і знаходилась у межах $\varepsilon=5,2-9,5$ ел.град. Осцилограми передніх і задніх фронтів (рис.1) показують невідповідність моментів вмикання тиристорів, які повинні становити 60 ел.град.



Рисунок 1 – Суміщення імпульсів керування тиристорами (передній і задній фронти)

При несиметрії проти-фазних імпульсів у 3 ел.град. рівень аномальних гармонік струму намагнічення трансформатора перевищує рівень відповідних гармонік струму перетворювача. Рівень аномальних гармонік струму анодних трансформаторів для схеми із зрівнювальними реактором при асиметрії керуючих імпульсів у 3 ел.град. вважається неприпустимо великим,

тому максимальне значення асиметрії за рекомендацією [1] не повинно перевищувати 1 ел.град.

Вентильні перетворювачі багатоклітьових прокатних станів мають по два анодних трансформатори, мережна обмотка одного з них з'єднана зіркою, другого – трикутником. При цьому перетворювачі працюють у режимі, близькому до еквівалентного 12-ти фазного. Незважаючи на той факт, що перетворювачі мають різне навантаження, рівень 5-ї та 7-ї гармонік суттєво зменшується навіть при асиметрії керуючих імпульсів.

2. Дослідження внутрішньої структури коефіцієнтів несинусоїдальності.

2.1 Вибір методу дослідження.

Під структурою коефіцієнтів несинусоїдальності розуміється склад і рівень вищих гармонік, зафіксованих у проведених експериментах при роботі прокатних станів у разі наявності та відсутності силових фільтрів, адже питомий вклад різних гармонік у величину коефіцієнтів несинусоїдальності змінюється у залежності від різних факторів процесу прокатки, які мають імовірнісний характер. Проведені попередні дослідження [3], а також теперішні експерименти підтверджують стохастичний характер залежностей між величиною коефіцієнтів несинусоїдальності і низкою факторів, серед яких можна виділити: загальні – характер кривої намагнічення анодного трансформатора та схему вентильного перетворювача; технологічні – вид і параметри процесу прокатки, рівень струму навантаження та якість роботи системи імпульсно-фазового керування.

У якості методу дослідження пропонується статистичний метод кореляції, при якому застосовуються синтетичні показники інтенсивності та виду зв'язку, а також визначається ступінь впливу різних факторів на коефіцієнти несинусоїдальності струмів і напруги. Розрахунок і побудова автокореляційних та взаємкореляційних функцій дозволяє визначити різні аспекти протікаючих випадкових процесів зміни електричних параметрів, що характеризують роботу системи електроживлення. З теорії випадкових функцій відомо, що основні характеристики – це математичне очікування $m_x(t)$ та дис-

персія $D_x(t)$. Однак у результаті аналізу двох випадкових функцій з однаковими $m_x(t)$ та $D_x(t)$, але різної внутрішньої структури, ця відмінність вказаними характеристиками не помічається. Тобто для опису цих відмінностей необхідно ввести спеціальну характеристику – кореляційну функцію, яка характеризує міру залежності між значеннями випадкової функції у різні моменти часу [5].

2.2. Аналітична обробка результатів експериментальних досліджень.

Якщо процес електроспоживання або електроживлення може бути представлений у вигляді додатку гармонічних коливань різної частоти (гармонік), то його можна представити спектром процесу, тобто функцією, що описує розподіл амплітуд за різними частотами. Спектр показує, які гармонічні складові переважають у даному процесі, яка його внутрішня структура. У залежності від того, які гармоніки і у якому співвідношенні входять до складу випадкової функції, її кореляційна функція буде мати той чи інший вигляд.

У разі дослідження структури коефіцієнтів несинусоїдальності доцільно визначити кореляційний зв'язок між коефіцієнтами $\alpha_i^{\%}$ та $\alpha_u^{\%}$. Розрахунки виконувались для масивів, які осцилографувались синхронно з інтервалом $\Delta t = 1$ хв.

Отримані результати для фази А: середні значення $\alpha_u^{\%} = 5,10$, $\alpha_i^{\%} = 4,19$; дисперсії $D_u = 0,187$, $D_i = 0,178$; коефіцієнт кореляції $R_0 = 0,25$. Аналогічні результати для коефіцієнтів отримані по фазі В – $R_0 = 0,227$; по фазі С – $R_0 = 0,137$. Результат дещо неочікуваний, тому що рівень кореляції між коефіцієнтами несинусоїдальності струмів фаз А і В становить 0,652, а фаз В і С – 0,559, що свідчить про стабільність процесу електроспоживання.

З метою аналізу внутрішньої структури коефіцієнтів несинусоїдальності застосовано принцип розкладу випадкових функцій, якими є поява коефіцієнтів несинусоїдальності струмів і напруг, у ряд Фур'є. Метод дозволяє визначити склад і рівень гармонік даних випадкових процесів. Розрахунки виконувались за програмою [4], яка передбачає визначення гармонічного складу процесу з наступним відкиданням статистично незначних коефіцієнтів (тобто гармонік) за критерієм Стьюдента.

Результати розрахунків для коефіцієнтів струму і напруги наведено у табл.2.

Таблиця 2 – Результати визначення статистично значимих складових ряду Фур'є для коефіцієнтів несинусоїдальності струму і напруги

Коефіцієнт несинусоїдальності струму	$\alpha_i^{\%}$; для $n=30$; $T=156$ хв;
$a_i^{\%} \cdot \cos((i \cdot \omega_1)t)$	$i=1, 5, 7$ $a_0=6,487$
$b_i^{\%} \cdot \sin((i \cdot \omega_1)t)$	$i=1, 3, 5$
Коефіцієнт несинусоїдальності напруги	$\alpha_u^{\%}$; для $n=30$; $T=156$ хв.;
$a_u^{\%} \cdot \cos((i \cdot \omega_1)t)$	$i=1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 14, 15, 22, 23, 24, 27$ $a_0=10,702$
$b_u^{\%} \cdot \sin((i \cdot \omega_1)t)$	$i=1, 2, 6, 7, 8, 12, 15, 18, 19, 21, 27$

Примітка: Значення коефіцієнтів $a_i^{\%}$ і $b_i^{\%}$ та $a_u^{\%}$ і $b_u^{\%}$ не наведено з метою скорочення обсягу статті.

Аналіз розрахунків показав, що коефіцієнти несинусоїдальності струму сформовані непарними гармоніками низьких частот $n \leq 7$, що відповідає висновкам з аналізу амплітудного спектру струму намагнічення анодних трансформаторів [1]. Коефіцієнти несинусоїдальності напруги мають змішану структуру, причому основний вклад зроблено гармоніками високого порядку в діапазоні $n=21 \div 40$ як парними, так і непарними.

Даний фактор можна пояснити наявністю опорів різного типу електричного обладнання, що вмикається.

Висновки.

1. Проведені дослідження показали, що для системи електроживлення промислового підприємства із значною кількістю регульованих перетворювачів при визначенні показників якості електроенергії необхідно враховувати вищі гармоніки до 40 порядку.

2. Показано, що однією з основних причин появи вищих гармонік у мережах підприємства є порушення циклічності вмикання тиристорів у фазах.

3. Структура коефіцієнта несинусоїдальності струму визначається непарними гармоніками низького порядку $n \leq 7$, структура коефіцієнта насинусоїдальності напруги змішана та основний вклад роблять гармоніки високого порядку від 21 до 40.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. К.: Техніка, 1974. 184с.
2. Хмельницький Є.Д., Ключев О.В. Визначення ефективності фільтрів вищих гармонік у мережах 10 кВ металургійного комбінату. *Збірник наукових праць ДДТУ. Кам'янське*, 2017. Вып. 1 (30). С.104-111.
3. Садовой А.В., Хмельницкий Е.Д., Ключев О.В., Волошин Ю.А. Высшие гармоники в распределительной сети 10 кВ металлургического комбината и вопросы оптимизации работы силовых резонансных фильтров. *Вісник КДПУ ім. Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вып. 2 (49) Ч.1.
4. Хмельницький Е. Д., Ключев О.В. Исследование нестационарных случайных процессов в электроснабжении. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ*. Кременчук: КДПУ, 2005. Вып.3(32). С.144-147.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятности. М.: Наука, 1969. 576с.

Надійшла до редколегії 02.07.2019.

УДК 621.313.322

DOI 10.31319/2519-2884.35.2019.48

НІЗІМОВ В. Б., д.т.н., професор

ХОМЕНКО В. І., * к.т.н, викладач вищої категорії

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

*Придніпровський державний металургійний коледж, м. Кам'янське

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РЕЖИМІВ ФОРСУВАННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЇ ГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

Вступ. Одним з важких режимів роботи синхронних генераторів (СГ) автономних генеруючих установок (АГУ) є підключення споживачів співмірної потужності, у результаті чого генератори втрачають стійкість через інерційність обмотки збудження (ОЗ), значного динамічного падіння напруги та її тривалості. Це призводить до вимикання споживачів навіть при наявності відомих способів і пристроїв форсування напруги збудження. Крім того АГУ часто використовується в якості резервного джерела електроживлення для споживачів I та II категорії [1].

Наприклад, на виробничій базі птахофабрики «Оріль-Лідер» у цеху забою та переробки курчат-бройлерів вихід готової продукції становить 9500 голів за одну годину,